

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM SOBRE O ACABAMENTO DOS FUROS  
GERADOS NO AÇO HARDOX® 450

por

Matheus Santos Valmorbida

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2018

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM SOBRE O ACABAMENTO DOS FUROS  
GERADOS NO AÇO HARDOX®450

por

Matheus Santos Valmorbida

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: M. Eng. Andressa Caroline da Silva Carvalho

Comissão de Avaliação:

Prof. André João de Souza

Prof. Darci Barnech Campani

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 15 de junho de 2018.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marisa dos Santos Valmorbida e Lindomar Mascarello Valmorbida, por todos sacrifícios em prol da minha educação, por todos os valores e pelo apoio incondicional em todos os momentos.

À minha namorada, Thayná de Almeida, pela compreensão e incentivo incansavelmente depositados.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF-UFRGS), pelos quatro anos de muito aprendizado, por todas as oportunidades recebidas, pelo crescimento profissional, pelos amigos que fiz e pelo corte por jato d'água da placa a partir da chapa disponível.

Ao professor André João de Souza, pela grande disponibilidade para as discussões, pelo zelo com os detalhes e pela orientação deste trabalho.

À mestre Andressa Caroline da Silva Carvalho, pela coorientação.

Ao técnico Guilherme Vargas Schirmer, pelo apoio na realização do trabalho.

À SSAB SC, pela doação da chapa de aço HARDOX®450.

À Secta Tools, pela doação das brocas utilizadas.

Ao Laboratório de Automação e Usinagem (LAUS-UFRGS), pela disponibilidade dos equipamentos necessários à realização do experimento.

VALMORBIDA, M. S. **Influência dos parâmetros de usinagem sobre o acabamento dos furos gerados no aço Hardox®450**. 2018. 21 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **RESUMO**

O Hardox®450 é um aço estrutural laminado e temperado, com alto teor de manganês (o que induz ao encruamento), com alta dureza (450 HB), alta resistência mecânica (1200 N/mm<sup>2</sup>), projetado para resistir ao desgaste por abrasão, trincas e quebras. Devido a suas excelentes propriedades, tem-se um aumento da vida útil de equipamentos como britadores, caçambas, engrenagens etc. Entretanto, tais propriedades mecânicas conduzem o material a uma baixa usinabilidade. Assim, propõe-se realizar uma investigação do processo de furação de uma chapa de Hardox® 450 com 3,5 mm de espessura. Os fatores de entrada considerados em dois níveis foram geometria da broca, velocidade de corte e avanço. O projeto de experimento Fatorial 2<sup>k</sup> foi aplicado visando explorar o desempenho destes fatores com base no acabamento dos furos gerados (desvios dimensionais e geométricos). Com relação ao menor erro dimensional, a combinação da broca com canais retos utilizando altos níveis de velocidade de corte e avanço apresentou os melhores resultados. Por outro lado, a combinação da broca com canais helicoidais utilizando baixos níveis de velocidade de corte e avanço apresentou o menor erro de circularidade. Isso mostra a dificuldade em se obter uma única combinação perfeita de parâmetros, dado o fato de que a primeira combinação (ideal para baixos desvios dimensionais) é totalmente oposta à segunda (ideal para baixos desvios geométricos).

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço Hardox®450; furação; acabamento do furo; Projeto Fatorial 2<sup>k</sup>.

VALMORBIDA, M. S. **Influence of drilling parameters on the quality of the holes produced in the Hardox®450 steel**. 2018. 21 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **ABSTRACT**

Hardox®450 is a hardened and tempered structural steel, with high manganese concentration (its induce the work hardening), with high hardness (450 HB), high mechanical strength (1200 N/mm<sup>2</sup>), and designed to withstand abrasion, cracking and breakage. Due to its excellent properties, it increases the useful life of equipment such as stone crushers, buckets, gears, etc. However, such mechanical properties of material lead to low machinability. Therefore, an investigation of drilling process of Hardox®450 sheet with 3.5 mm thickness is proposed. The considered input factors were drill geometry, cutting speed and feed rate. The 2<sup>k</sup> factorial design of experiment was applied to explore the performance of these factors based on the finishing holes after drilling (dimensional and geometric deviations). According to low dimensional error, the combination with straight-flute drill, high cutting speed and high feed rate generated the best result. Instead, the arrangement with helical drill, low cutting speed and low feed rate produced the lower circularity error. This shows the difficulty in obtaining a single perfect combination of parameters, considering the fact that the first combination (ideal for low dimensional deviation) is totally opposite to the second (ideal for low geometric deviation).

**KEYWORDS:** Hardox®450 steel; drilling; finishing hole; 2<sup>k</sup> factorial design.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVO.....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
3.1	Processo de Furação .....	2
3.2	Ferramentas de Corte (Brocas).....	3
3.3	Desvios Dimensionais e Geométricos.....	4
3.4	Projeto de Experimento Fatorial $2^k$ .....	4
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	5
4.1	Materiais .....	5
4.2	Equipamentos.....	6
4.3	Procedimento Experimental .....	6
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	8
5.1	Desvios Dimensionais.....	10
5.1.1	Análise de Variância (ANOVA).....	10
5.1.2	Efeitos Principais .....	10
5.1.3	Interações Entre os Fatores.....	11
5.2	Desvios Geométricos.....	12
5.2.1	Análise de Variância (ANOVA).....	12
5.2.2	Efeitos Principais .....	12
5.2.3	Interações Entre os Fatores.....	13
6	CONCLUSÕES .....	14
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

## 1 INTRODUÇÃO

Com peculiar combinação de dureza e tenacidade, a chapa resistente ao desgaste Hardox® define os padrões do aço de alta resistência à abrasão. Ambientes agressivos com intenso desgaste e aplicações abrasivas são os fatores chave para sua melhor utilização. A dureza minimiza o desgaste, uma vez que as bordas do material abrasivo encontram dificuldade para penetrar e cortar a superfície dura. A extrema tenacidade permite ao Hardox® resistir a choques sem quebras ou deformações. Por meio de suas propriedades singulares, a família Hardox® abre novas possibilidades para a inovação de projetos estruturais, ampliando a capacidade de vida útil de componentes em aplicações extremas [SSAB, 2014a].

O Hardox®450 é um aço laminado e temperado com alto teor de manganês. É projetado para resistir ao desgaste por abrasão, trincas e quebras, com alta dureza (450 HB  $\cong$  48 HRC) e alta resistência mecânica ( $\sigma_r = 1400 \text{ N/mm}^2$ ). Devido às suas excelentes propriedades, ele aumenta a vida útil de equipamentos como britadores, peneiras, alimentadores, moegas de medição, cubas, assentos de mancal em eixos, bordas cortantes, transportadores, caçambas, facas, engrenagens, rodas dentadas etc. [SSAB, 2014a].

De acordo com Machado et al., 2015, o manganês induz o encruamento do material usinado e o surgimento de aresta postiça de corte na ferramenta.

Para que as excelentes propriedades do Hardox®450 sejam adequadamente implantadas em componentes e estruturas, os processos de fabricação têm principal importância para alcançar as aplicações desejadas. Dentro da infinidade de possibilidades que a usinagem agrega em processos de fabricação, o procedimento de furação por brocas é um dos métodos mais comumente utilizados. Este traz soluções em posicionamento ou montagem de conjuntos e fixação de componentes [Castillo, 2005].

A qualidade dos furos gerados pela furação com brocas é diretamente dependente dos parâmetros de corte aplicados ao processo. Fatores como velocidade de corte e avanço devem ser aplicados de maneira controlada visando melhores resultados dimensionais e/ou de acabamento. Estes parâmetros dependem diretamente de informações como geometria e material da broca, material a ser usinado e capacidade de máquina [Sória et al., 2016].

Os canais para o escoamento/saída do cavaco e a afiação da ponta têm influência direta sobre o processo de furação e classifica o tipo de broca.

As brocas mais utilizadas na indústria são as com canais helicoidais, ferramentas projetadas para furação em cheio e para peças com pré-furos. Propiciam melhor remoção de cavaco e possuem capacidade de auto centragem [Boeira, 2010].

As brocas com canais retos caracterizam-se por apresentar uma boa resistência à torção [Castillo, 2005] e geram menor rugosidade na parede do furo [Sória et al., 2016].

Sória et al., 2016, verificaram também que a variação da amplitude dos esforços cortantes influencia diretamente nos desvios de circularidade dos furos, mostrando que a redução da vibração durante a operação de corte propicia uma melhoria significativa nesta usinagem.

É interessante analisar a qualidade final da aplicação em relação aos parâmetros de entrada designados, pois com resultados satisfatórios, uma operação posterior de acabamento pode ser eliminada. Considerando metodologias de projeto de experimento, o método Fatorial  $2^k$  apresenta possibilidades no que tange a análise da significância de fatores de entrada associados aos resultados obtidos, desde a relevância de um parâmetro em detrimento dos demais até a interação entre os fatores, considerando para estes fins a aplicação dos fatores em dois níveis cada, tipicamente um nível “alto” e outro nível “baixo”.

## 2 OBJETIVO

Investigar a influência dos parâmetros de entrada (geometria da broca, velocidade de corte e avanço) sobre o acabamento dos furos gerados em uma chapa de aço Hardox®450 com 3,5 mm de espessura através do método Fatorial  $2^k$  (análise da significância dos parâmetros de entrada em função dos desvios dimensionais e geométricos dos furos usinados).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados: (i) as particularidades do processo de furação; (ii) a caracterização das brocas; (iii) os fatores de avaliação da qualidade de um furo; (iv) os fundamentos do projeto Fatorial  $2^k$ .

#### 3.1 Processo de Furação

A Norma DIN 8589 define a furação como um processo com movimento rotativo principal, isto é, um processo de usinagem que apresenta movimento de corte circular. É, em geral, o método mais eficiente e econômico para obtenção de um furo em um material sólido. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça [Klocke, 2011].

Segundo Diniz et al., 2013, os movimentos realizados pela broca, em relação à peça considerada parada, são definidos como movimento principal de corte, de avanço e efetivo. O movimento principal de corte consiste no movimento entre ferramenta e peça, o que origina a remoção do cavaco durante a rotação da ferramenta. Sendo assim, a velocidade de corte é definida como a velocidade tangencial nas extremidades da broca. O movimento de avanço é o movimento linear da ferramenta na direção de seu eixo de rotação, sendo o avanço da ferramenta definido pelo comprimento percorrido linearmente pela broca durante uma rotação. Quanto maior o valor de avanço, maior a espessura de corte, e logo maior é a deformação plástica e encruamento do cavaco pela broca no fundo do furo e, por isso, mais difícil fica o corte. Assim, tem-se uma maior resistência à penetração da broca devido ao efeito conjunto do corte e esmagamento do material na aresta transversal de corte e do corte do material nas duas arestas principais de corte. O movimento efetivo é o deslocamento resultante da combinação entre avanço e velocidade de corte [Souza et al., 2014; Diniz et al., 2013].

A furação faz parte do grupo de processos de usinagem com geometria de corte definida, assim como o torneamento e o fresamento [Castillo, 2005]. Este processo possui algumas características singulares: a velocidade de corte é nula no centro da broca e chega a seu valor máximo na periferia da ferramenta; as guias da ferramenta se atritam com a parede do furo durante a operação [Klocke, 2011]. Além disso, ocorre uma concentração maior de calor nas quinas da broca, consequência de uma maior velocidade de corte em relação às demais áreas da aresta de corte [Marmantini, 2009].

Na Figura 1 observam-se as variações e as possibilidades mais comuns no que tange ao processo de furação.

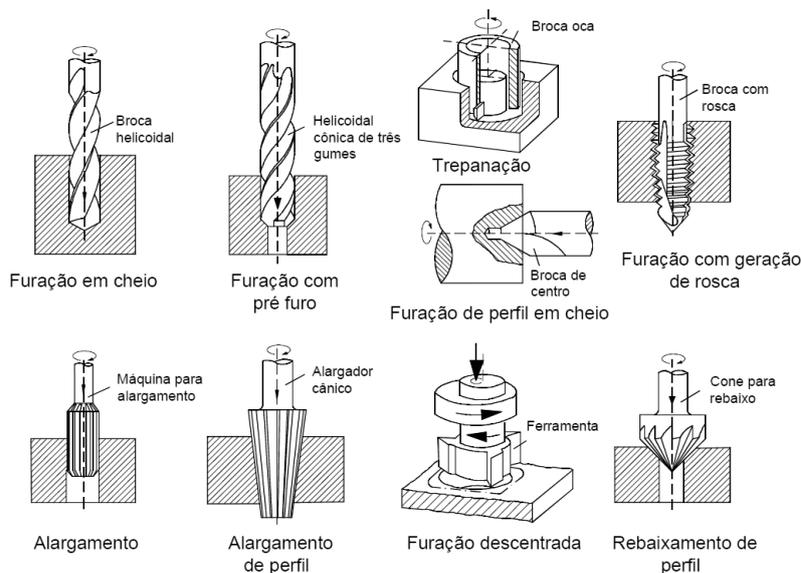


Figura 1 – Variantes do processo de furação com ferramentas de geometria definida segundo DIN 8589 [Klocke, 2011].

### 3.2 Ferramentas de Corte (Brocas)

As circunstâncias de atuação de brocas são rigorosas. Altas temperaturas e atrito elevado requerem materiais com nobre resistência a essas condições. O metal-duro é um dos principais materiais aplicado nestas ferramentas. Permite alcançar maiores níveis de dureza, resistência ao desgaste e resistência a quente, mantendo a tenacidade em níveis perfeitamente aceitáveis. Esta superioridade das brocas de metal-duro em relação às de aço-rápido implica em custos bem mais elevados. Para a utilização econômica de brocas de metal-duro faz-se necessária a utilização de máquinas-ferramenta que permitam alcançar os níveis de velocidade, potência e rigidez exigidos por estas ferramentas [Massirer Jr., 2010].

Uma forma de melhorar o desempenho em brocas de metal-duro é o emprego de revestimentos. Certas características facilitam a extração de cavaco e melhoram o rendimento e a qualidade da furação: maior resistência ao desgaste e à abrasão, menor adesão de material à broca, aumento de tenacidade e menor rugosidade em sua superfície [Sória et al., 2016].

Além dos materiais, as brocas também podem ser diferenciadas quanto suas características geométricas. Em geral, apresentam duas arestas de corte constituídas pelas cunhas de corte, formadas pela intersecção das superfícies de saída e folga e pela aresta transversal de corte. O ângulo de hélice da broca define o ângulo de saída, apresentando o seu valor máximo na ponta de corte e diminuindo no sentido do centro desta, tornando-se negativo na passagem para a aresta transversal [Souza et al., 2014]. Os canais para o escoamento/saída do cavaco têm influência direta sobre o processo de furação e classifica o tipo de broca. Estas também podem ser classificadas de acordo com a forma da haste, o número de canais, o sentido de corte, o comprimento, o diâmetro e a afiação da ponta.

A broca mais comumente utilizada é a com canais helicoidais (Figura 2a), ferramentas projetadas para furação em cheio e para peças com pré-furos. Propiciam melhor remoção de cavaco, possuem capacidade de auto centragem, apresentam maior facilidade de montagem e mantém o diâmetro nominal dentro da tolerância mesmo com reafiações [Boeira, 2010]. As brocas com canais retos (Figura 2b) caracterizam-se por uma boa resistência à torção e são utilizadas principalmente para furação profunda de ferros fundidos do tipo GG, GGG e ligas de alumínio-silício, sendo seu uso limitado a furos com comprimentos iguais a 15 vezes o seu diâmetro [Gühring, 1997; Castillo, 2005; Stemmer, 2008].

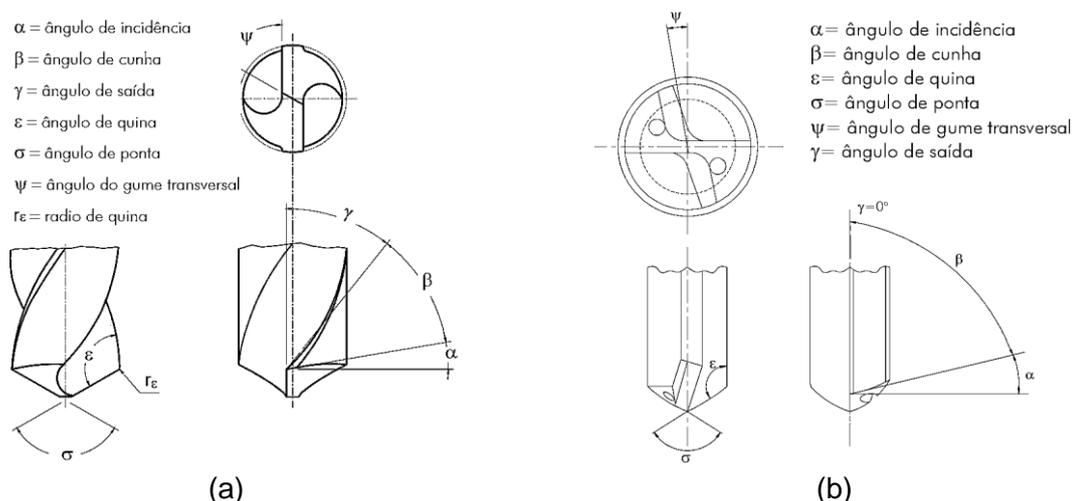


Figura 2 - Geometria geral da broca [Castillo, 2005]: (a) com canais helicoidais; (b) com canais retos.

Existe também maior esforço de compressão em brocas com canais retos em comparação as com canais helicoidais. O ângulo de saída na broca helicoidal aumenta do centro (negativo) para a periferia (positivo) da broca, facilitando o corte pela diminuição do ângulo de cunha, sendo mais afiada. Já o ângulo de saída da broca de canais retos é sempre negativo e o ângulo de cunha é, portanto, grande e os esforços de penetração na peça são por isso maiores [Souza et al., 2014; Sória et al., 2016].

### 3.3 Desvios Dimensionais e Geométricos

A análise de qualidade do acabamento dos furos é usualmente avaliada em função dos desvios dimensionais e geométricos, entre outros fatores resultantes da aplicação do processo de furação. Estes desvios encontram-se previstos em projeto e são considerados através de tolerâncias, que devem absorver os desvios permitindo uma faixa dimensional e/ou geométrica de aproveitamento da aplicação de determinado método. Os desvios são inerentes a qualquer modo de fabricação por remoção de material e tolerâncias apertadas levam a maiores custos de produção e inspeção. A precisão dos furos depende do tipo de processo de furação, da peça, da ferramenta, da máquina, dos parâmetros do processo e da rigidez de todo sistema [Castro, 2001].

Entende-se por desvio dimensional todo desvio de uma medida prescrita anteriormente, indicada como valor objetivo em um projeto. No caso dos furos gerados pelo processo de furação com brocas de geometria definida, este desvio é atribuído à diferença entre os diâmetros de projeto e o obtido após a operação de corte. Segundo Castillo, 2005, na maioria dos casos o diâmetro do furo produzido é maior que o diâmetro da broca. Pode-se observar na Figura 3a as possibilidades de desvio dimensional em um furo, menor ou maior que o diâmetro de projeto, com indicação da faixa de tolerância ( $t$ ).

Os desvios geométricos são definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem. Podem ser classificados como reticidade, circularidade, cilindridade, conicidade, planicidade etc. [Fonseca et al., 2010]. Os desvios de circularidade (Figura 3b) são de extrema importância na indústria de precisão. São medidos através da circunscrição em um círculo básico, onde a área interna, formada pelas linhas do furo real e do círculo básico, é igual à área externa formada pelas mesmas linhas. Assim, o desvio de circularidade ( $t$ ) é a máxima diferença entre os raios maior e menor [Bezerra, 1998].



Figura 3 – Desvios dimensional e geométrico [Castillo, 2005].

Em geral, deseja-se que as tolerâncias de furos de precisão em aços produzidos com brocas helicoidais sem furo de centro e sem bucha para diâmetros entre 6 e 19 mm sejam inferiores a  $t = 27 \mu\text{m}$  [Klocke, 2011].

### 3.4 Projeto de Experimento Fatorial $2^k$

Processos de fabricação com relevância industrial consideram grande quantidade de fatores e graus de intensidade que influenciam diretamente na qualidade dos resultados de operação. O grande obstáculo na indústria é a dificuldade do estudo dos efeitos simultâneos dos fatores, seus níveis e interações, devido ao tempo, custos elevados e falta de recursos adequados para análise de resultados. Isto poderia resultar em aplicações mais seguras, confiáveis e de melhor acabamento, com a finalidade de aprimorar o produto final com melhor aproveitamento dos recursos disponíveis para tal. A solução para as questões relacionadas ao refino dos fatores pode ser alcançada com mais facilidade com experimentos planejados e tendo suas respostas analisadas com métodos ou técnicas estatísticas.

Segundo Galdámez, 2002, um experimento fatorial com “k” fatores, cada fator com dois níveis (-1 e +1), é denominado fatorial  $2^k$ . O procedimento dessa técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações possíveis, e então estabelecer e analisar os efeitos

principais e de interação dos fatores considerados, podendo apontar as melhores condições experimentais do processo de fabricação. Além de investigar todas as possibilidades de combinações, é de alta relevância que a ordem de execução dos arranjos seja feita de forma aleatória. No caso, a aleatorização é realizada para balancear os efeitos produzidos pelos fatores não-controláveis nas respostas analisadas e para atender a requisitos dos métodos estatísticos, os quais exigem que os itens do erro experimental sejam variáveis aleatórias independentes.

A interpretação dos dados é a última etapa, sendo possível identificar como o sistema reage às perturbações e qual a significância dos fatores de entrada, ou seja, quais fatores causam efeitos estatisticamente relevantes dentro dos níveis aplicados. A diferença entre uma estatística da amostra e um valor hipotético é estatisticamente significativa se um teste de hipótese indicar que é muito improvável que tenha ocorrido por acaso. Para avaliar a significância estatística, examina-se o valor-p do teste. Se o valor-p for menor que um nível de significância especificado ( $\alpha$ ), geralmente 0,05 (intervalo de confiança de 95%), pode-se declarar a diferença como estatisticamente significativa e rejeitar hipótese nula do teste [Minitab, 2018].

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão expostos os materiais e equipamentos utilizados no decorrer do experimento, bem como o procedimento seguido no processo de furação da placa (corpo de prova) e a subsequente medição dos fatores de qualidade.

##### 4.1 Materiais

A Tabela 1 apresenta a composição química do material utilizado nos experimentos de acordo com o certificado de inspeção do fabricante SSAB nº EN 10 204 - 3.1.

Tabela 1 - Composição química do Hardox<sup>®</sup>450 (em % massa).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Outros
0,177	0,170	1,29	0,011	0,001	0,25	0,05	0,02	0,0015	0,073

Para aplicação da proposta, uma chapa fina de Hardox<sup>®</sup>450 (3,5 mm de espessura) foi selecionada e então projetou-se o corpo de prova. Para isso, definiu-se uma placa com dimensões de 234 x 230 mm. A Figura 4 mostra esquematicamente a amostra preparada para execução do estudo, com as furações apropriadas para posterior fixação na máquina.

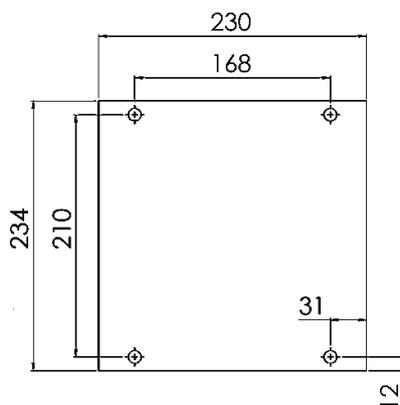


Figura 4 – Vista frontal da placa (corpo de prova).

Foram usadas duas brocas de metal-duro Secta Tools, uma com canal helicoidal (modificada) e uma com canal reto, ambas com diâmetro de 12 mm e com revestimento à base de nitreto de cromo-alumínio (AlCrN) com geometria detalonada (Figura 5). A afiação detalonada é a de uso geral e faz com que o ângulo de folga aumente em direção ao centro da broca (a

superfície de folga torna-se cônica). A geometria modificada indica que o ângulo de cunha é maior que o valor padrão devido ao chanframento da aresta de corte.



Figura 5 - Imagens das brocas utilizadas: (a) canal helicoidal; (b) canal reto.

As geometrias desenvolvidas pela Secta Tools foram baseadas na norma ABNT NBR ISO 5419. A Figura 6 mostra em detalhe a vista frontal de ambas as brocas, juntamente com desenho esquemático representando suas afiações.

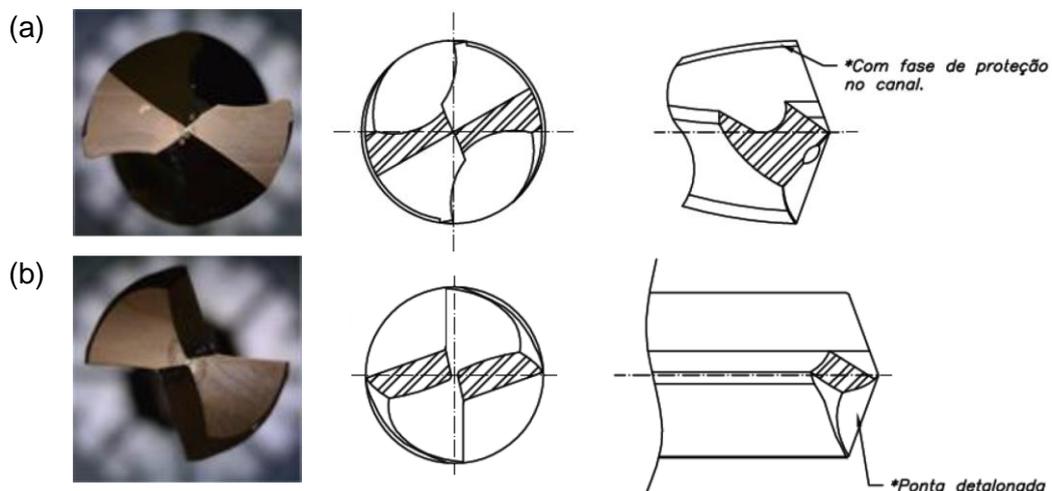


Figura 6 – Vista frontal e detalhe da afiação das brocas: (a) Canal Helicoidal; (b) Canal Reto [adaptado de Souza et al., 2014].

Na experimentação foi aplicado fluido de corte Bondmann BD-Fluid B90 em abundância.

## 4.2 Equipamentos

O preparo da placa (corpo de prova) foi realizado por meio de corte por jato d'água utilizando a máquina Golden Arrow II (LAMEF-UFRGS).

O experimento foi executado no centro de usinagem ROMI modelo Discovery 308, com comando Mach 8, rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 5,5 kW (LAUS-UFRGS).

Para medição e ajustes da planicidade da chapa e do batimento nas brocas utilizou-se o relógio comparador Digimess modelo 121.304, com resolução de 10  $\mu\text{m}$  e exatidão de  $\pm 15 \mu\text{m}$  (LAUS-UFRGS).

As medições de diâmetro dos furos e do erro de circularidade foram obtidas com o auxílio de uma máquina de medição por coordenadas (MMC) Mitutoyo modelo QM-Measure 353, com precisão de 3  $\mu\text{m}$  e resolução de 0,5  $\mu\text{m}$  (LAUS-UFRGS).

## 4.3 Procedimento Experimental

A Tabela 2 apresenta os três fatores e os níveis explorados no experimento. Os valores de velocidade de corte e avanço seguem as recomendações do fabricante do material usinado (aço Hardox<sup>®</sup>450) para aplicações com brocas de metal-duro. O experimento baseou-se na exploração da execução de todas as combinações possíveis entre fatores e níveis, com a

finalidade de formar uma estrutura consistente de dados que permitisse avaliar todas condições praticáveis entre os fatores escolhidos.

Tabela 2 – Fatores e níveis aplicados no experimento.

	FATOR	NÍVEL -1	NÍVEL 1
X1	Geometria da Broca	Canal Reto	Canal Helicoidal
X2	Velocidade de Corte	32 m/min	48 m/min
X3	Avanço	0,08 mm/volta	0,12 mm/volta

A Tabela 3 expõe a matriz esquemática de combinações e a ordem aleatória de execução dos arranjos. Com a finalidade de aumentar a confiabilidade dos resultados por meio do aumento do número de amostras, realizou-se 3 furos para cada arranjo, totalizando 24 furos.

Tabela 3 – Matriz de arranjos e ordem de execução.

Ordem de execução	Fator de Controle			Ordem de execução	Fator de Controle		
	X1	X2	X3		X1	X2	X3
4	-1	-1	-1	1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1	8	+1	-1	+1
7	-1	+1	-1	6	-1	+1	+1
3	+1	+1	-1	5	+1	+1	+1

A placa foi fixada na mesa da máquina por quatro parafusos M9, conforme Figura 7a. Para que a chapa não sofresse empenamento pelo esforço axial da broca, foram dispostas barras quadradas como calços entre a chapa e a placa de fixação presa na mesa do centro de usinagem, formando um corredor livre para a broca penetrar e atravessar o material, e realizando os furos na direção deste corredor.

Antes de iniciar o processo, conferiu-se o alinhamento da superfície da placa com a mesa através do relógio comparador. O desvio de planicidade não ultrapassou 0,1 mm. A cada troca de ferramenta, o batimento da broca foi verificado por meio do relógio comparador. O erro de batimento permaneceu abaixo de 0,05 mm. A Figura 7b demonstra a medição do batimento após a instalação da broca de canal reto.



(a)



(b)

Figura 7 – (a) Fixação da placa; (b) verificação do batimento na broca.

A análise da qualidade dos 24 furos efetuados na placa de aço Hardox<sup>®</sup>450 foi feita com o auxílio da máquina de medição por coordenadas (MMC), e realizou-se através da avaliação de desvios dimensionais, considerando o diâmetro dos furos, e desvios geométricos de circularidade. A ponteira de 3 mm da MMC foi aferida antes da sessão de medições ser iniciada. O corpo de prova foi fixado em dois pontos junto à mesa da MMC. Foram efetuadas quatro medições de cada tipo de desvio por furo, descartando o valor mais discrepante e assim ficando

com três medições por furo para cada tipo de desvio. Cada medida de desvio dimensional é resultado da determinação da posição de seis pontos em cada furo. Os valores de desvio geométrico sucedem-se da definição de 11 pontos por furo. A Figura 8 apresenta quais pontos a máquina toma por referência para cada tipo de desvio.

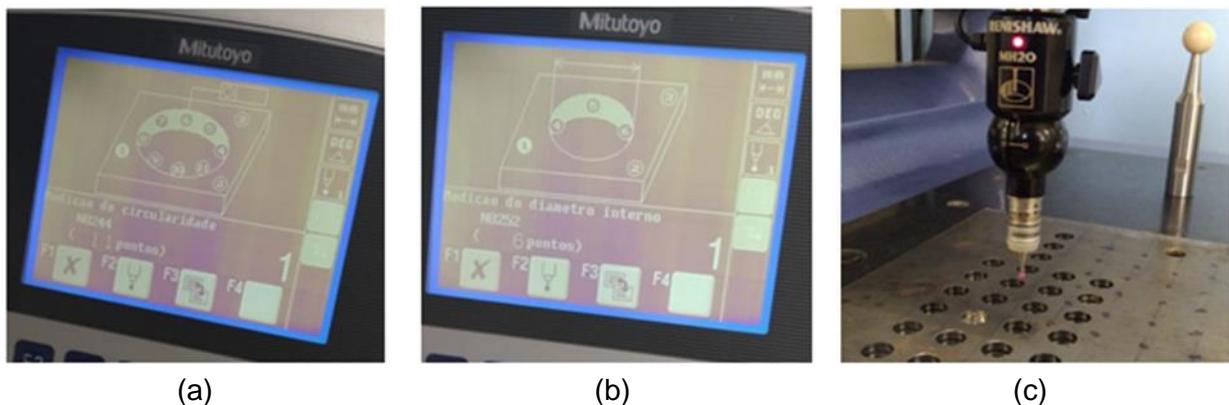


Figura 8 – (a) pontos para desvio geométrico; (b) pontos para desvio dimensional; (c) medição em progresso.

Os valores obtidos foram examinados através do software Minitab®18. Geraram-se gráficos para análise dos efeitos dos fatores e seus níveis, tanto considerando as combinações entre estes quanto percorrendo sobre os resultados isolados de cada fator. A significância estatística de cada fator foi estudada por meio da Análise de Variância (ANOVA) de três fatores com um intervalo de confiança de 95%, com a finalidade de investigar estatisticamente a significância da aplicação dos fatores e seus níveis sobre os resultados de acabamento dos furos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os ensaios de furação foi possível observar a baixa usinabilidade do Hardox®450. A geração de cavacos longos e espirais mostra o encruamento do material ao decorrer do corte, sinal típico de materiais com alta tensão de escoamento, o que dificulta a remoção do cavaco com o fluido de corte durante a operação. Cavacos curtos e quebradiços são sempre preferência por facilitarem seu escoamento e serem característica de boa usinabilidade.

Para avaliar os resultados obtidos experimentalmente (desvios dimensionais e geométricos), foram utilizados métodos estatísticos. A ANOVA de três fatores possibilitou assinalar quais efeitos se mostraram mais representativos em relação aos resultados.

Por meio de análise gráfica, conclui-se subjetivamente sobre os efeitos isolados de cada fator, bem como o comportamento do sistema quando se considera a interação entre fatores. Para os efeitos principais, quanto maior for a inclinação da reta, mais impactante será a consequência da variação de nível do fator. No caso dos desvios estudados, inclinações positivas (valores maiores) indicam uma piora nos resultados de acabamento.

Para a interação entre efeitos, linhas aproximadamente paralelas indicam que a combinação em questão não influi consideravelmente nos resultados. Porém, quanto maior for a diferença de inclinação entre as linhas, maior será a influência desta interação no acabamento.

As análises foram realizadas levando em consideração os desvios dimensionais em relação ao diâmetro nominal e os desvios geométricos de circularidade, dois índices de qualidade do processo de furação. A Tabela 4 e a Figura 9 apresentam os resultados das medições realizadas para cada desvio, em cada furo. Cada valor demonstrado na tabela é resultado da média aritmética de três medições, enquanto que as barras de erros da figura representam a variação  $\pm 2,31 \cdot s$ , onde  $s$  é o desvio-padrão das  $3 \times 3 = 9$  amostras.

A Tabela 5 apresenta o quadro de qualidade de fabricação IT para a faixa dimensional na qual situam-se os furos gradados (12 mm).

Tabela 4 – Resultado da série de medições para cada desvio, em cada furo realizado.

Ordem de execução	Fator de Controle			Desvios Dimensionais [ $\mu\text{m}$ ]			Desvios Geométricos [ $\mu\text{m}$ ]		
	X1	X2	X3	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 1	Furo 2	Furo 3
		[m/min]	[mm/rev]						
1	Reta	32	0,12	14,87	18,43	17,17	20,20	18,77	10,30
2	Helicoidal	32	0,08	22,30	31,67	32,00	5,03	5,07	5,70
3	Helicoidal	48	0,08	27,07	32,13	37,43	6,80	9,30	9,33
4	Reta	32	0,08	22,90	15,50	20,70	11,13	7,70	11,53
5	Helicoidal	48	0,12	9,67	20,40	28,77	4,77	7,40	8,13
6	Reta	48	0,12	7,33	8,73	8,20	7,57	7,50	9,03
7	Reta	48	0,08	16,10	13,70	17,17	6,93	9,70	7,13
8	Helicoidal	32	0,12	22,10	22,60	24,57	10,87	7,10	7,00

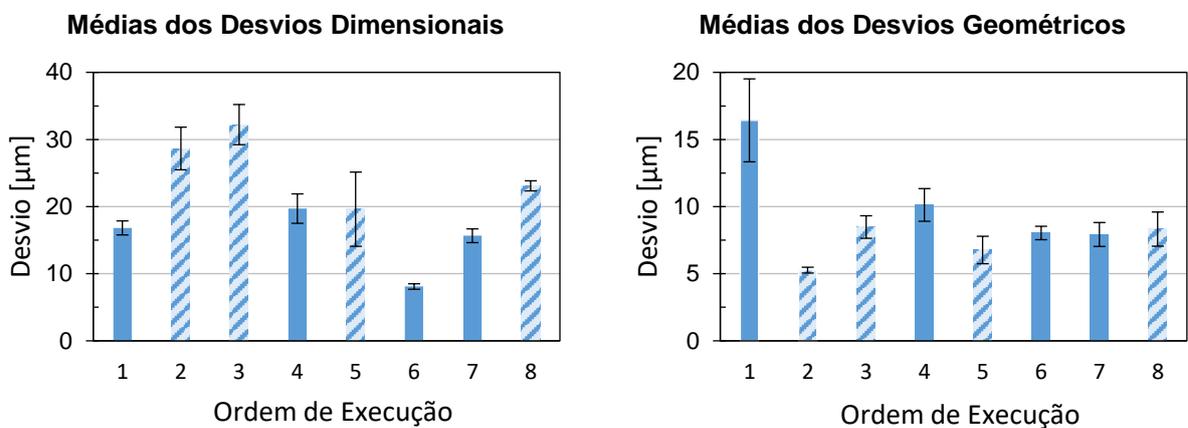


Figura 9 – Gráficos dos desvios gerados para cada combinação de parâmetros. Barra cheia para arranjos com broca reta e hachurada para arranjos com broca helicoidal.

Tabela 5 – Quadro de qualidade IT para dimensões  $> 10 \leq 18$  mm.

Qualidade	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9
t [ $\mu\text{m}$ ] (Figura 3)	$3 < t \leq 5$	$5 < t \leq 8$	$8 < t \leq 11$	$11 < t \leq 18$	$18 < t \leq 27$	$27 < t \leq 43$

Com análise das médias das medições feitas para os dois tipos de desvios estudados, Figura 9, observa-se que a Combinação 6 (broca com canais retos,  $v_c = 48$  m/min e  $f = 0,12$  mm/volta) gerou os melhores resultados para desvio dimensional (Qualidade IT6), enquanto para desvios geométricos a Combinação 2 (broca com canais helicoidais,  $v_c = 32$  m/min e  $f = 0,08$  mm/volta) sucedeu menor desvio geométrico de circularidade (IT5).

Considerando os desvios do diâmetro nominal no furo, nota-se que brocas com canais helicoidais geraram maior dificuldade em manter fidelidade à dimensão desejada. Em seu estudo, Carvalho et al., 2017, constataram que isso pode ser ocasionado pois conforme os parâmetros se intensificam, um maior nível de deformação nas extremidades externas do canal pode ocorrer, levando a alterações no diâmetro e gerando furos com maior índice de qualidade IT. Brocas retas por sua vez possuem maior resistência estrutural e seu desempenho neste caso melhora conforme os demais parâmetros se intensificam.

Considerando a circularidade, os arranjos que contém broca reta tenderam a apresentar os piores desvios. Infere-se que a geometria da broca, logo o modo como o material é cisalhado, interfere diretamente no comportamento do sistema considerando a manutenção da geometria

do furo. A dificuldade que a broca reta apresenta em quebrar e expulsar o cavaco resulta num maior encruamento instantâneo do mesmo, o que aumenta a sua resistência e conseqüentemente dificulta sua ruptura, podendo resultar em vibrações no corpo da broca ocasionando descontinuidades de centralização do furo. Além disso, em chapas finas ocorre flexão da superfície ao contato da broca, amenizada conforme o furo vai progredindo, o que também pode ocasionar maus resultados no que se refere a boa circularidade. Canais helicoidais apresentam melhor desempenho neste sentido, possivelmente por sua característica auto centrante, que permite referência contínua da posição da broca enquanto em operação. Em adição, baixas velocidades de corte e avanços propiciam um maior número de ciclos de giro da hélice na mesma região, ocasionando em maior fidelidade circular do furo.

## 5.1 Desvios Dimensionais

O caso ideal após a aplicação de um furo passante é que a dimensão do diâmetro seja igual ao diâmetro nominal da ferramenta. Os desvios dimensionais indicam as pequenas variações que a execução do processo gera, influenciando diretamente no índice de qualidade do furo. Com base nisto, aqui serão investigados os fatores que se mostram estatisticamente significativos bem como os resultados serão interpretados, possibilitando destacar a combinação que ofereceu o melhor índice de qualidade ao processo de furação.

### 5.1.1 Análise de Variância (ANOVA)

Na Tabela 6, observa-se através da análise do valor-p (menor que 0,050) que para os fatores principais, a geometria da broca (X1) e o avanço (X3) são significantes para o desvio dimensional. No caso, a geometria tem 45,29% de contribuição no resultado final e o avanço, 19,77%. Considerando as combinações entre fatores, os valores-p gerados mostram que nenhum dos efeitos de interação é realmente significativo.

Tabela 6 – ANOVA para desvio dimensional.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Geometria	1	703,08	703,084	32,72	0,00003
Velocidade	1	60,48	60,484	2,81	0,11284
Avanço	1	306,97	306,973	14,28	0,00164
Geometria*Velocidade	1	61,97	61,974	2,88	0,10883
Geometria*Avanço	1	22,36	22,362	1,04	0,32287
Velocidade*Avanço	1	51,53	51,529	2,4	0,14106
Geometria*Velocidade*Avanço	1	2,06	2,061	0,1	0,76079
Erro	16	343,85	21,491		
Total	23	1552,32			

Pela análise dos valores-p gerados, nota-se que os fatores geometria da broca e avanço (*f*) mostram uma grande significância estatística, a qual também se poderá confirmar pela análise dos efeitos principais. Neste processo, também se notou que as combinações entre parâmetros não levam a efeitos consideráveis, e no caso em estudo se rejeita a hipótese de que as conseqüências da interação entre parâmetros resultem em resultados aprimorados.

### 5.1.2 Efeitos Principais

A Figura 10 apresenta os gráficos de efeitos principais para o desvio dimensional. Estes representam como cada fator se comporta isoladamente, na comparativa entre seus níveis baixo (-1) e alto (1), citados na Tabela 2.

Observa-se que a geometria da ferramenta apresenta a alteração mais impactante nos resultados (Valor-p = 0,00003), seguida pelo avanço (Valor-p = 0,00164) e por último a velocidade de corte (Valor-p = 0,11284). A broca de canal reto (-1) apresentou os menores

valores de desvio dimensional, proporcionando diâmetros mais próximos ao original da broca. Visualiza-se também que a maior velocidade de corte ( $v_c = 48$  m/min) e o maior avanço ( $f = 0,12$  mm/volta) propiciam um diâmetro do furo realizado mais próximo do diâmetro da broca com média de 12,008 mm, caracterizando um furo com índice de qualidade IT5, o que configura excelente tolerância dimensional.

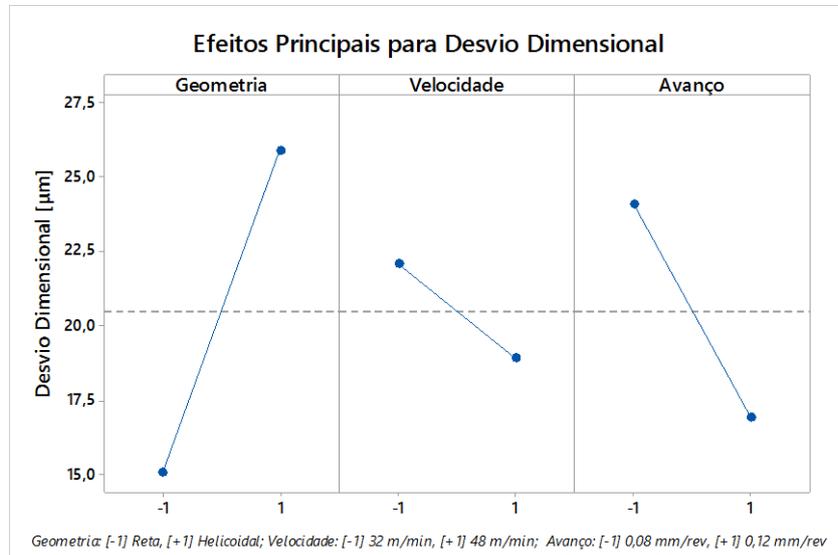


Figura 10 – Gráficos de efeitos principais para desvio dimensional.

### 5.1.3 Interações Entre os Fatores

A Figura 11 exibe os gráficos de interações entre fatores, dois a dois. Observa-se como os resultados variam, considerando o comportamento de cada fator em combinação com outro.

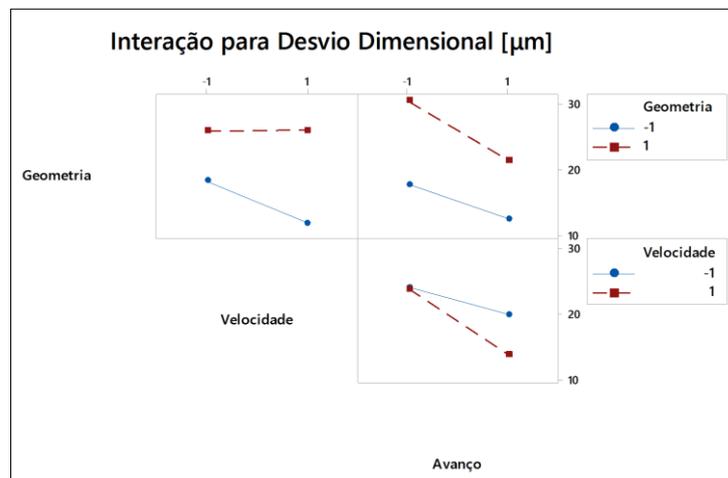


Figura 11 – Gráficos de interação dois fatores para o desvio.

Observa-se que a geometria da ferramenta e o avanço ( $f$ ) aplicados no processo não esboçam dependência entre seus desempenhos. Além disso, a variação da velocidade de corte ( $v_c$ ) não mostra efeitos significativos quando a broca de canal helicoidal (1) foi utilizada. No entanto o aumento de  $v_c$  (de 32 m/min para 48 m/min) melhorou os resultados quando a broca de canais retos (-1) foi aplicada. Por fim, o baixo avanço ( $f = 0,08$  mm/volta) combinado com o efeito de  $v_c$  não tem efeito considerável sobre o desvio dimensional. Para o nível mais elevado de  $f$ , o efeito combinado com  $v_c$  mostra dependência.

De uma maneira geral, as medições apresentaram desvios menores que 40 µm e maiores que 8 µm, mantendo a qualidade dos furos entre os índices IT5 (qualidade fina) e IT9 (qualidade

média) o que simboliza valores usuais para aplicações industriais do processo de furação segundo Klocke, 2011. Considerando os resultados em relação à interação  $v_c \times f$ , pode-se supor que com maiores intensidades destes parâmetros, uma melhoria na qualidade dimensional poderia ocorrer e, por consequência, ter-se-ia um furo extra preciso.

## 5.2 Desvios Geométricos

Em se tratando de desvios geométricos, melhores resultados significam maior fidelidade entre a forma do furo obtido em comparação a um círculo perfeito. Altos valores de desvios de circularidade são graves e podem ocasionar na incapacidade de montagem entre um eixo e um furo, principalmente em estruturas com tolerâncias apertadas onde grande precisão é esperada. Assim, serão avaliados os fatores e suas combinações observando como os resultados se comportam com as variações aplicadas e será destacado o arranjo de melhor resposta de acabamento considerando a geometria circular dos furos.

### 5.2.1 Análise de Variância (ANOVA)

Analisando o quadro de ANOVA representado na Tabela 7, observa-se que para os desvios geométricos de circularidade, os valores-p dos fatores principais geometria com 21,41% de contribuição, e velocidade de corte com 9,17% de contribuição mostram-se significativos. Verificando a combinação entre fatores, os valores-p de interação para geometria-velocidade, com 17,12% de contribuição, e velocidade-avanço, com 13,76% de contribuição, exibem significância e, portanto, considerar-se que de fato existe uma melhora de desempenho de qualidade geométrica por efeitos combinados.

Tabela 7 – ANOVA para desvio geométrico.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Geometria	1	70,042	70,0417	12,07	0,00313
Velocidade	1	29,927	29,9267	5,16	0,03735
Avanço	1	22,556	22,5557	3,89	0,06626
Geometria*Velocidade	1	56,222	56,2224	9,68	0,00671
Geometria*Avanço	1	9,627	9,6267	1,66	0,21615
Velocidade*Avanço	1	45,009	45,0091	7,75	0,01326
Geometria*Velocidade*Avanço	1	0,759	0,7585	0,13	0,72248
Erro	16	92,884	5,8052		
Total	23	327,024			

O estudo estatístico dos valores-p para desvios de circularidade permite avaliar que, assim como no gráfico de efeitos principais, o fator geometria da broca é o mais significativo estatisticamente e sua correta seleção oferecerá melhores resultados de acabamento geométrico. Velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço ( $f$ ) mostram valores-p próximos, mas atendo-se ao conservadorismo no que tange aos critérios estatísticos, o parâmetro  $v_c$  mostra-se significativo de fato. Esta proximidade nos resultados pode ser confirmada na análise dos efeitos principais. Pode-se inferir que um maior número amostral possibilitaria confirmar o avanço como estatisticamente significativo.

### 5.2.2 Efeitos Principais

A representação gráfica da Figura 12 apresenta a variação dos níveis dos fatores e sua influência isolada sobre os resultados considerando os desvios geométricos de circularidade. Como observado nos desvios dimensionais, o efeito da variação da geometria das brocas utilizadas apresenta a maior alteração entre resultados de circularidade dos furos. As

consequências da modificação de intensidades de velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço ( $f$ ) mostram praticamente o mesmo ímpeto em relação à variação de resultados.

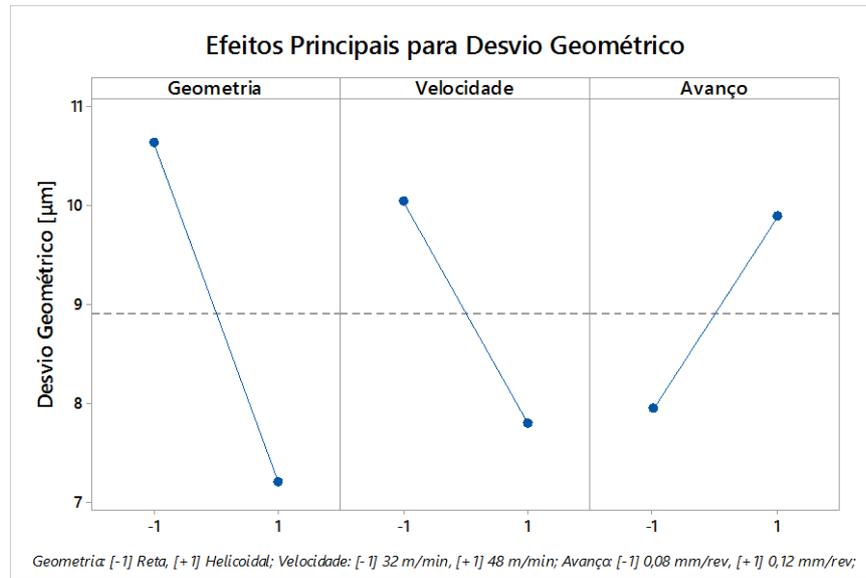


Figura 12 – Gráficos de efeitos principais para desvio geométrico.

Neste caso, a broca de canais helicoidais apresenta isoladamente os melhores resultados. Indica-se que o aumento de  $v_c$  (de 32 m/min para 48 m/min) reduz o desvio, enquanto o aumento de  $f$  (de 0,08 para 0,12 mm/volta) o prejudica.

Isso expressa que uma escolha inteligente dos fatores em referência a sua combinação pode levar a resultados lapidados. Este desfecho pode ser confirmado pelo estudo da representação gráfica dos efeitos de interação, a qual sugere a ampla desenvoltura dos resultados em relação a estas combinações.

### 5.2.3 Interações Entre os Fatores

A magnitude da dependência da combinação entre fatores e como isto influencia os desvios de circularidade pode ser acompanhado nos gráficos apresentados na Figura 13.

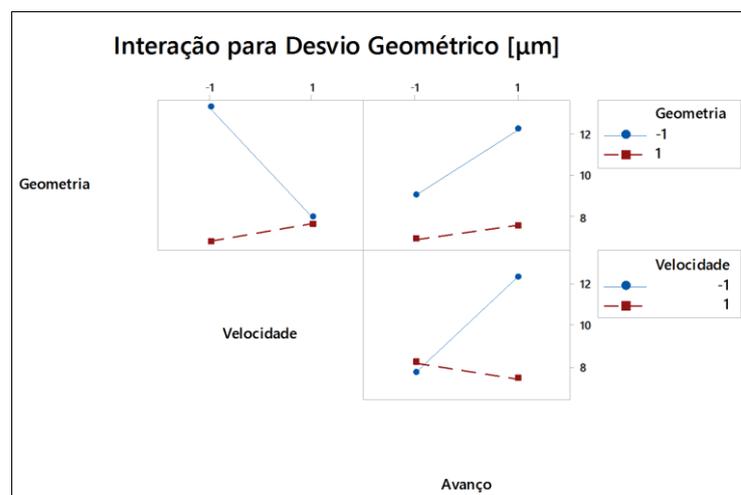


Figura 13 – Gráficos de Interação para desvio geométrico.

Nota-se novamente que a combinação entre geometria da broca e avanço ( $f$ ) mostra a menor relação de dependência em comparação com as outras interações. Neste caso as linhas não se encontram aproximadamente paralelas, entretanto, considerando um nível de

significância  $\alpha = 0,05$  pode-se desprezar os efeitos de interação entre esses fatores. O aumento de  $f$  (de 0,08 para 0,12 mm/volta) levou a piores resultados com ambas geometrias, mas seu efeito foi mais acentuado com a broca de canais retos (-1). Observando as consequências das combinações entre geometria da broca e velocidade de corte ( $v_c$ ) e entre  $v_c$  e  $f$ , nota-se grande influência destes efeitos em referência aos desvios de circularidade (grande significância dos efeitos de interação). O aumento de  $v_c$  (de 32 m/min para 48 m/min) reduziu este desvio para broca de canais retos (-1) e o aumentou levemente em combinação com a broca de canais helicoidais (1). Considerando o aumento de  $f$ , tem-se uma leve melhora nos resultados para a maior  $v_c$ . Em compensação, o incremento de  $f$  indica uma piora acentuada na circularidade do furo quando combinada com a baixa  $v_c$ .

## 6 CONCLUSÕES

Por ser comprovadamente um material de baixa usinabilidade em função das propriedades intrínsecas projetadas para alta resistência mecânica ao desgaste e à deformação, usar de maneira aprimorada os parâmetros de usinagem provoca uma melhora significativa no processo em relação ao acabamento desejado.

Com base na análise da significância estatística de aplicação dos fatores, juntamente com as representações gráficas para efeitos de fatores principais e combinados, é possível concluir com segurança quais parâmetros são expressivos, além de permitir visualizar como os resultados se comportam com as inúmeras variações estudadas.

Após uma análise detalhada de todas as informações obtidas, conclui-se que a configuração entre parâmetros e níveis que gerou melhores resultados de acabamento em relação a desvios dimensionais foi a combinação que considerou a broca com canais retos, velocidade de corte  $v_c = 48$  m/min e avanço  $f = 0,12$  mm/volta, obtendo um desvio médio de 8,09  $\mu\text{m}$  (Qualidade IT6).

A configuração que gerou melhor acabamento em relação a desvios geométricos foi a combinação da broca com canais helicoidais, velocidade de corte  $v_c = 32$  m/min e avanço  $f = 0,08$  mm/volta, com um desvio médio de circularidade de 5,27  $\mu\text{m}$ .

Portanto, observa-se que o arranjo de melhor comportamento em relação a desvios dimensionais é totalmente oposto à combinação selecionada considerando melhores resultados de desvio geométrico.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bezerra, A.A., 1998, **“Influência dos principais parâmetros no processo de alargamento de uma liga de alumínio-silício”**, (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia,, 139 p.

Boeira, A.M.G., 2010, **“Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos”**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 193p.

Carvalho, A. C. S.; Baumgaertner Filho, A. J.; Souza, A. J.; 2017, **“Investigação da qualidade do furo gerado na furação de chapa de aço inoxidável AISI 304”**, 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (Anais do IX COBEF), 26 a 29 Jun., Joinville, SC, 9p.

Castillo, W. J. G., 2005, **“Furação profunda do ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais retos”**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 134p.

Castro, P. R. A., 2001, **“Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal”**, Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 164p.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N.L. 2013, "**Tecnologia da usinagem dos materiais**", 8.ed., São Paulo: Artliber, 270p.

Fonseca, M. D.; Gonçalves, R. A.; Machado, A. R., 2010, "**Investigação da rugosidade e desvios geométricos (erros de cilindridade e circularidade) no alargamento do ferro fundido vermicular**", Revista Horizonte Científico (UFU), v.4, n.1, p.1-27.

Galdámez, E.V.C., 2002, "**Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhora da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**", Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos, 121p.

Gühring, 1997, "**Die Ratiobohrer und Ihre Praxisgerechte Anwendung**", Catálogo, Albstadt, Alemanha, 156p.

Klocke, F., "**Manufacturing Processes 1 – Cutting**", Springer, Berlin Heidelberg, 2011.

Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B., 2015, "**Teoria da Usinagem dos Materiais**", 3.ed., Blucher, São Paulo, 407p.

Marmentini, M.M., 2009, "**Análise da furação do ferro fundido nodular utilizando brocas helicoidais de M2 nitretadas**", Dissertação (Mestrado em Engenharia de Manufatura), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 111p.

Massirer Jr., E., 2010, "**Usinabilidade de ligas de ferro fundido para aplicação em cabeçotes de motor através de ensaios de furação**", Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais), Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 76p.

Minitab, "**StatGuide**", 2018.

Sória, B. S.; Figueiredo, M. T.; Souza, A. J., 2016, "**Influência da geometria da broca de metal-duro na qualidade do furo realizado em ferro fundido DIN GGG50**". 10º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (X CONEM), Fortaleza, CE, 21-26 agosto, 10p.

Souza, A. J.; Mattes; F. B., Mognaga; G. F., 2014, "**Análise dos esforços de corte gerados na furação de ferro fundido DIN GGG50 para brocas de metal-duro com diferentes microgeometrias**", 8o Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VIII CONEM), 10 a 15 Ago., Uberlândia, MG, 11p.

SSAB, 2014a, **Hardox®450 Data Sheet**, 2 f. Disponível em: [www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-450](http://www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-450). Acesso em 20/03/2018.

SSAB, 2014b, **Machining recommendations for Strenx® and Hardox®**, 32 f. Disponível em: <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/strenx/brochures/machining-strenx-and-hardox.pdf?m=20160420085241>. Acesso em 25/03/2018.

SSAB, 2014c, **Machining Weldox and Hardox®: Drilling, countersinking, tapping, turning and milling**, 8 f. Disponível em: [www.aemach.com/hardox/pdf/010\\_SSAB\\_plate\\_machining\\_UK.pdf](http://www.aemach.com/hardox/pdf/010_SSAB_plate_machining_UK.pdf). Acesso em 25/03/2018.

Stemmer, C. E., 2008, "**Ferramentas de Corte II**", 4.ed., Editora da UFSC, 314p.