

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COEME
ENGENHARIA MECÂNICA**

CARLA LUIZA COSTA DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O PROCESSO DE
ALARGAMENTO E A OPERAÇÃO DE FURAÇÃO CONVENCIONAL
EM AÇO SAE 4140**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2018

CARLA LUIZA COSTA DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O PROCESSO DE
ALARGAMENTO E A OPERAÇÃO DE FURAÇÃO CONVENCIONAL
EM AÇO SAE 4140**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
engenharia mecânica pela Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ms. Henrique Ajuz
Holzmann

GUARAPUAVA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava

Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O PROCESSO DE ALARGAMENTO E A OPERAÇÃO DE FURAÇÃO CONVENCIONAL EM AÇO SAE 4140

por

Carla Luiza Costa Dos Santos

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 11 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro(a) Mecânico. O candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Henrique Ajuz Holzmann
Prof.(a) Orientador(a)

Aldo Przybysz
Membro titular

Ricardo Vinicius Bibna Biscaia
Membro titular

Aldo Przybysz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

RESUMO

SANTOS, C.L.C.. Estudo comparativo entre o processo de alargamento e furação convencional em aço SAE 4140. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo em relação a precisão geométrica, entre o processo de alargamento e a operação de furação convencional utilizando broca helicoidal em aço SAE 4140. Para realizar este estudo, foi utilizada uma broca com diâmetro de 10 mm para o processo de furação convencional, e uma broca de 9,5 mm para a realização do pré-furo, e posteriormente foi realizado o alargamento. Os dois processos foram realizados à seco, e foram realizados 17 furos passantes com diâmetro de 10 mm em cada processo. Após a realização dos furos o corpo de prova foi encaminhado a uma máquina de medição em coordenadas para verificação dos desvios de cilindridade e circularidade. No decorrer dos processos de furação e alargamento foram sendo realizadas medições em relação ao desgaste de flanco em cada ferramenta utilizada.

Palavras-chave: Alargamento, furação convencional, broca helicoidal, aço SAE 4140, cilindridade, circularidade, desgaste de flanco.

ABSTRACT

The aim of this work is to perform a comparative study in relation to the geometric precision between the expansion process and the conventional drilling operation using SAE 4140 steel helical drill. In order to perform this study, a drill with a diameter of 10 mm was used for the conventional boring process and 9.5 mm drill bit for the pre-drilling, and then the enlargement was carried out. The two processes were performed in the dry, and 17 through holes with a diameter of 10 mm were made with each process. After the drilling of the holes the test body was sent to a measuring machine in coordinates to verify the deviations of cylindricity and circularity. During the drilling and enlargement processes, measurements were made in relation to the flank wear in each tool.

Keywords: Enlargement, conventional drilling, helical drill, SAE 4140 steel, cylindricity, circularity, flank wear.

LISTA DE FIGURA

| | |
|---|----|
| Figura 1 - - Broca helicoidal com haste cilíndrica ou cônica..... | 15 |
| Figura 2 - Tipos de alargamento | 16 |
| Figura 3 - 3 – Qualidade de trabalho para eixos e furos | 18 |
| Figura 4 – Notações e simbologia dos erros macrogeométricos..... | 19 |
| Figura 5 – Desvios de circularidade (a) e de cilindridade (b) representados graficamente..... | 20 |
| Figura 6 – Erros geométricos no processo de furação..... | 21 |
| Figura 7 – Propriedades mecânicas do aço AISI 4140 | 23 |
| Figura 8 – Fluxograma das etapas a serem realizadas..... | 24 |
| Figura 9 – Corpo de prova que utilizado nos ensaios | 24 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 – Desgaste de flanco (V_{bmax}) μm | 29 |
| Gráfico 2 – Desvio de diâmetro – Broca 10 mm..... | 30 |
| Gráfico 3 – Desvio de diâmetro – Furação intermediária 9,5 mm | 32 |
| Gráfico 4 – Desvio de diâmetro – Alargamento..... | 33 |
| Gráfico 5 - Desvio de cilíndricidade em função do processo..... | 36 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Desvio de circularidade – Furo 1, 8 e 16 de cada processo..... | 25 |
|---|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Composição do Aço SAE 4140 | 22 |
| Tabela 2 – Parâmetros de corte – Furação Convencional | 25 |
| Tabela 3 – Parâmetros de corte | 25 |
| Tabela 4 – Desgaste de Flanco (V_{bmax}) μm | 28 |
| Tabela 5 – Diâmetro real em função do processo de furação com broca 10 mm | 29 |
| Tabela 6 – Diâmetro real em função do processo de furação com broca 9,5 mm | 31 |
| Tabela 7 – Diâmetro real em função do processo alargamento | 32 |
| Tabela 8 – Desvio de circularidade em função do processo | 34 |
| Tabela 9 – Desvio de cilindricidade em milímetros | 35 |

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

Z – Número de peças

tt – tempo total de usinagem

tc – tempo de corte

ts – tempo secundário

ta – tempo de preparo da máquina

tft – tempo de troca da ferramenta

Nt – número de trocas da ferramenta

T – tempo de vida da ferramenta

Kp – custo total de fabricação de uma peça

C1 – constante de custo independente da velocidade

C2 – soma das despesas totais de mão-de-obra e salário máquina

C3 – constante de custo relativo à ferramenta

vc – Velocidade de corte

vf – Velocidade de avanço

f – Avanço por rotação

n - rotação

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS | 11 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 12 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 14 |
| 2.1 PROCESSO DE FURAÇÃO | 14 |
| 2.2 PROCESSO DE ALARGAMENTO | 15 |
| 2.2.1.1 Alargadores | 16 |
| 2.3 METROLOGIA DO FURO | 17 |
| 2.4 PROBLEMAS NA FURAÇÃO | 20 |
| 2.5 TEMPO DE PROCESSO E CUSTOS | 21 |
| 2.6 AÇO SAE 4140 | 22 |
| 3 METODOLOGIA | 24 |
| 3.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA | 24 |
| 3.2 PROCESSO DE USINAGEM | 25 |
| 3.2.1.1 Processo de furação utilizando broca helicoidal | 25 |
| 3.2.1.2 Processo de alargamento | 25 |
| 3.3 INSPEÇÃO DOS FUROS | 26 |
| 3.4 ANÁLISES FINAIS | 27 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 28 |
| 4.1 DESGASTE DE FLANCO | 28 |
| 4.3 DESVIO DE CIRCULARIDADE | 34 |
| 4.4 DESVIO DE CILINDRICIDADE | 35 |
| 5 CONCLUSÃO | 37 |
| 6 REFERÊNCIAS | 38 |

1 INTRODUÇÃO

De forma ampla, a manufatura pode ser entendida como a transformação de matérias-primas em produtos acabados, através de processos, seguindo planos bem organizados e bem definidos. Já o termo fabricação é empregado de uma forma mais restrita, limitando-se aos processos nele envolvido. A fabricação é geralmente referenciada como uma sequência de operações, onde cada etapa individual conduz a matéria-prima a um estado mais próximo do objeto final (GROOVER, 2007)

Quando a matéria prima é metálica, tem-se de forma global dois tipos de classificações para os processos de fabricação, os mecânicos (usinagem e conformação) e os metalúrgicos (fundição e soldagem). Segundo Trent (2000), dentre esses processos a usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo.

Grande parte das peças metálicas obtidas por meio dos processos metalúrgicos convencionais, em sua maioria requerem operações de usinagem para obtenção do acabamento superficial desejado e melhorar as tolerâncias dimensionais (CHIAVERINI, 2012).

Dentre as operações de usinagem, a que tem a função de abrir, alargar ou acabar furos de peças, é a furação (CHIAVERINI, 2012). O que a torna um dos processos mais empregados na indústria manufatureira, já que na maioria das peças industriais nota-se a presença de furos, envolvendo assim aproximadamente 30% de todas as operações de usinagem de metal. Nessa operação leva-se em conta alguns fatores como, diâmetro do furo, tolerâncias de forma e de medidas, tolerâncias e volume de produção (DINIZ, 2006).

Nas operações de furação utiliza-se ferramentas denominadas brocas, que podem ser classificadas como, brocas chatas, brocas helicoidais, brocas canhão (para furos profundos), brocas ocas para trepanação dentre outras. A furação utilizando essa ferramenta apresenta dificuldade em relação à remoção do cavaco e lubrificação na região de corte, nota-se também grande vibração durante o processo, e uma velocidade de corte não uniforme, variando de zero no centro do furo até um máximo na periferia (STEMMER, 2008). Todos esses fatores resultam muitas vezes em furos ovalizados (variação geométrica em relação à circunferência), acabamento superficial grosseiro e tolerâncias muito largas em relação a uma necessidade específica. Sendo

assim, operações subsequentes são muitas vezes necessárias, com o objetivo de se obter furos com melhor precisão dimensional, maior precisão de forma e alinhamento e melhor acabamento superficial.

A grande maioria das operações de furação são realizadas com brocas helicoidais e um fator extremamente importante em relação a isso, é sua imprecisão. A tolerância dimensional normal de superfícies furadas com essa ferramenta é da ordem de IT11 (DINIZ, 2006) - a norma NBR 6758/1995, prevê 18 qualidades de trabalho para furos. Essas qualidades são identificadas pela letra IT seguidas de numerais - Para o caso da tolerância dimensional IT11, o número 11 indica a qualidade de trabalho, e ele está associado a uma qualidade de trabalho recorrente. Portanto, quando é preciso obter um furo de maior precisão, realiza-se operações subsequentes, como por exemplo, operações de torneamento interno, mandrilamento e alargamento (STEMMER, 2008).

Segundo Diniz (2006), para furos de precisão e de pequenos diâmetros (normalmente menores que 20 mm), usa-se geralmente a operação de alargamento, que é um processo mecânico de usinagem destinado ao desbaste ou ao acabamento de furos cilíndricos ou cônicos, com auxílio de ferramenta multicortante (FERRARESI, 1924). Essa operação também pode ser definida, segundo a norma DIN 8589, como um tipo de furação que utiliza uma ferramenta de alargar (alargadores) para produzir pequenas espessuras de cavacos e criar superfícies com alta qualidade dimensional e de forma (DA SILVA, 2001).

Considerando as dificuldades e limitações do processo de furação utilizando brocas helicoidais, o presente trabalho tem o intuito de comparar uma furação convencional por brocas com a furação utilizando alargadores de acabamento, avaliando parâmetros técnicos e econômicos, identificando qual a melhor escolha entre eles para uma determinada situação.

1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo do presente trabalho é apresentar um comparativo em relação a precisão geométrica entre o processo de alargamento de furos, e a operação de furação convencional com broca helicoidal em aço SAE 4140.

Já os objetivos específicos são:

- Realizar o processo de furação com broca helicoidal;
- Realizar o processo de alargamento do furo;
- Realizar inspeções de medição do furo alargado;
- Comparar os desvios de cilindridade e circularidade obtidos em cada processo;
- Realizar medições de desgaste de flanco em cada ferramenta, e realizar um comparativo.

1.2 JUSTIFICATIVA

As características da economia globalizada, em especial a acirrada concorrência, trazem a necessidade de se desenvolver sistemas de melhor desempenho e produtos com custos competitivos, ou seja, as organizações buscam adotar processos que assegurem a qualidade e produtividade, otimizando seus processos, minimizando custos e prazo de entrega (BAZZO, PEREIRA, 2006).

Otimização é o processo de procura por uma solução que forneça o máximo benefício segundo algum critério; ou seja, é a busca da melhor condição para um determinado problema, cabendo ao profissional da engenharia identificar qual será a melhor delas. No entanto, restrições econômicas, de tempo, de recursos técnicos ou mesmo de falta de conhecimento limitam muitas vezes essa escolha (BAZZO, PEREIRA, 2006).

Referente ao uso do processo de furação, o furo produzido utilizando apenas brocas helicoidais apresenta várias limitações quando se diz respeito a precisão dimensional e acabamento superficial, e no mercado atual há inúmeras aplicações nas quais se necessita destas características, de modo que os furos produzidos requerem uma qualidade que um único processo de furação não consegue alcançar, necessitando de operações subsequentes, como por exemplo o processo de alargamento, que faz desta operação de furação uma das mais influentes em termos de custo de fabricação.

Cilindridade é a diferença de raio entre dois cilindros concêntricos contidos na superfície do furo. O desvio de cilindridade pode gerar problemas em peças rotativas fazendo com que ocorra vibração devido ao desbalanceamento. Já em um conjunto de peças rotativas esse desvio pode fazer com que ocorra folga ou interferência para

diferentes posições angulares. Em guias cilíndricas esse desvio de cilindridade pode fazer com que a guia dificulte ou impeça o movimento de um mancal linear. Desta maneira, é de extrema importância realizar a especificação desse desvio sempre que a falta da tolerância desta superfície comprometer o funcionamento da peça ou do conjunto de peças (STOCKLER, MARCO, 2016). Portanto, um estudo comparativo entre os dois processos de furação - o que utiliza somente a broca, e o que faz uso do alargador - é de grande relevância pois mostrará qual o melhor processo a ser utilizado, de modo que se obtenha furos com menores desvios de cilindridade, circularidade, ou seja, uma maior precisão dimensional.

Em relação aos aços, eles são muito utilizados em aplicações industriais, como por exemplo os aços de baixa liga da família SAE 4xxx. Esses aços alcançam alta resistência por meio dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido. Um dos principais aços da família 41xx é o AISI/SAE 4140, sendo um dos mais aplicados na indústria metal-mecânica, principalmente em peças que exigem elevada dureza e tenacidade (ASM Handbook, 1990). De modo recorrente são muito utilizados na fabricação de automóveis, aviões, virabrequins, bielas, eixos, engrenagens, armas, parafusos, equipamentos de petróleo, dentre outros (ROCHA, 2004). Sendo assim, pode-se afirmar que é de grande importância realizar estudos referentes aos processos de fabricação mecânica utilizando este material.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PROCESSO DE FURAÇÃO

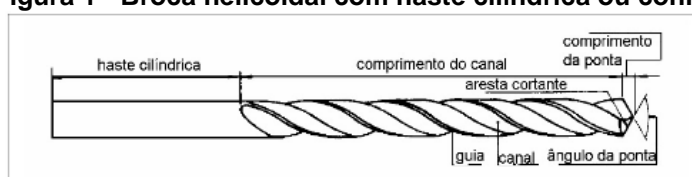
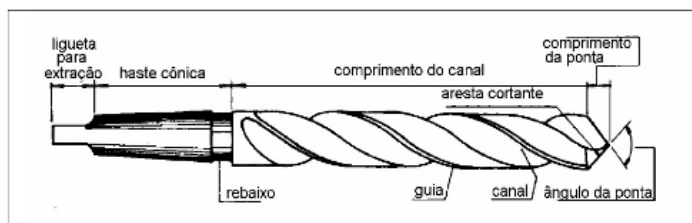
O processo mecânico de usinagem designado para a obtenção de um furo normalmente cilíndrico em uma peça, utilizando na maioria das vezes uma ferramenta multicortante, é definido como furação (FERRARESI, 1924).

Grande parte das peças, em qualquer segmento industrial, tem ao menos uma geometria de furo, e como apenas uma parte muito pequena dessas conseguem geometrias acabadas a partir dos processos primários de fabricação (fundição, forjamento, etc), é necessário um processo posterior de acabamento, o que o torna a furação um dos processos de usinagem mais empregados na indústria manufatureira (DINIZ, 2014).

De acordo com Klocke (2011), o processo de furação apresenta algumas particularidades:

- A velocidade de corte é nula no centro da broca, chegando ao seu valor máximo na periferia (diâmetro máximo) da ferramenta;
- Apresenta dificuldade no transporte dos cavacos para fora da cavidade da broca;
- Distribuição inadequada de calor na região de corte;
- Quando não apresenta chanfro, a quina da broca está sujeita a desgastes excessivos;
- As guias das ferramentas se atritam com a parede do furo durante o processo.

A ferramenta normalmente utilizada no processo de furação é denominada broca, sendo uma ferramenta rotativa e cilíndrica, que possui arestas de corte em sua ponta útil. As brocas mais utilizadas na indústria, por realizar o processo de forma rápida e econômica, são as brocas helicoidais. Seus diâmetros variam entre 0,15 mm até valores superiores a 75 mm (GROOVER, 2007). A Figura 1 mostra as partes de uma broca helicoidal segundo a norma NBR 6179.

Figura 1 - Broca helicoidal com haste cilíndrica ou cônica*broca helicoidal de haste cilíndrica**broca helicoidal de haste cônica*

Fonte: <<https://www.dumonttreinamentos.com.br/terminologia>>

Na maioria das vezes, as operações de furação são executadas com brocas helicoidais de aço rápido com ou sem camada de cobertura. Como consequência, tem-se um processo bastante lento, além de apresentar outras desvantagens, como uma imprecisão no furo gerado. Geralmente a tolerância dimensional de furos obtidos com essa ferramenta é da ordem IT 11. Em relação a tolerância geométrica, o comprimento do furo não pode ser muito grande (Largura/Diâmetro máximo da ordem de 3), podendo ocorrer excentricidade. Portanto, quando é necessário a obtenção de um furo de precisão, emprega-se uma broca helicoidal, para realizar um pré-furo, e em seguida, são realizadas operações de acabamento, como por exemplo, alargamento, brochamento, mandrilamento, torneamento interno, etc., para obter as características desejadas (DINIZ, 2006).

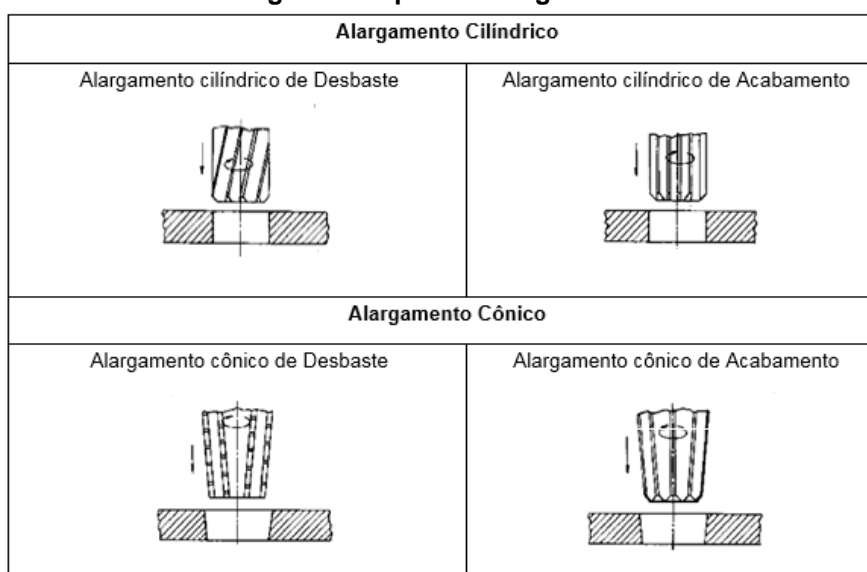
Assim, quando é necessário realizar uma calibração no furo e melhorar algumas características, como o acabamento da superfície gerada pela broca helicoidal, comumente utiliza-se alargadores de desbaste ou acabamento. Podendo-se obter furos com qualidades de trabalho que podem chegar até IT 6, e esse processo é definido como alargamento (STEMMER, 2008).

2.2 PROCESSO DE ALARGAMENTO

De acordo com a norma DIN 8589, o alargamento é um processo de usinagem de precisão, que proporciona algumas mudanças nas características de um furo já existente, como aumento do furo, melhorias no acabamento superficial e de

geometria, podendo se obter qualidades de trabalho da ordem IT7. Já Ferraresi (1924) definiu o alargamento como um processo mecânico de usinagem atribuído ao desbaste ou acabamento de furos cilíndricos ou cônicos, utilizando normalmente uma ferramenta multicortante. Onde a ferramenta ou a peça giram e ao mesmo tempo a ferramenta ou a peça se movem numa trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo de rotação da ferramenta. O alargamento pode ser do tipo cilíndrico ou cônico, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Tipos de alargamento



Fonte: Ferraresi, 1924.

Esses alargadores possuem uma série de gumes e canais, revezados na periferia do cone ou cilindro. Os gumes podem ser paralelos ao eixo do alargador ou então helicoidais, com hélice à direita ou à esquerda (STEMMER, 2008).

2.2.1.1 Alargadores

Os alargadores, são ferramentas de geometria definida, utilizadas nas operações de alargamento. Segundo Schoroeter (1989) e Stemmer (2008) os alargadores podem ser classificados da seguinte maneira:

- Tipo de operação – podem ser de desbaste ou acabamento. Para desbaste, os alargadores têm a função de aumentar o diâmetro do furo em bruto, como os obtidos nos processos primários (fundição e forjamento). Já com alargadores

de acabamento, é possível obter furos com medidas mais precisas de forma e uma maior qualidade em relação ao acabamento superficial (STEMMER, 2008).

- Tipo de dentes (canais) – podem ser dentes retos ou helicoidais. Os alargadores helicoidais são na maioria das vezes de corte à direita. Empregando-se uma hélice esquerda, o cavaco é impulsionado à frente, não havendo contato entre o cavaco e a superfície já usinada, o que acaba evitando que essa superfície seja prejudicada. Esse tipo de alargador é indicado na presença de interrupções (rasgos de chaveta, furos, fenda) na parede do furo. Os alargadores de dentes retos são preferíveis em situações em que são necessárias grandes precisões (STEMMER, 2008).

- Tipo de fixação – podem possuir haste cônica ou cilíndrica.

- Quanto ao sentido do corte – O corte pode ser à direita ou à esquerda. O sentido do corte é analisado observando-se o alargador de topo, localizado horizontalmente em frente ao observador. Quando o dente inferior corta da direita para a esquerda, diz-se que o corte é à esquerda (o alargador corta em sentido horário), do contrário, o corte é à direita (SCHROETER, 1989).

- Quanto ao uso – Os alargadores podem ser manuais ou de máquina. O chanfro de entrada dos alargadores manuais os diferenciam dos alargadores de máquina, pois esse chanfro é maior e de menor inclinação nos alargadores manuais (SCHROETER, 1989).

- Quanto à regulagem – podem ser fixos ou ajustáveis. Nos alargadores ajustáveis tem-se a possibilidade de variar o diâmetro dessa ferramenta, dentro de um certo intervalo, através de ajustes radiais dos dentes. Já nos alargadores fixos, tem-se apenas uma dimensão (SCHROETER, 1989).

- Quanto a geometria do furo – podem ser cônicos ou paralelos.

- Quanto ao número de dentes – Os alargadores podem ser de corte múltiplo ou de corte único (um dente).

2.3 METROLOGIA DO FURO

Segundo Albertazzi e de Souza (2008), a tolerância é a faixa de variação aceitável para uma característica de um produto, definida de forma a garantir a qualidade com que ele realiza a função para a qual foi projetado. Essa tolerância é

determinada com base no sistema de tolerância e ajuste ABNT/ISO, que é um sistema normalizado (NBR 6158).

O sistema ISO é constituído por um conjunto de princípios e regras que promovem a escolha racional de tolerâncias e ajustes de forma que a produção de peças intercambiáveis torna-se mais econômica.

A precisão da peça, ou seja, a qualidade de trabalho, é determinada a partir de uma série de tolerâncias essenciais que são definidas pelo o sistema ISO. A norma brasileira presume 18 qualidades de trabalho, que são identificadas pelas letras: IT (onde I vem de ISO e a letra T vem de tolerância) seguidas de numerais (01,0,1,2,...,16) que referem-se as qualidades (SOUZA, 2013). A Figura 3 mostra as qualidades de trabalho para eixos e furos.

Figura 3 - Qualidade de trabalho para eixos e furos

| | | Qualidade de Trabalho | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--|------------------------|-----|-----|-----|-------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | IT01 | IT0 | IT1 | IT2 | IT3 | IT4 | IT5 | IT6 | IT7 | IT8 | IT9 | IT10 | IT11 | IT12 | IT13 | IT14 | IT15 | IT16 |
| Eixos | | mecânica extra-precisa | | | | | mecânica corrente | | | | | | mecânica grosseira | | | | | | |
| Furos | | mecânica extra-precisa | | | | mecânica corrente | | | | | | | mecânica grosseira | | | | | | |

Fonte: <<http://www.eterfs.com.br/material/mecanica/METROLOGIA%202.PDF>>

A mecânica extraprecisa, abrange as qualidades entre 01 a 3, no caso dos eixos, e entre 01 a 4, no caso dos furos. Já as qualidades entre IT4 e IT11, no caso dos eixos, e entre IT5 e IT11 no caso dos furos, estão associados à mecânica corrente, ou mecânica de precisão, que normalmente é uma precisão necessária em peças que funcionam acopladas a outras. E por fim, as qualidades 12 a 16, estão classificadas como mecânica grosseira, pois correspondem a maiores tolerâncias de fabricação (SOUZA, 2013).






De acordo com Souza (2013), é comum aparecerem peças com superfícies fora dos limites de tolerância, devido várias falhas no processo de usinagem, nos instrumentos ou nos procedimentos de medição. Nesse caso, a peça apresenta erros de forma. Um erro de forma corresponde à diferença entre a superfície real da peça e a forma geométrica teórica. A forma do elemento será correta quando cada um dos seus pontos for igual ou inferior ao valor da tolerância dada. Esses erros são ocasionados por vibrações, imperfeições na geometria da máquina, defeito nos mancais e nas árvores etc.

A norma NBR 6405/1988 apresenta alguns termos e conceitos de grande relevância para o estudo e avaliação do estado da superfície, que são:

- Superfície real – é a superfície que separa o corpo do ambiente;
- Superfície geométrica – é a superfície ideal prescrita nos desenhos e isenta de erros;
- Superfície efetiva – é a superfície levantada pelo instrumento de medição. É a superfície real, deformada pelo instrumento.
- Perfil real – corte da superfície real;
- Perfil geométrico – corte da superfície geométrica;
- Perfil efetivo – corte da superfície efetiva;
- Erros macrogeométricos – detectáveis por instrumentos convencionais;
- Erros microgeométricos – detectáveis apenas por rugosímetro, perfiloscópios etc. São definidos como rugosidade.

A Figura 4 apresenta as características das peças afetadas pelas tolerâncias:

Figura 4 – Notações e simbologia dos erros macrogeométricos

| Características afetadas pelas tolerâncias | | |
|--|----------------------------------|---|
| FORMA para elementos isolados | Retilidade | — |
| | Planeza |  |
| | Circularidade |  |
| | Cilindricidade |  |
| | Forma de uma linha qualquer |  |
| | Forma de uma superfície qualquer |  |

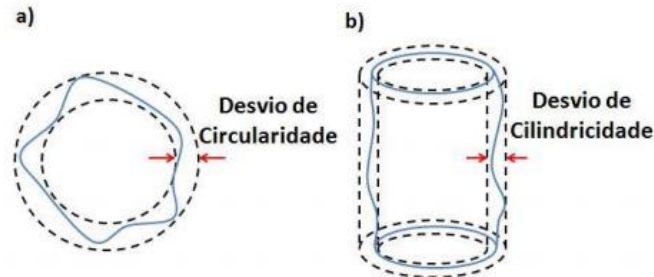
Fonte: < <http://www.eterfs.com.br/material/mecanica/METROLOGIA%202.PDF>>

Segundo Souza, Arencibia e Sato (2011), o desvio de circularidade, graficamente, equivale à distância radial mínima entre duas circunferências concêntricas, dentre as quais deve estar contido o perfil real da peça. Já o desvio de cilindridade é definido como a diferença radial entre dois cilindros coaxiais entre os quais deve estar localizada a superfície real da peça. A Figura 5 ilustra uma representação gráfica dos desvios de circularidade (a) e de cilindridade (b).

A circularidade é um caso especial de cilindridade, quando se considera uma seção do cilindro perpendicular à sua geratriz. A tolerância de cilindridade engloba, as tolerâncias admissíveis na seção longitudinal do cilindro, que compreende

conicidade, concavidade e convexidade, e tolerância admissível na seção transversal do cilindro, que corresponde à circularidade (SOUZA, 2013).

Figura 5 – Desvios de circularidade (a) e de cilindricidade (b) representados graficamente



Fonte:< http://limcserver.dee.ufcg.edu.br/metrologia_2011/imekotc4/86501.pdf>

Se os erros de forma estiverem dentro das tolerâncias dimensionais, eles serão suficientemente pequenos para se obter a montagem e funcionamento adequados da peça, e como consequência, geralmente não há a necessidade de especificar tolerâncias de circularidade (SOUZA, 2013).

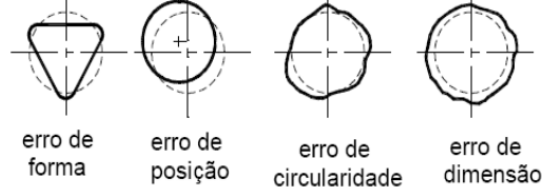
2.4 PROBLEMAS NA FURAÇÃO

A qualidade de um furo usinado, no que se refere aos erros de forma e medida, depende principalmente da afiação e da geometria de ponta da broca. As imperfeições mais comuns que ocorrem na geometria do furo durante o processo de furação são (VILLARROEL,1991):

- Erros de cilindricidade (forma): Diferença de raio entre dois cilindros concêntricos contidos na superfície do furo.
- Formação de rebarbas no furo: Dependente das condições de usinagem empregadas, tão quanto dos materiais da ferramenta e da peça.
- Erro de posicionamento do furo: Dependente da combinação máquina-ferramenta e da geometria de ponta da broca.
- Erros de circularidade: Assumem as mais diversas formas, tendo como fator crítico para essas imperfeições fatores como rigidez do sistema árvore, cone, ferramenta e peça.
- Erro de sobre medida (dimensão): Influenciado pela simetria entre os gumes da ferramenta e pela rigidez da ferramenta. Essa não simetria da broca é levada pela má fabricação da ferramenta ou por um erro no processo de afiação.

A Figura 6 ilustra as imperfeições que podem ser geradas no processo de furação.

Figura 6 – Erros geométricos no processo de furação



Fonte: Villarroel,1991.

2.5 TEMPO DE PROCESSO E CUSTOS

Segundo Ferraresi (1924) o ciclo de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de Z peças, é constituído diretamente pelas seguintes fases:

- Colocação e fixação da peça;
- Aproximação e posicionamento da ferramenta;
- Corte;
- Afastamento da ferramenta;
- Inspeção (se necessário) e retirada da peça.

Para um lote de Z peças, tem-se ainda inclusas as seguintes fases:

- Preparo da máquina;
- Remoção da ferramenta para a substituição;
- Recolocação e ajustagem da nova ferramenta

Em um lote de Z peças, o tempo total de usinagem (t_t) de uma peça, é dado pelo tempo gasto em todas as etapas:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{N_t}{Z} \cdot t_{ft} \quad (1)$$

Onde t_c tempo de corte, t_s tempo secundário, t_a tempo de aproximação e afastamento, t_p tempo de preparo da máquina, t_{ft} tempo de troca da ferramenta, e N_t é o número de trocas da ferramenta para a usinagem do lote, T é o tempo de vida da ferramenta (FERRARESI, 1924).

$$N_t = Z \cdot \frac{t_c}{T} - 1 \quad (2)$$

Para um determinado avanço e profundidade de corte do par ferramenta-peça, Taylor definiu a seguinte fórmula, relacionando a vida da ferramenta em função da

velocidade de corte, que pode ser expressa pela equação 3, onde k e x são constantes do material (DINIZ, 2006).

$$T = k \cdot v_c^{-x} \quad (3)$$

Segundo Diniz (2006), o custo total de fabricação de uma peça através do processo de usinagem é dado por:

$$K_p = C_1 + \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c}{T} \cdot C_3 \quad (4)$$

Onde C_1 é a constante de custo independente da velocidade de corte, expressa em R\$/peça, C_2 é a soma das despesas totais de mão-de-obra e salário máquina, em R\$/peça, e C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta, em reais.

2.6 AÇO SAE 4140

Os aços de baixa liga da família SAE 41XX são ligados ao Cromo (aproximadamente 1%) e ao molibdênio (aproximadamente 0,2%), obtêm-se alta resistência por meio de tratamentos térmicos de têmpera e revenido. Comumente são utilizados na obtenção de equipamentos que requerem tensão de limite de escoamento entre 410 MPa e 965 MPa, podendo atingir um limite de resistência à tração de até 1650 Mpa (ASM, Handbook, 1990).

O aço SAE 4140 ou aço-cromo-molibdênio como também é conhecido, pode conter os teores de carbono entre 0,3% a 0,5%, e assim, é classificado como aço de médio carbono. Pode ser utilizado em temperaturas de até 480 °C, sendo que em temperaturas superiores a esse valor, a sua resistência diminui rapidamente (ROCHA, 2004). A composição do aço SAE 4140 está representada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do Aço SAE 4140

| Elemento | Concentração (%) |
|------------|------------------|
| Cromo | 0,80 - 1,10 |
| Molibdênio | 0,15 - 0,25 |
| Manganês | 0,75 - 1,00 |
| Carbono | 0,38 - 0,43 |
| Silício | 0,15 - 0,30 |
| Enxofre | 0,04 (máx.) |
| Fósforo | 0,035 (máx.) |

Fonte: Autor Desconhecido, disponível em: < <http://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-4140-propriedades-mecanicas.html> >

Algumas das características deste material são a alta temperabilidade, baixa soldabilidade para os processos tradicionais, devido ao alto teor de carbono em sua composição, e usinabilidade razoável apenas na condição recozida (alívio de tensão). Além disso, apresenta boa resistência à torção e à fadiga, e a dureza na condição temperada varia de 54 a 59HRC (ROCHA, 2004). A Figura 7, mostra algumas propriedades do aço AISI 4140:

Figura 7 – Propriedades mecânicas do aço AISI 4140

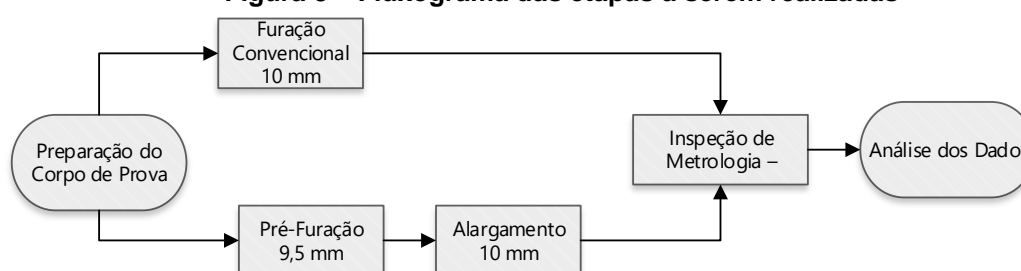
| Propriedades | | Condições | |
|------------------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| | | T(°C) | Tratamento |
| Densidade (10^3kg/m^3) | 7,7- 8,03 | 25 | |
| Coefficiente de Poisson | 0,27- 0,3 | 25 | |
| Módulo de Young (GPa) | 190 – 210 | 25 | |
| Resistência à tensão (MPa) | 655 | 25 | Normalizado a 870°C |
| Tensão de escoamento (MPa) | 417,1 | | |
| Alongamento (%) | 25,7 | | |
| Redução de área (%) | 56,9 | | |
| Dureza (HB) | 197 | 25 | Temperado a 815°C |
| Resistência a Impacto (J) | 54,5 | 25 | Temperado a 815°C |

Fonte: < <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/DISSERTA%C3%87%C3%83O-FINAL-5.pdf>>

3 METODOLOGIA

Nesta seção é descrita a metodologia utilizada para a realização dos ensaios de furação convencional e alargamento. Conforme ilustrado na Figura 8, o fluxograma apresenta as etapas realizadas no procedimento experimental. Inicialmente realizou-se a preparação do corpo de prova, e em seguida, a realização dos ensaios, ou seja, a furação convencional e o processo de alargamento. Sendo realizadas inspeções de metrologia ao fim de cada processo, e posteriormente, a análise dos dados obtidos.

Figura 8 – Fluxograma das etapas a serem realizadas

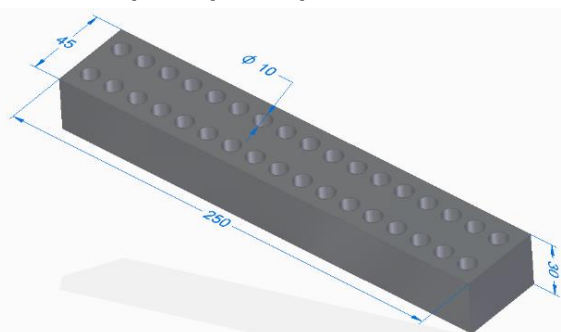


Fonte: Autoria própria.

3.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

Esta atividade teve a finalidade de atribuir as dimensões adequadas ao corpo de prova utilizado nos ensaios, de maneira a garantir uma adequada fixação na máquina durante os processos de furação, e posteriormente, no equipamento utilizado para medir os desvios de cilindricidade e circularidade. Foi realizado no corpo de prova o corte em serra fita e o esquadrejamento. O corpo de prova teve as dimensões conforme a Figura 9, sendo constituído de aço SAE 4140.

Figura 9 – Corpo de prova que utilizado nos ensaios



Fonte: Autoria própria.

3.2 PROCESSO DE USINAGEM

Após a preparação do corpo de prova, realizou-se os processos de furação convencional utilizando broca helicoidal 10 mm, a furação intermediária para o processo de alargamento com broca helicoidal de 9,5 mm, e a operação de alargamento, foram realizadas em fresadora marca Diplomat modelo FVF 2500, pertencente ao laboratório de usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava.

3.2.1.1 Processo de furação utilizando broca helicoidal

Foram realizados um total de 16 furos passantes no corpo de prova, utilizando uma broca helicoidal marca Dormer - DIN 338 forma N - constituída de aço rápido (HSS - M2) – perfil de tolerância H8 – ângulo de ponta de 118° e diâmetro nominal 10 mm. A furação foi realizada à seco, com parâmetros de corte fixos, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de corte – Furação Convencional

| Parâmetro de corte | |
|--------------------|-------------|
| n | 1000 RPM |
| f | 0,08 mm/rot |
| vf | 80 mm/min |

Fonte: Autoria própria.

3.2.1.2 Processo de alargamento

Analogamente ao processo anterior, foram realizados um total de 16 furos com comprimento de 30 mm, utilizando uma broca helicoidal marca Dormer - DIN 338 forma N - constituída de aço rápido (HSS - M2) – perfil de tolerância H8 – ângulo de ponta de 118° e diâmetro nominal 9,5 mm. A furação foi realizada à seco, com os parâmetros de corte apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de corte

| Parâmetros de Corte | Furação Intermediária | Alargamento |
|---------------------|-----------------------|-------------|
| n | 1000 RPM | 1500 RPM |
| f | 0,08 mm/rot | 0,16 mm/rot |
| vf | 80 mm/min | 160 mm/min |

Fonte: Autoria própria.

Posteriormente foi realizado a operação de alargamento dos furos intermediários, através de um alargador máquina marca Dormer – norma DIN 212B – perfil de tolerância h7 e diâmetro nominal de 10 mm. O alargamento foi realizado à seco, utilizando os parâmetros de corte indicados pelo fabricante, apresentados na Tabela 3.

3.3 ANALISE DO DESGASTE DE FLANCO

O desgaste de flanco da ferramenta foi medido a cada ciclo de 4 furos através um microscópio estereoscópio marca Zeiss, modelo Stemi 200C. Este microscópio enviava as imagens para o computador a partir de uma câmera digital Canon modelo Power Shot G 6 montada no referido microscópio. A imagem do desgaste foi adquirida por um software, Zoom Browser Ex 6.1.1, que permitia a medição do desgaste e seu armazenamento em arquivo digital através do software Axio Vision Le.

3.4 INSPEÇÃO DOS FUROS

Após os processos de furação o corpo de prova foi levado até a máquina de medir por coordenadas marca Mitutoyo modelo Crysta Apex S 574, pertencente ao laboratório de metrologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava. Em cada furo foram realizadas cinco medições em relação ao diâmetro, e posteriormente obtida a média desses diâmetros e o desvio padrão. Após a verificação do diâmetro real, deu-se início ao estudo sobre a circularidade, para tal, definiu-se pontos internos no furo 1, furo 8 e furo 16 realizado por cada processo, especificou-se uma tolerância geométrica na máquina, que para esse caso foi IT11, e assim foi medido esse desvio, onde a máquina retornou imagens que estão apresentadas na seção de resultados. Já o desvio de cilindridade foi medido em função do processo realizado, a medição se deu através da obtenção de pontos igualmente divididos entre entrada e saída de cada furo.

3.5 ANÁLISES FINAIS

Os resultados obtidos foram divididos e tabelados de acordo com cada processo, foram realizadas análises separadamente em relação aos desvios de forma, tanto para o processo de furação convencional quanto para a operação de alargamento, e por fim, de acordo com os dados obtidos, foi realizado um comparativo entre ambos, com o intuito de definir qual é o processo tem uma maior precisão geométrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

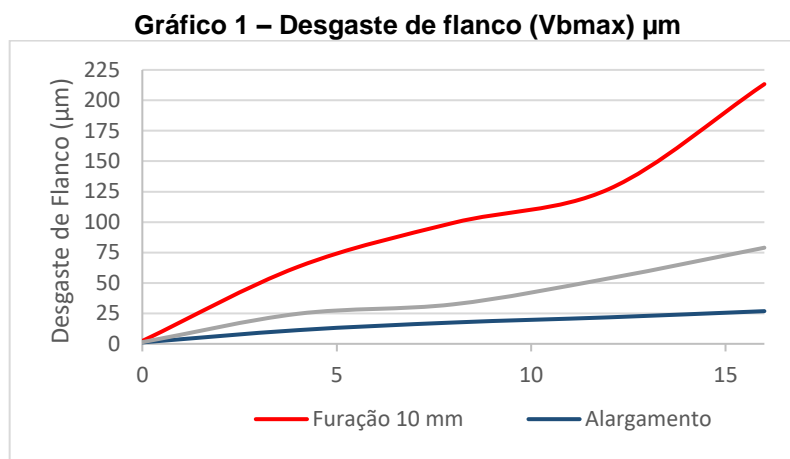
4.1 DESGASTE DE FLANCO

Na Tabela 4 apresentam-se as medições do desgaste de flanco máximo ($V_{Bm\acute{a}x}$) da broca com diâmetro de 10 mm e do alargador, utilizando velocidade de corte de $V_c = 31,4$ m/min, avanço de $f = 0,08$ mm/volta, e $V_c = 47,1$ m/min, $f = 0,16$ mm/volta, respectivamente, essa análise foi realizada em função do número do furo, ou seja, após a realização do furo 0, 4, 8, 12 e 16, conforme apresentado na Tabela 4.

| Desgaste de Flanco Máximo (μm) | | | | | |
|---|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Furos | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 |
| Broca 10 mm | 2,34 | 63,18 | 99,35 | 127,12 | 213,32 |
| Broca 9,5 mm | 1,38 | 24,67 | 32,45 | 53,76 | 78,94 |
| Alargador 10 mm | 1,2 | 11,23 | 17,51 | 21,76 | 26,83 |
| Pré-Furo + Alargamento | 2,58 | 35,9 | 49,96 | 75,52 | 105,77 |

Fonte: Autoria própria

Para um melhor entendimento dos resultados, os mesmos são apresentados no Gráfico 1. Nota-se que o desgaste de flanco na broca é muito mais elevado do que no alargador. Isso pode ser explicado pelo fato do número de arestas de corte no alargador ser maior, usinando com menor esforço distribuído em seus gumes de corte. Por exemplo, Lobo (2015) quando realizou um estudo comparativo do comportamento entre brocas alargadoras e processo de alargamento na usinagem do ferro fundido cinzento GG30, concluiu que quanto maior a quantidade de canais das ferramentas, menor o esforço aplicado sobre cada gume, contribuindo com o aumento da vida útil, preservando-as dos mecanismos de desgaste e eventuais lascamentos. Uma possível explicação, é que como a força de corte nos gumes da broca são maiores, há uma maior geração de energia (calor) nas mesmas. Castillo (2005) quando estudou o desgaste de flanco máximo em função da velocidade de corte de quatro brocas de um mesmo material e com geometrias diferentes, afirmou que os melhores resultados de desgaste foram constatados onde os efeitos da temperatura são menos significativos, proporcionando um maior tempo de vida para as ferramentas. Nota-se assim que a temperatura gerada no processo pode ser um fator determinante em relação ao desgaste de flanco.



Fonte: Autoria própria.

Para uma comparação mais próxima à realidade, optou-se por somar o processo de pré-furação com o alargamento e assim manter o volume de material igual a furação em cheio com broca de 10 mm. Desta forma os resultados podem ser comparados com uma proximidade mais realista, sendo que o desgaste para o processo de pré-furo somado ao alargamento foi menor que se que para furação em cheio, pelos motivos já descritos anteriormente.

4.2 DESVIO DE DIÂMETRO EM FUNÇÃO DO PROCESSO

A variação dimensional do furo foi outra variável observada durante o processo, as tabelas que serão apresentadas nessa seção, relacionam a medida real obtida em função do processo de furação convencional e do alargamento, sendo esses dados apresentados em milímetros.

4.2.1 Furação Convencional com broca de 10 mm

Os resultados das medições obtidas nesse processo, estão apresentados na Tabela 5 e posteriormente no Gráfico 2.

Tabela 5 – Diâmetro real em função do processo de furação com broca 10 mm

| 10 mm | Furo 1 | Furo 2 | Furo 3 | Furo 4 | Furo 5 | Furo 6 | Furo 7 | Furo 8 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 10,164 | 10,146 | 10,172 | 10,180 | 10,165 | 10,165 | 10,184 | 10,200 |
| 2 | 10,147 | 10,166 | 10,166 | 10,176 | 10,174 | 10,158 | 10,176 | 10,192 |
| 3 | 10,121 | 10,171 | 10,142 | 10,184 | 10,178 | 10,168 | 10,151 | 10,203 |

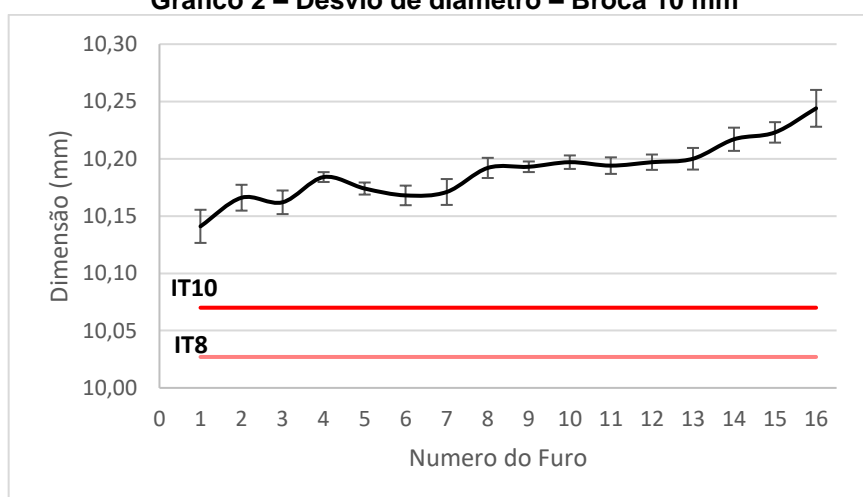
| | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4 | 10,141 | 10,166 | 10,162 | 10,186 | 10,167 | 10,184 | 10,163 | 10,183 |
| 5 | 10,132 | 10,144 | 10,155 | 10,188 | 10,177 | 10,171 | 10,171 | 10,181 |
| Média | 10,141 | 10,166 | 10,162 | 10,184 | 10,174 | 10,168 | 10,171 | 10,192 |
| Desvio Padrão | 0,014464 | 0,011271 | 0,010307 | 0,004308 | 0,005269 | 0,008565 | 0,011296 | 0,008795 |

| 10 mm | Furo 9 | Furo 10 | Furo 11 | Furo 12 | Furo 13 | Furo 14 | Furo 15 | Furo 16 |
|----------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 10,191 | 10,198 | 10,194 | 10,197 | 10,193 | 10,218 | 10,223 | 10,242 |
| 2 | 10,183 | 10,197 | 10,190 | 10,193 | 10,190 | 10,217 | 10,217 | 10,266 |
| 3 | 10,196 | 10,199 | 10,195 | 10,209 | 10,203 | 10,202 | 10,224 | 10,226 |
| 4 | 10,195 | 10,189 | 10,202 | 10,194 | 10,217 | 10,234 | 10,237 | 10,269 |
| 5 | 10,193 | 10,184 | 10,180 | 10,207 | 10,200 | 10,217 | 10,210 | 10,244 |
| Média | 10,193 | 10,197 | 10,194 | 10,197 | 10,200 | 10,217 | 10,223 | 10,244 |
| Desvio Padrão | 0,00463 | 0,005886 | 0,007222 | 0,006693 | 0,009436 | 0,010131 | 0,008931 | 0,01607 |

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que há um aumento no diâmetro dos furos à medida que o processo vai sendo realizado, uma possível explicação é o desgaste da ferramenta no decorrer do processo, que conseqüentemente acaba gerando alterações na afiação da ferramenta, e com isso há um aumento de alguns esforços, como a força de avanço e o momento torçor, e isso pode ocasionar maiores vibrações, podendo ocorrer perturbações a instabilidade do processo, onde ferramentas ou porta-ferramentas desbalanceados, em altas velocidades, fazem com que o eixo de rotação do conjunto varie, provocando defeito nos furos.

Gráfico 2 – Desvio de diâmetro – Broca 10 mm



Fonte: Autoria própria.

Segundo Ferraresi (1924), o estado de afiação numa ferramenta exerce notável influência sobre os esforços de usinagem, podendo alcançar valores 25% maiores

para um desgaste da ferramenta dentro da faixa admissível de desgaste. Já Castillo (2005) em seu estudo sobre furação profunda em ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos, concluiu que com o aumento do avanço, o diâmetro do furo aumenta. Esta variação dimensional pode acarretar em uma faixa de tolerância fora da especificada pela ferramenta entre IT8 e IT10 com uma variação em furação de 0,027 e 0,07 mm. Mesmo utilizando uma ferramenta nova nos ensaios, não se obteve furos dentro da tolerância IT8 indicada pela ferramenta.

4.2.2 PROCESSO DE ALARGAMENTO

Esse processo é constituído por duas etapas, a realização do pré-furo com a broca de 9,5 mm, e posteriormente a realização do alargamento até a obtenção do furo de 10 mm de diâmetro. Os resultados obtidos no processo da furação intermediária estão dispostos na Tabela 6 e no Gráfico 3 a seguir.

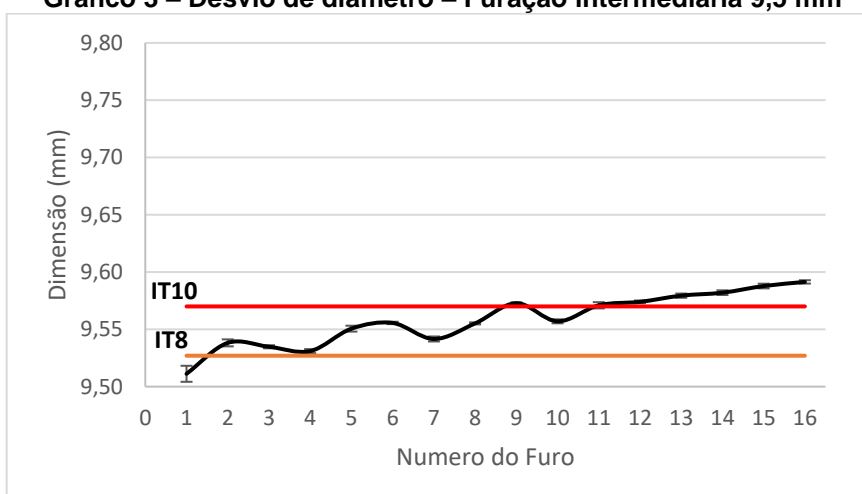
Tabela 6 – Diâmetro real em função do processo de furação com broca 9,5 mm

| 9,5 mm | Furo 1 | Furo 2 | Furo 3 | Furo 4 | Furo 5 | Furo 6 | Furo 7 | Furo 8 |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 9,515 | 9,553 | 9,536 | 9,523 | 9,554 | 9,556 | 9,546 | 9,54 |
| 2 | 9,502 | 9,528 | 9,53 | 9,538 | 9,555 | 9,556 | 9,535 | 9,559 |
| 3 | 9,514 | 9,536 | 9,539 | 9,524 | 9,542 | 9,553 | 9,546 | 9,564 |
| 4 | 9,511 | 9,542 | 9,534 | 9,532 | 9,552 | 9,55 | 9,549 | 9,563 |
| 5 | 9,514 | 9,532 | 9,535 | 9,538 | 9,55 | 9,563 | 9,532 | 9,55 |
| Média | 9,5112 | 9,5382 | 9,5348 | 9,531 | 9,5506 | 9,5556 | 9,5416 | 9,5552 |
| Desvio Padrão | 0,004792 | 0,008727 | 0,002926 | 0,006512 | 0,00463 | 0,004317 | 0,006771 | 0,009064 |

| 9,5 mm | Furo 9 | Furo 10 | Furo 11 | Furo 12 | Furo 13 | Furo 14 | Furo 15 | Furo 16 |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 9,576 | 9,569 | 9,572 | 9,574 | 9,579 | 9,583 | 9,587 | 9,592 |
| 2 | 9,559 | 9,551 | 9,568 | 9,573 | 9,578 | 9,58 | 9,586 | 9,591 |
| 3 | 9,576 | 9,562 | 9,572 | 9,57 | 9,58 | 9,581 | 9,588 | 9,594 |
| 4 | 9,584 | 9,543 | 9,573 | 9,578 | 9,579 | 9,582 | 9,588 | 9,59 |
| 5 | 9,569 | 9,56 | 9,57 | 9,575 | 9,581 | 9,584 | 9,59 | 9,59 |
| Média | 9,5728 | 9,557 | 9,571 | 9,574 | 9,5794 | 9,582 | 9,5878 | 9,5914 |
| Desvio Padrão | 0,008376 | 0,009055 | 0,001789 | 0,002608 | 0,00102 | 0,001414 | 0,001327 | 0,001497 |

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que à medida que o processo vai sendo realizado os valores dos diâmetros aumentam, e uma possível explicação para esse fato é que a ferramenta vai se desgastando ao longo do processo. Percebe-se também que a maioria dos furos estiveram dentro da faixa de tolerância especificada.

Gráfico 3 – Desvio de diâmetro – Furação intermediária 9,5 mm

Fonte: Autoria própria.

Ao comparar os resultados obtidos utilizando a broca de 10 mm, nos dois processos há um aumento em relação ao diâmetro dos furos à medida que o processo vai sendo realizado, no entanto nenhum furo realizado no processo anterior ficou dentro da faixa de tolerância especificada. Outro ponto que deve ser levado em consideração é a menor dispersão dos dados de medição, os valores de desvio padrão foram menores, podendo estar correlacionada a uma menor força exigida no processo de corte, já que segundo Ferraresi (1924) a força de corte por gume é dada por:

$$F_c = K_c * \frac{fd}{4} \quad (5)$$

Onde d é o diâmetro da broca, assim, podemos notar que a força de corte por gume, é proporcional ao valor do diâmetro da broca, podendo afirmar que quanto maior for o diâmetro, maior será a força de corte realizada no processo.

Os resultados obtidos no processo de alargamento estão dispostos na Tabela 7 a seguir e no Gráfico 4.

Tabela 7 – Diâmetro real em função do processo alargamento

| 10 mm – alargador | Furo 1 | Furo 2 | Furo 3 | Furo 4 | Furo 5 | Furo 6 | Furo 7 | Furo 8 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 10,02 | 10,032 | 10,039 | 10,042 | 10,049 | 10,048 | 10,051 | 10,05 |
| 2 | 10,032 | 10,035 | 10,038 | 10,046 | 10,046 | 10,047 | 10,047 | 10,051 |
| 3 | 10,034 | 10,037 | 10,038 | 10,046 | 10,046 | 10,048 | 10,051 | 10,052 |
| 4 | 10,04 | 10,032 | 10,041 | 10,047 | 10,042 | 10,049 | 10,053 | 10,05 |

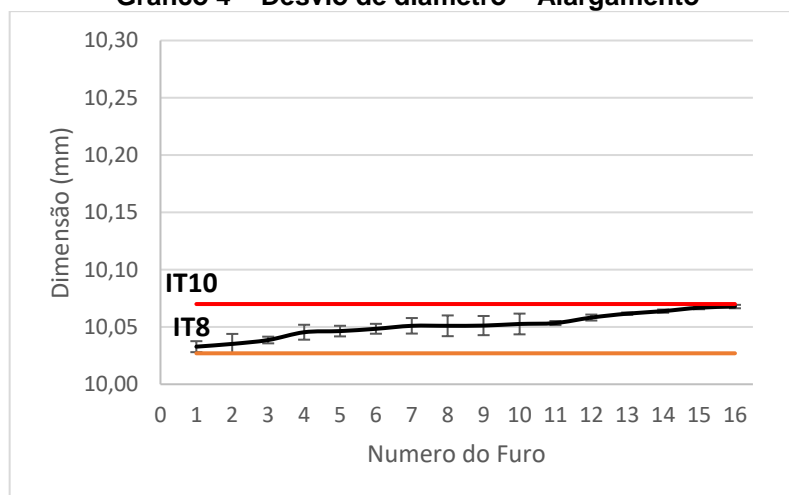
| | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 5 | 10,038 | 10,04 | 10,037 | 10,046 | 10,049 | 10,05 | 10,053 | 10,052 |
| Média | 10,0328 | 10,0352 | 10,0386 | 10,0454 | 10,0464 | 10,0484 | 10,051 | 10,051 |
| Desvio Padrão | 0,006997 | 0,003059 | 0,001356 | 0,001744 | 0,002577 | 0,00102 | 0,002191 | 0,000894 |

| 10 mm – alargador | Furo 9 | Furo 10 | Furo 11 | Furo 12 | Furo 13 | Furo 14 | Furo 15 | Furo 16 |
|--------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 10,052 | 10,054 | 10,056 | 10,059 | 10,062 | 10,061 | 10,063 | 10,065 |
| 2 | 10,051 | 10,052 | 10,051 | 10,057 | 10,06 | 10,063 | 10,069 | 10,069 |
| 3 | 10,05 | 10,05 | 10,057 | 10,058 | 10,059 | 10,067 | 10,068 | 10,068 |
| 4 | 10,052 | 10,052 | 10,05 | 10,06 | 10,064 | 10,063 | 10,067 | 10,068 |
| 5 | 10,051 | 10,055 | 10,053 | 10,057 | 10,063 | 10,065 | 10,067 | 10,069 |
| Média | 10,0512 | 10,0526 | 10,0534 | 10,0582 | 10,0616 | 10,0638 | 10,0668 | 10,0678 |
| Desvio Padrão | 0,000748 | 0,001744 | 0,002728 | 0,001166 | 0,001855 | 0,00204 | 0,00204 | 0,00147 |

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que no decorrer da operação de alargamento ocorre um aumento da média dos diâmetros dos furos, mas relativamente menor se comparado com a furação convencional com broca helicoidal, obtendo-se assim, um valor muito próximo do valor nominal, atendendo integralmente aos requisitos de tolerância IT10. Bezerra (2001) em seu artigo, mostra que com o aumento do número de arestas de corte a precisão do diâmetro e o acabamento superficial do furo melhoram, pois há uma redução do avanço por aresta de corte (para a mesma velocidade de avanço) e o aumento da quantidade de guias, o que aumenta o efeito de alisamento na parede do furo. Este efeito neutraliza o aumento de vibrações gerados pelas múltiplas arestas de corte, mesmo não sendo simétricas. Explicando assim o motivo desse processo obter furos mais precisos em relação a furação convencional.

Gráfico 4 – Desvio de diâmetro – Alargamento



Fonte: Autoria própria.

4.3 DESVIO DE CIRCULARIDADE

Na Tabela 8 e no Quadro 1, encontra-se os dados coletados, e as imagens referentes ao desvio de circularidade. Nas imagens, o círculo amarelo refere-se à circularidade teórica da ferramenta, sendo o diâmetro de 10 mm nominal, a área em verde refere-se a tolerância geométrica da máquina, na ordem de IT11 (intervalo de tolerância geométrica de $\pm 0,150$ mm), e os pontos a medida real da circularidade do furo.

Tabela 8 – Desvio de circularidade em função do processo

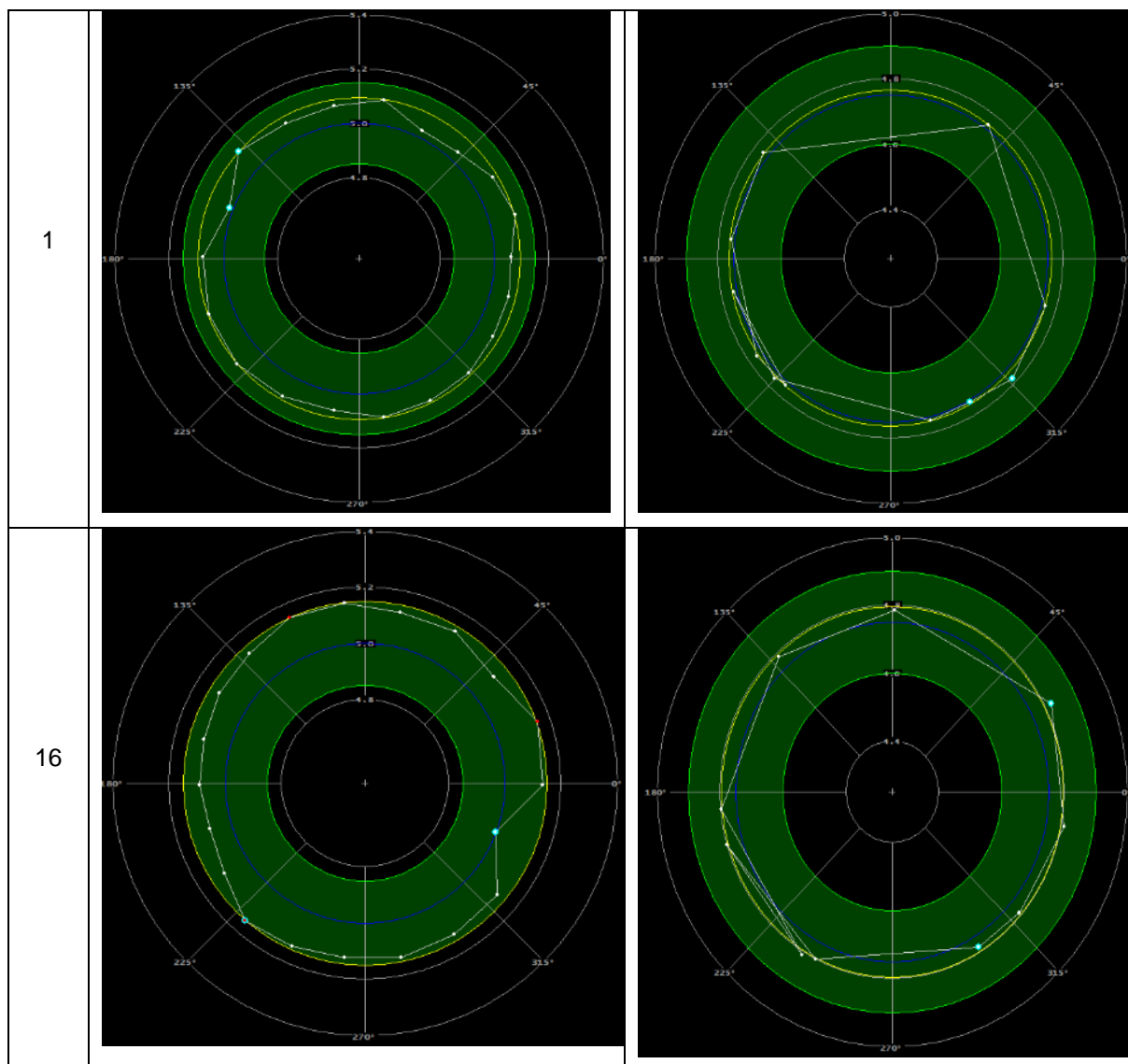
| Processo | Furo 1 | Furo 8 | Furo 16 |
|-------------|--------|--------|---------|
| Broca 10 mm | 0,046 | 0,081 | 0,156 |
| Alargamento | 0,030 | 0,038 | 0,055 |

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os desvios de circularidade são maiores nos furos obtidos por meio da furação convencional do que no alargamento, uma possível explicação para esse fato pode estar relacionada ao desgaste da ferramenta. Segundo Micheletti (1980), o desgaste da ferramenta é o maior responsável pela dispersão nos valores de circularidade do furo. Gumes afiados numa broca garantem uma estabilidade na tolerância de circularidade do furo. E como o desgaste na broca foi significativamente maior do que no alargador, isso explica o fato do desvio de circularidade ter sido maior no processo de furação convencional. Analisando os furos obtidos com o processo de furação com a broca, o furo 1, furo 8 e furo 16, apresentaram tolerâncias geométricas da ordem IT10, IT11, e IT12, respectivamente. Já com o processo de alargamento, o furo 1 apresentou uma tolerância geométrica da ordem IT9, o furo 8 e 16 uma tolerância da ordem IT10.

Quadro 1 – Desvio de circularidade - Furo 1, 8 e 16 de cada processo

| Furo | Broca 10 mm | Alargamento – Broca 15 mm |
|------|-------------|---------------------------|
| o | | |



Fonte: Autoria própria

4.4 DESVIO DE CILINDRICIDADE

Na Tabela 9 estão dispostos os resultados do desvio de cilindridade nos furos 1, 8 e 16 de cada processo.

Tabela 9 – Desvio de cilindridade em milímetros

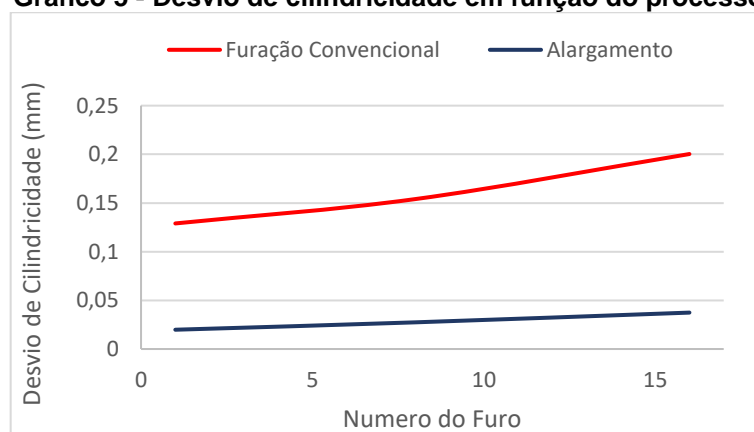
| | Furação Convencional | | | Alargamento | | |
|--------------|----------------------|--------|---------|-------------|--------|---------|
| | Furo 1 | Furo 8 | Furo 16 | Furo 1 | Furo 8 | Furo 16 |
| 10 mm | | | | | | |
| 1 | 0,1286 | 0,153 | 0,1994 | 0,0256 | 0,0298 | 0,032 |
| 2 | 0,1385 | 0,154 | 0,2003 | 0,103 | 0,0274 | 0,0345 |
| 3 | 0,1223 | 0,168 | 0,2012 | 0,0198 | 0,0265 | 0,0389 |
| 4 | 0,1467 | 0,166 | 0,2005 | 0,0106 | 0,0273 | 0,042 |
| 5 | 0,129 | 0,149 | 0,1985 | 0,0193 | 0,0283 | 0,0374 |
| Média | 0,129 | 0,154 | 0,2003 | 0,0198 | 0,0274 | 0,0374 |

| | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Desvio | 0,008577 | 0,007563 | 0,000937 | 0,034009 | 0,001125 | 0,003464 |
| Padrão | | | | | | |

Fonte: Autoria própria.

Conforme os resultados obtidos, os melhores valores de cilindridade foram verificados para o processo de alargamento. Há um aumento desse desvio no decorrer do processo, e os furos obtidos com a furação utilizando a broca convencional apresentam um desvio significativamente maior. Como mencionado anteriormente, uma possível explicação para esse fato pode estar relacionada com os maiores esforços gerados durante a usinagem, segundo Coldwell (2004), em furação os altos esforços na furação estão relacionados com os altos valores de cilindridade, indicando problemas na evacuação dos cavacos, contribuindo a deformações, além de maiores vibrações ou desbalanceamento da máquina-ferramenta. Tais esforços repercutem negativamente nas tolerâncias de cilindridade do furo. O Gráfico ilustra de forma mais clara esses dados.

Gráfico 5 - Desvio de cilindridade em função do processo



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados durante o desenvolvimento deste trabalho, pode-se concluir que:

Atingiu-se os objetivos propostos inicialmente, obtendo-se um comparativo entre o processo de alargamento de furos e a operação de furação convencional utilizando broca helicoidal em aço SAE 4140 com relação à precisão geométrica.

Em relação ao desgaste das ferramentas, a broca utilizada no processo de furação convencional sofreu um desgaste significativamente maior do que o alargador, isso se explica pelo fato do alargador possuir um maior número de arestas de corte, usinando com menor esforço distribuído em seus gumes.

Se tratando dos desvios estudados durante este trabalho, o processo de alargamento foi o que gerou melhores resultados, tanto no desvio de circularidade, cilindricidade, quanto no diâmetro real, apresentando furos com uma dimensão bem próxima da nominal, com um conjunto de dados mais homogêneos, e com qualidades de trabalho da ordem IT9 e IT10, já com a furação convencional, obteve-se furos com qualidades de trabalho IT10, IT11 e IT12.

Como ambos os processos foram executados sob as mesmas condições, pode-se concluir que o fato dos desvios de cilindricidade e circularidade terem sido maiores no processo de furação convencional, se explica pelo desgaste de flanco na broca ser significativamente maior, ocorrendo uma rápida deterioração dos seus gumes em comparação com os gumes do alargador, perdendo rapidamente a sua afiação à medida que o processo vai sendo realizado, e conseqüentemente é gerado maiores esforços de usinagem, que acabam contribuindo para maiores vibrações, deformações, desbalanceamento da máquina-ferramenta, e com isso interferindo na tolerância.

Tais resultados mostram que o com o processo de alargamento obtém-se furos com maiores precisões geométricas se comparado com o processo de furação convencional. Sendo que a escolha entre um deles, vai depender muito da aplicação, onde o que vai definir é o quanto de precisão será exigida pelo processo.

6 REFERÊNCIAS

DINIZ, et al. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3° ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006

STEMMER, E.G. **Ferramentas de Corte II**. 4. ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 314 p., 2008

VILLARROEL, J. C. **Análise Comparativa entre Furação com Brocas para Furos Curtos de Insertos Reversíveis e Brocas Helicoidais**. Dissertação, UFSC, Florianópolis, 112 p, 1991

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blücher, 1924

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. ampl. e rev. São Paulo: ABM, 2012.

DIN 8589-2: **Fertigungsverfahren SpanenTeil 2: Bohren - Einordnung, Unterteilung, Begriffe**. Berlin, Alemanha: BeuthVerlagGmbH, 12p, 2003.

GROOVER, M. P. **Automation, production systems and computerintegrad manufacturing**. Prentice-Hall, Upper Sadle River, 2007.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

SOUZA, R. F. **Metrologia II, ETEc Rubens de Faria e Souza**, 2013.

SCHROETER, R. B. et al. **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável**. 1989. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

SOUZA, C. S., ARENCIBIA, R. V e SATO, P. V. **Cálculo da incerteza nas medições de circularidade e de cilindridade com máquina de medir por coordenadas: Um modelo simplificado**, 2011.

NBR ISO 6405/1988 – **Rugosidade das superfícies**.

ABNT NBR 6179/1986 – **Chumbo Refinado.**

ALBERTAZZI, A. G. Jr., e DE SOUZA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**, 2008

BAZZO, A. W. e PEREIRA, L. T. **Introdução à Engenharia – Conceitos, Ferramentas e Comportamento**, ed. UFSC, 2006.

ASM, Handbook. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials**, vol. 2 1990.

ROCHA, A. **Determinação de um modelo de força de usinagem para a furação, a partir do modelo de força de usinagem do torneamento.** 1985. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1985.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da Usinagem com Ferramenta de Corte de Geometria Definida** - Parte I. Traduzido por Prof. Dr. Ing. Walter Lindolfo Weingaertner e Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, do livro "Fertigungsverfahren - Drehen, Bohren, Fräsen". Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2002.

CASTILLO, W. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais retos.** 2005. . Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

LOBO, L. **Estudo comparativo do comportamento entre brocas alargadoras e processo de alargamento na usinagem do ferro fundido cinzento GG30.** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Curitiba, 2015.

MICHELETTI, G. F. **Mecanizado por arranque de viruta.** 2ª edição, Barcelona: Editorial Blume, 1980, 426 p.

SANTOS, R. G., **Avaliação do processo de alargamento de guias de válvulas.** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná – Curitiba 2004.

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

STOCKLER J., MARCO F. Tolerâncias Geométricas – DEM/UFRJ Disponível em:

<<http://www.mecanica>

ufrj.educacao.ws/util/b2evolution/media/blogs/flavio/Cap8_Tolerancias_Geometricas_2016-1.pdf> Acessado 03/12/2018, às 20:30 horas.