

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE  
USINAGEM NA FURAÇÃO DOS POLÍMEROS UHMW, POM E PTFE

Breno Ferreira Lizardo

Belo Horizonte

2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Breno Ferreira Lizardo

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE  
USINAGEM NA FURAÇÃO DOS POLÍMEROS UHMW, POM E PTFE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito preliminar para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Denilson Laudaes Rodrigues

Belo Horizonte

2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

L789e	Lizardo, Breno Ferreira Estudo Sobre a Influência de Parâmetros de Usinagem na Furação dos Polímeros Uhmw, Pom e Ptf e / Breno Ferreira Lizardo. Belo Horizonte, 2010. 116 f.: il.
Gerais.	Orientador: Denilson Laudaes Rodrigues Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 1. Polímeros. 2. Usinagem. 3. Aspereza de superfície. I. Rodrigues, Denilson Laudaes. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.
	CDU: 621.7

Breno Ferreira Lizardo

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE  
USINAGEM NA FURAÇÃO DOS POLÍMEROS UHMW, POM E PTFE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito preliminar para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Belo Horizonte, 24 de fevereiro de 2010.

---

Denilson Laudaes Rodrigues (Orientador) – PUC Minas

---

Juan Carlos Campos Rubio – UFMG

---

Paulo Eustáquio de Faria – UFMG

---

José Rubens Gonçalves Carneiro – PUC Minas

*A meus pais,  
pelo apoio que sempre posso contar.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar oportunidades, estar sempre comigo e ainda me cercar de pessoas, profissionais, familiares e amigos, nas quais me ajudam nos desafios do dia-a-dia.

A todos meus familiares, pela preocupação, ansiedade, paciência, nervosismo, alegria, ou seja, por estarem junto comigo acima de tudo. Em especial meu pai, minha mãe, meus irmãos e minha linda namorada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Denilson Laudares Rodrigues, pelos conselhos, direcionamentos e incentivos, nos meus bons e não tão bons momentos. Este apoio é essencial e determinante para a conclusão de mais um trabalho. Obrigado pela oportunidade de mais um trabalho juntos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Puc-Minas na pessoa de, que está mais para um anjo em forma de pessoa, Valéria, por ser tão aguerrida e solidária em ajudar. A Letícia, por ajudar de forma tão simpática.

Ao Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio, pelo acolhimento no Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, por ir direto ao que importa, sem rodeios, com competência. Pela ajuda intelectual e pela ajuda prática.

Ao Prof. Dr. Paulo Eustáquio de Faria, pelos conselhos, apoio no planejamento e execução dos experimentos.

Ao Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro, pela participação da banca examinadora e pelas contribuições neste trabalho.

A Celer Biotecnologia S/A, na pessoa de, Adriano J. Masi, pela amizade, incentivo e ajuda desde os mínimos detalhes.

Ao Prof. Marcelo Araujo Câmara por disponibilizar as ferramentas para a execução dos experimentos.

A FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo apoio financeiro pela concessão de bolsa de estudo.

A todos os amigos, por ajudarem além sem saberem. Ajudando a esquecer por certos momentos todas as obrigações e por momentos de lembrar a voltar à realidade de todas as obrigações.

Meus agradecimentos.

## RESUMO

Com o crescente desenvolvimento da engenharia de materiais ao longo dos anos, o surgimento de novos compósitos, novas fibras, biomateriais, ligas metálicas etc, e com a demanda por produtos menos onerosos, menos poluidores e mais eficientes, a engenharia de fabricação também precisa se desenvolver para conseguir processar estes novos materiais. Materiais e geometrias de ferramentas, mecanismos inteligentes, máquinas modulares, também acompanham este cenário. Com esse intuito, este trabalho vem para levantar os principais parâmetros que influenciam o produto acabado. Foram utilizados três materiais poliméricos com características diferentes, duas taxas de avanço, três rotações e três geometrias de ferramenta, permitindo identificar qual desses parâmetros apresentam maior influência na força de avanço da ferramenta e nas características do produto acabado, desvio dimensional e acabamento superficial. O método estatístico para projeto de experimento de Taguchi também foi utilizado e obtive o mesmo resultado da análise dos dados coletados.

Palavras-chave: Polímeros; Usinagem; Desvio dimensional e Acabamento superficial.

## **ABSTRACT**

Over the years, with the increasing development of engineering materials, the emergence of new composites, new fibers, biomaterials, metal alloys etc., and with demand for products less expensive, less polluting and more efficient, the manufacturing engineering also needs to develop to be able to process these new materials. Materials and tool geometries, intelligent mechanisms, modular machines, also follow this setting. To that end, this work comes to raise the main parameters that influence the finished product. Were used three polymeric materials with different characteristics, two feed rates, three rotations and three tool geometries, allowing to identify which of these parameters have greater influence on the thrust force and the characteristics of the finished product, surface finish and dimensional deviation. Design of experiment, the statistical method for Taguchi was also used and got the same result from analysis of collected data.

**Keywords:** Polymers; Machining; Dimensional deviation and Surface finish.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros de entrada a serem controlados e resposta a serem mensurados no presente trabalho.....	22
Figura 2 - Várias propriedades apresentadas pelos polímeros variam de forma característica assintótica com o aumento da sua massa molecular.....	28
Figura 3 - Gráfico do volume específico em função da temperatura para um processo de resfriamento do fundido líquido, para polímeros totalmente amorfo (curva A), semicristalino (curva B) e cristalino (curva C).....	30
Figura 4 - Classificação de brocas quanto ao ângulo de hélice.....	34
Figura 5 - Partes de uma broca helicoidal.....	35
Figura 6 - Partes de uma broca helicoidal (continuação).....	36
Figura 7 - Arestas de corte e superfícies das pontas de uma broca helicoidal.....	37
Figura 8 - Forças no processo de furação.....	40
Figura 9 - Influência dos elementos de liga nos Aços Rápidos.....	42
Figura 10 - Estrutura do Metal Duro.....	43
Figura 11 - Desgaste em brocas helicoidais.....	44
Figura 12 - Parâmetros que influenciam a qualidade de uma peça usinada.....	49
Figura 13 - Erros mais comuns resultantes do processo de furação.....	50
Figura 14 - Perfil da peça: Rugosidade + Ondulações.....	51
Figura 15 - Conceito de linha média.....	52
Figura 16 - Conceitos de percursos durante o processo de medição de rugosidade.....	53
Figura 17 - Rugosidade média Ra.....	54
Figura 18 - Rugosidades, média (Rz) e total (Rt).....	55

Figura 19 - Modelo geral de um processo ou sistema. ....	56
Figura 20 - Dimensões do corpo-de-prova. ....	60
Figura 21 - Brocas helicoidais com ângulos de ponta diferentes. ....	61
Figura 22 - Sistema de fixação do corpo-de-prova. ....	64
Figura 23 - Fixação do suporte no dinamômetro.....	65
Figura 24 - Corpo de prova fixado no suporte sobre o dinamômetro.....	66
Figura 25 - Posição dos furos no corpo-de-prova em relação ao suporte.....	67
Figura 26 - Máquina de medição por coordenadas. ....	69
Figura 27 - Coleta de dados de rugosidade. ....	71
Figura 28 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço $F_z$ pela rotação no UHMW. .....	74
Figura 29 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço $F_z$ pelo avanço no UHMW. .....	74
Figura 30 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço $F_z$ pelo ângulo de ponta da broca no UHMW. ....	75
Figura 31 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço $F_z$ pela rotação no POM. .	76
Figura 32 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço $F_z$ pelo avanço no POM...	76
Figura 33 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço $F_z$ pelo ângulo de ponta da broca no POM.....	77
Figura 34 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço $F_z$ pela rotação no PTFE..	78
Figura 35 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço $F_z$ pelo avanço no PTFE..	78
Figura 36 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço $F_z$ pelo ângulo de ponta da broca no PTFE.....	79
Figura 37 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força $F_z$ no UHMW.....	82
Figura 38 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força $F_z$ no POM. ....	83

Figura 39 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no PTFE.....	84
Figura 40 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pela rotação no UHMW. ....	86
Figura 41 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo avanço no UHMW.....	87
Figura 42 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo ângulo de ponta da broca no UHMW. ....	87
Figura 43 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pela rotação no POM.....	88
Figura 44 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo avanço no POM. ....	89
Figura 45 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo ângulo de ponta da broca no POM. ....	89
Figura 46 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pela rotação no PTFE. ....	90
Figura 47 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo avanço no PTFE. ....	91
Figura 48 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo ângulo de ponta da broca no PTFE.....	91
Figura 49 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no UHMW. .....	94
Figura 50 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no POM...	95
Figura 51 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no PTFE..	96
Figura 52 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pela rotação no UHMW.....	98
Figura 53 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo avanço no UHMW. ....	98
Figura 54 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo ângulo de ponta da broca no UHMW. ....	99
Figura 55 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pela rotação no POM. ....	100
Figura 56 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo avanço no POM. ....	100
Figura 57 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo ângulo de ponta da broca no POM. ....	101

Figura 58 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pela rotação no PTFE.....	102
Figura 59 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo avanço no PTFE.....	102
Figura 60 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo ângulo de ponta da broca no PTFE.....	103
Figura 61 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no UHMW.....	106
Figura 62 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no POM.....	107
Figura 63 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no PTFE.....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de controle do experimento com seus respectivos níveis.....	24
Tabela 2 - Ocorrência e produção industrial de um polímero na história, Canevarolo (2002). .....	26
Tabela 3 - Tabela a ser preenchida durante o ensaio.....	68
Tabela 4 - Arranjo ortogonal L <sub>9</sub> . .....	71
Tabela 5 - Tabela com os dados da força máxima de avanço Fz no UHMW. ....	73
Tabela 6 - Tabela com os dados da força de avanço Fz no POM.....	75
Tabela 7 - Tabela com os dados da força de avanço Fz no PTFE.....	77
Tabela 8 - Tabela com os valores de máximo, mínimo e delta (diferença entre máximo e mínimo) para a força máxima de avanço em cada material. ....	80
Tabela 9 - Força máxima de avanço para cada material no arranjo ortogonal L <sub>9</sub> de Taguchi. ....	81
Tabela 10 - Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no UHMW.....	82
Tabela 11 - Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no POM. ....	83
Tabela 12 - Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no PTFE. ....	84
Tabela 13 - Tabela com os dados da rugosidade média Ra no UHMW.....	86
Tabela 14 - Tabela com os dados da rugosidade média Ra no POM. ....	88
Tabela 15 - Tabela com os dados da rugosidade média Ra no PTFE. ....	90
Tabela 16 - Rugosidade média para cada material no arranjo ortogonal L <sub>9</sub> de Taguchi.....	93

Tabela 17 - Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no UHMW.....	94
Tabela 18 - Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no POM. ....	95
Tabela 19 - Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no PTFE.....	96
Tabela 20 - Tabela com os dados do desvio de circularidade no UHMW.....	97
Tabela 21 - Tabela com os dados do desvio de circularidade no POM.....	99
Tabela 22 - Tabela com os dados do desvio de circularidade no PTFE.....	101
Tabela 23 – Desvio de circularidade para cada material no arranjo ortogonal L <sub>9</sub> de Taguchi.....	105
Tabela 24 - Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no UHMW.....	105
Tabela 25 - Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no POM.....	106
Tabela 26 - Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no PTFE.....	107

## LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

$A'\alpha$	Superfície secundária de folga
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	“ <i>American Society for Testing and Materials</i> ” (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
$A\alpha$	Superfície principal de folga
$A\gamma$	Superfície de saída
BV	Borracha Vulcanizada
D	Diâmetro
Fz	Força na direção Z
HB	“ <i>Higher is best</i> ” (Quanto maior melhor)
L	Comprimento
$L_9$	Arranjo ortogonal
LB	“ <i>Lower is best</i> ” (Quanto menor melhor)
$L_e$	Comprimento de amostragem
$L_m$	Percurso de medição
$L_n$	Percurso final
$L_t$	Percurso de apalpamento
$L_v$	Percurso inicial
mm/ver	Milímetro por revolução
NB	“ <i>Nominal is best</i> ” (Nominal é melhor)
NBR	Norma Brasileira
PA	Poliamida (NYLON)

PAN	Poliacrilonitrila
PC	Policarbonato
PEAD(HDPE)	Polietileno de alta densidade
PEBD(LDPE)	Polietileno de baixa densidade
PET	Poliéster
POM	Poliacetal
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PTFE	Politetrafluoretileno (Teflon)
PVC	Policloreto de vinila
$R_a$	Rugosidade média
Rpm	Rotação por minuto
$R_t$	Rugosidade total
$R_z$	Média das distâncias verticais
$r_\epsilon$	Raio de quina
S	Aresta principal de corte
S/N	Sinal-ruído
S'	Aresta secundária de corte
$T_f$	Temperatura de fusão
$T_v$	Temperatura de transição vítrea
UHMW	“ <i>Ultra High Molecular Weight Polyethylene</i> ” (Polietileno de ultra-alto peso molecular)
$\alpha$	Ângulo de incidência
$\beta$	Ângulo de cunha
$\gamma$	Ângulo de saída

$\varepsilon$	Ângulo de quina
$\sigma$	Ângulo de ponta
$\psi$	Ângulo de gume transversal

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1	Objetivo geral.....	22
1.2	Objetivos específicos.....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>25</b>
2.1	Materiais poliméricos.....	25
2.1.1	<i>Conceito de polímero.....</i>	<i>26</i>
2.1.2	<i>Comportamento térmico dos polímeros.....</i>	<i>29</i>
2.1.3	<i>Viscoelasticidade dos polímeros.....</i>	<i>31</i>
2.1.4	<i>Fratura de polímeros.....</i>	<i>32</i>
2.2	Furação.....	32
2.2.1	<i>Formas construtivas das brocas helicoidais.....</i>	<i>35</i>
2.2.2	<i>Geometria da cunha de corte.....</i>	<i>36</i>
2.2.3	<i>Mecanismo de formação do cavaco.....</i>	<i>38</i>
2.2.4	<i>Força de corte na furação.....</i>	<i>39</i>
2.2.5	<i>Materiais para ferramentas.....</i>	<i>41</i>
2.2.5.1	<u>Aços rápidos</u> .....	41
2.2.5.2	<u>Metal duro</u> .....	42
2.2.6	<i>Desgaste em brocas helicoidais.....</i>	<i>44</i>
2.3	Usinabilidade dos materiais.....	45
2.3.1	<i>Dureza e resistência mecânica.....</i>	<i>47</i>
2.3.2	<i>Ductilidade.....</i>	<i>47</i>
2.3.3	<i>Condutividade térmica.....</i>	<i>48</i>

<b>2.4</b>	<b>Tolerâncias de Forma e Tolerâncias de Posição .....</b>	<b>48</b>
<b>2.5</b>	<b>Método estatístico para projeto de experimento .....</b>	<b>55</b>
<b>2.5.1</b>	<b><i>Método de Taguchi</i> .....</b>	<b>55</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Corpos-de-prova.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2</b>	<b>Ferramentas de corte .....</b>	<b>61</b>
<b>3.3</b>	<b>Centro de usinagem .....</b>	<b>62</b>
<b>3.4</b>	<b>Sistema de medição de esforços de usinagem .....</b>	<b>62</b>
<b>3.5</b>	<b>Rugosímetro.....</b>	<b>62</b>
<b>3.6</b>	<b>Máquina de medição por coordenadas .....</b>	<b>63</b>
<b>3.7</b>	<b>Sistema de fixação .....</b>	<b>63</b>
<b>3.8</b>	<b>Método.....</b>	<b>64</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>4.1</b>	<b>Força máxima de avanço (Fz) .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2</b>	<b>Acabamento superficial nas paredes dos furos .....</b>	<b>86</b>
<b>4.3</b>	<b>Desvio de circularidade nos furos.....</b>	<b>97</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>110</b>
<b>5.1</b>	<b>Proposta de continuidade de trabalho .....</b>	<b>111</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>112</b>
	<b>ANEXOS....</b>	<b>117</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais são provavelmente mais participantes em nossa cultura do que a maioria imagina. Transportes, habitação, vestuário, comunicação, recreação, produção de alimentos, ou seja, cada segmento de nossas vidas diárias é influenciado em maior ou menor grau pelos materiais. Historicamente, o desenvolvimento e o avanço das sociedades têm estado intimamente ligados às habilidades dos seus membros em produzir e manipular materiais para satisfazer as suas necessidades. As civilizações antigas possuíam um número limitado de materiais que eram encontradas de forma natural: pedra, madeira, argila, peles. Com o tempo foram desenvolvidas técnicas para a produção de materiais que possuíam propriedades superiores.

O desenvolvimento de muitas tecnologias que tornam nossa vida cotidiana mais confortável tem estado intimamente associado com a acessibilidade a materiais adequados. Segundo Callister (2002), um avanço na compreensão de um tipo de material é frequentemente o precursor da progressão escalonada de uma tecnologia. Por exemplo, os automóveis não teriam sido possíveis sem a disponibilidade de aço a baixo custo ou de algum outro substituto comparável. Em nossos tempos, dispositivos eletrônicos sofisticados dependem de componentes que são feitos a partir dos materiais chamados semicondutores.

Muitos cientistas experimentais ou engenheiros sejam eles mecânicos, civis, químicos ou eletricitistas, irão uma vez ou outra ficar expostos a um problema de projeto que envolva materiais. Os exemplos podem incluir uma engrenagem de transmissão, a estrutura para um edifício, um componente de uma refinaria de petróleo, ou um circuito integrado.

Muitas vezes, um problema de materiais consiste na seleção do material correto dentre muitos milhares de materiais disponíveis. Existem vários critérios nos quais a decisão final

está normalmente baseada. Em primeiro lugar, as condições de serviço devem ser caracterizadas, uma vez que estas irão ditar as propriedades exigidas do material. Somente em raras ocasiões é que um material possui a combinação máxima ou ideal de propriedades. Desta forma, pode ser necessário abrir mão de uma característica por outra. O exemplo clássico envolve a resistência e a ductibilidade, normalmente um material que possui uma alta resistência terá apenas uma ductibilidade limitada. Em tais casos, pode ser necessário um compromisso razoável entre duas ou mais propriedades.

Uma segunda consideração de seleção é qualquer deterioração das propriedades dos materiais que possa ocorrer durante a operação em serviço. Por exemplo, reduções significativas na resistência mecânica podem resultar da exposição a temperaturas elevadas ou ambientes corrosivos.

Por fim, provavelmente a consideração dominante estará relacionada aos fatores econômicos, qual o preço do produto acabado? Pode ser encontrado um material que possua o conjunto ideal de propriedades, mas que seja proibitivamente caro. O custo de uma peça acabada também inclui quaisquer despesas incorridas durante a fabricação para produzir a forma desejada.

Deste modo, os processos de fabricação, suas ferramentas, os parâmetros desses processos, também precisam estar correlacionados para alcançar o objetivo final, peça acabada atendendo a todos os requisitos de projeto no menor custo possível. Fabricar é transformar matérias-primas em produtos acabados, por vários processos, seguindo planos bem organizados, em todos os aspectos, Faria (2007). A escolha de um método particular sobre outros vai depender de um grande número de fatores. Devem ser considerados, na seleção do processo, fatores como: tipo de material e suas propriedades; propriedades finais desejadas; tamanho, forma e complexidade do componente; tolerâncias e acabamento superficial requerido; processo subsequente envolvido; projeto e custo de ferramental; efeito

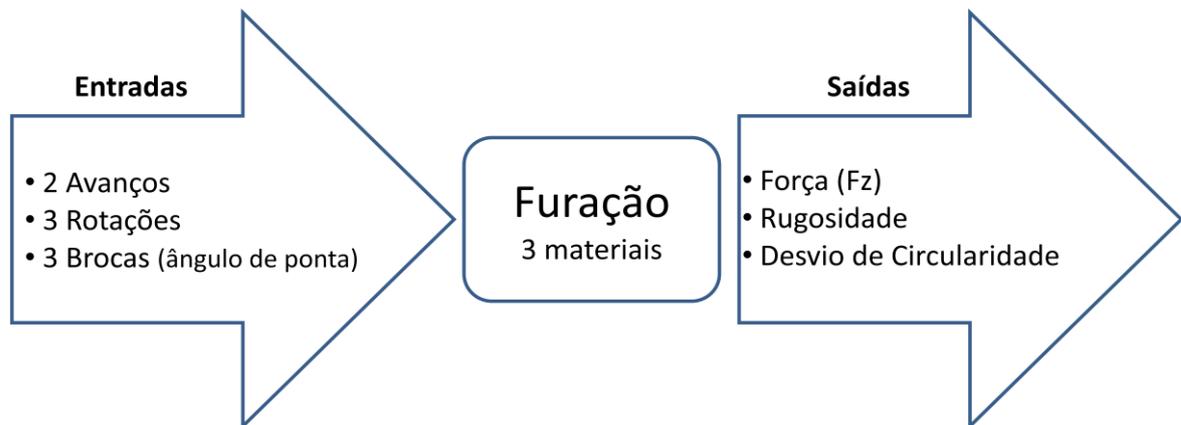
do material na vida da ferramenta ou matriz; resíduos gerados e seu valor; disponibilidade do equipamento e experiências operacionais; “*lead time*” necessário para iniciar produção; número de partes requeridas e taxa de produção desejada; custo total de processamento, entre outros, Machado e Silva (1999).

Um projeto industrial completo cujos experimentos identificam todas as combinações possíveis para uma dada configuração, envolve geralmente um número significativo de fatores, resultando em um grande número experimentos. Para reduzir o número de experimentos a um nível prático, somente um conjunto pequeno de todas as possibilidades é selecionado. O método de selecionar um número limitado de experimentos, que produza a maioria das informações, é conhecido como fração parcial do experimento. A análise de Taguchi fornece um conjunto especial de diretrizes gerais de projeto para experimentos que envolvem muitas aplicações. Ela investiga como parâmetros diferentes afetam a média e a variância de desempenho do processo e suas características. O projeto experimental pelo método de Taguchi envolve arranjos ortogonais para organizar os parâmetros que afetam o processo e os níveis em que devem ser variados. Ela determina fatores que afetam mais a qualidade do produto com um mínimo de quantidade de experimentos, assim, causando a economia de tempo e a economia de recursos.

De acordo com o cenário apresentado, a importância de relacionar materiais, processo de fabricação, ferramental, atendimento a requisitos de projeto (qualidade) e custo, faz com que este trabalho busque achar qual o grau de influência desses parâmetros para o produto acabado.

## 1.1 Objetivo geral

Através do desenvolvimento deste trabalho pretende-se analisar e discutir a influência dos parâmetros de controle com seus respectivos níveis para a melhor resposta na furação destes polímeros. A Figura 1 mostra as entradas a serem controladas e as saídas a serem medidas para se chegar a uma conclusão ao final do experimento da combinação das entradas, parâmetros que causam maior impacto e proporcionam a melhor combinação na saída, em resposta a estes parâmetros.



**Figura 1 - Parâmetros de entrada a serem controlados e resposta a serem mensurados no presente trabalho.**

**Fonte: Dados da pesquisa.**

## 1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Identificar o grau de influência dos parâmetros de entrada em relação à resposta desvio geométrico de circularidade. Considerando que quanto menor o desvio melhor é a resposta.
- Identificar o grau de influência dos parâmetros de entrada em relação à resposta acabamento superficial. Considerando que quanto menor a rugosidade nas paredes dos furos melhor é a resposta.
- Identificar o grau de influência dos parâmetros de entrada em relação à resposta força de avanço na furação. Considerando que quanto menor a força de avanço na furação melhor é a resposta.
- Aplicar o método de Taguchi para análise.

O meio para levantar os dados para alcançar estes objetivos será a furação utilizando as combinações de parâmetros e seus respectivos níveis. Com isso temos dois parâmetros com três níveis e um parâmetro com dois níveis, conforme mostra a tabela 1, para três tipos de materiais diferentes: “*Ultra High Molecular Weight Polyethylene*” Polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMW), Poliacetal (POM) e Politetrafluoretileno (PTFE), um total de 54 furos, com uma replicata, o que totaliza 108 furos.

**Tabela 1**  
**Parâmetros de controle do experimento com seus respectivos níveis.**

Fator de controle	Nível			Unidade
	1	2	3	
<b>A</b> Avanço	0,05	0,15		mm/rev
<b>B</b> Rotação	1000	3000	5000	rpm
<b>C</b> Ângulo de ponta da broca	85	100	130	graus

**Fonte: Dados da pesquisa.**

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Materiais poliméricos

Segundo Canevarolo (2002), o primeiro contato do homem com materiais resinosos e graxas extraídas e/ou refinadas se deu na antiguidade, com os egípcios e os romanos, que os usaram para carimbar, colar documentos e vedar vasilhames. No século XVI, com o advento dos descobrimentos, espanhóis e portugueses tiveram o primeiro contato com o produto extraído de uma árvore natural das Américas (*Hevea brasiliensis*). Esse extrato, produto da coagulação e secagem do látex, apresentava características de alta elasticidade e flexibilidade desconhecidas até então. Levado para a Europa adquiriu o nome de borracha pela sua capacidade de apagar marcas de lápis. Sua utilização foi bastante restrita até a descoberta da vulcanização por Charles Goodyear, em 1839. A vulcanização, feita principalmente com enxofre, confere a borracha as características de elasticidade, não-pegajosidade e durabilidade tão comuns nas aplicações dos dias atuais. Em 1846, Christian Schönbian, químico alemão, tratou o algodão com ácido nítrico, dando origem à nitrocelulose, primeiro polímero semisintético. A tabela 2 mostra as datas da primeira ocorrência de um polímero e da primeira produção industrial.

**Tabela 2**  
**Ocorrência e produção industrial de um polímero na história.**

<b>Polímero</b>		<b>1ª Ocorrência</b>	<b>1ª Prod. Industrial</b>
<b>PVC</b>	Policloreto de vinila	1915	1933
<b>PS</b>	Poliestireno	1900	1936/7
<b>PEBD (LDPE)</b>	Polietileno de baixa densidade	1933	1939
<b>NYLON</b>	Poliamida	1930	1940
<b>PEAD (HDPE)</b>	Polietileno de alta densidade	1953	1955
<b>PP</b>	Polipropileno	1954	1959
<b>PC</b>	Policarbonato	1953	1958

Fonte: Canevarolo (2002).

### **2.1.1 Conceito de polímero**

A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição da cadeia polimérica). Assim, um polímero é a macro molécula composto por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominada meros, ligados por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente. De acordo com Canevarolo (2002), podem-se dividir os polímeros em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras.

Plásticos: material polimérico sólido na temperatura ambiente, os quais podem ser termoplásticos ou termorrígidos. Os termoplásticos são polímeros que, sob o efeito de temperatura e pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados nestas condições. Retirada a solitação, temperatura e pressão, se solidificam adquirindo a forma do molde. Novas aplicações de temperatura e pressão reiniciam o processo, portanto são recicláveis. São solúveis e possuem cadeia linear ou ramificada. Exemplo: PE, PP, PVC, etc. Já os

termorrígidos, também conhecidos como termofixos, termoendurecido, polímero em rede ou em retículo, são polímeros que, quando sujeitos a aplicações de temperatura e pressão, amolecem e fluem adquirindo a forma do molde, reagem quimicamente formando ligações cruzadas entre cadeias e se solidificam. Subseqüentes aplicações de temperatura e pressão não têm mais influência, tornando-os materiais insolúveis, infusíveis e não-recicláveis. Assim, os termorrígidos são moldados quando ainda na forma de pré-polímero (antes da cura, sem ligações cruzadas). Exemplo: Baquelite (resina de fenol-formaldeído), epóxi (araldite), etc.

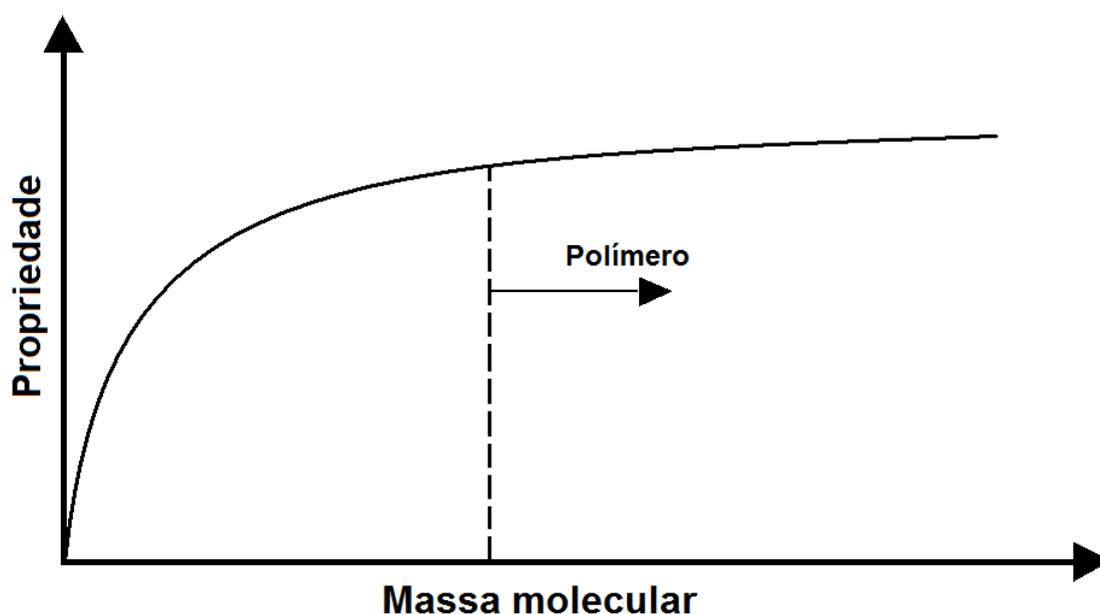
Borrachas: polímeros que, na temperatura ambiente, podem deformar-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retornando ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço. Para apresentar essas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas umas às outras, com uma baixa densidade de ligação cruzada. Isto define as seguintes propriedades básicas:

- a) Aceita grandes deformações, mantendo boa resistência mecânica e módulo de elasticidade quando deformado;
- b) Depois de retirado o esforço, recupera rapidamente a deformação;
- c) Possui recuperação total da deformação.

Como principal exemplo, tem-se a borracha vulcanizada (BV), termo genérico utilizado para qualquer elastômero ou mistura de elastômeros após a formação de ligações cruzadas (vulcanização).

Fibras: um termoplástico orientado (com um sentido longitudinal dito eixo principal da fibra), satisfazendo a condição geométrica de  $L/D \geq 100$ . A orientação das cadeias e dos cristais, feita de modo forçado durante a fiação, aumenta a resistência mecânica desta classe de materiais, tornando-os possíveis de serem usados na forma de fios finos. Como exemplos, tem-se as fibras de poliácrlonitrila (PAN), poliamidas (PA), poliéster (PET), etc.

Segundo Canevarolo (2002), muitas propriedades físicas são dependentes do comprimento da molécula e de sua massa molecular. Como polímeros normalmente envolvem uma larga faixa de valores de massa molecular, é de se esperar grande variação em suas propriedades. Alterações no tamanho da molécula, quando esta é pequena, provocam grandes mudanças nas suas propriedades físicas. Essas alterações tendem a ser menores com o aumento do tamanho da molécula, senão que para polímeros as diferenças ainda existem, mas são pequenas. Isso é vantajosamente usado, produzindo-se comercialmente vários tipos (grades) de polímeros para atender às necessidades particulares de uma dada aplicação ou técnica de processamento. A figura 2 apresenta, de forma esquemática, a variação de uma propriedade física geral com o aumento da massa molecular. A variação, neste caso, é assintótica (crescente, como apresentado, ou decrescente), tendendo para um valor que normalmente é o usado como referência.



**Figura 2 - Várias propriedades apresentadas pelos polímeros variam de forma característica assintótica com o aumento da sua massa molecular.**

Fonte: Canevarolo (2002).

### **2.1.2 Comportamento térmico dos polímeros**

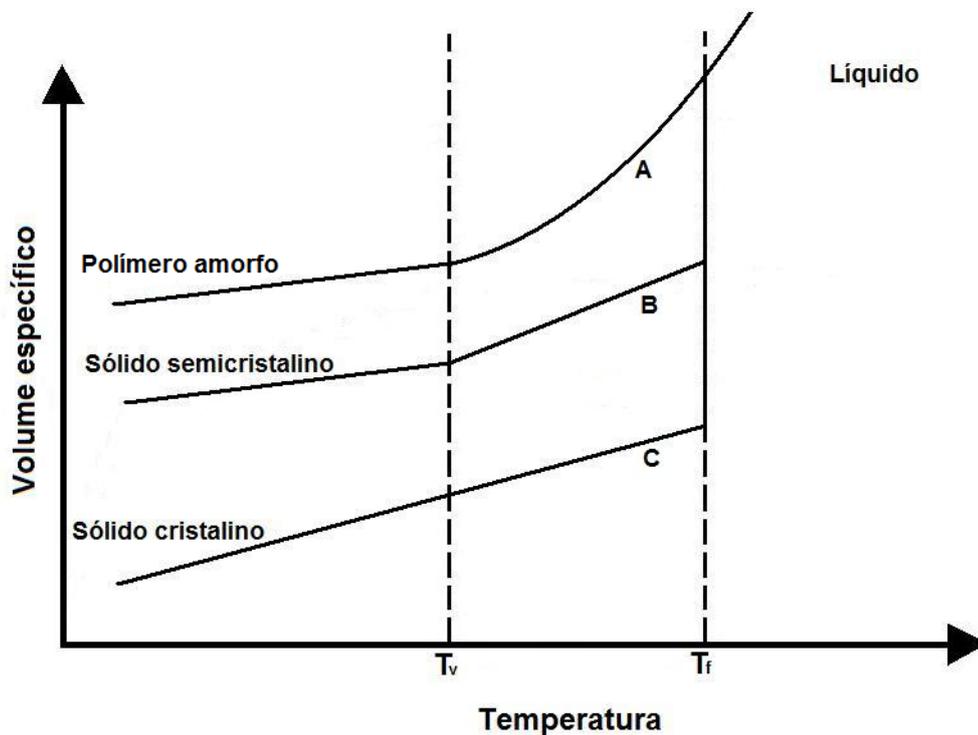
Canevarolo (2002) afirma que a mobilidade de uma cadeia polimérica determina as características físicas do produto, seja este um plástico duro e frágil, borrachoso e tenaz, ou um fluido viscoso. A mobilidade é função da agitação dos átomos nas moléculas, sendo esta diretamente proporcional à temperatura. Portanto, o conhecimento das características físico-químicas inerentes de um polímero é fundamental para a compreensão de seu desempenho termomecânico: normalmente, o polímero é processado em temperaturas altas quando apresenta o comportamento de um fluido viscoso e é utilizado em aplicações práticas com característica flexível ou rígida. Tal variabilidade de comportamento é uma característica sabiamente usada na indústria para a seleção do melhor material para uma dada aplicação.

De um modo geral, os polímeros podem apresentar pelo menos três temperaturas de transição importantes: transição vítrea, fusão cristalina e cristalização.

A cristalização é o processo segundo o qual, mediante resfriamento, uma fase sólida ordenada (isto é, cristalina) é produzida a partir de um líquido fundido que possui uma estrutura molecular altamente aleatória. A transformação por fusão é o processo inverso, que ocorre quando um polímero é aquecido. O fenômeno da transição vítrea ocorre quando polímeros amorfos ou que não sejam cristalizáveis, os quais quando resfriados a partir de um líquido fundido se tornam sólidos rígidos, porém ainda retêm a estrutura molecular desordenada característica do estado líquido; conseqüentemente, eles podem ser considerados como se fossem líquidos congelados (ou sólidos amorfos). Obviamente alterações nas propriedades físicas e mecânicas acompanham a cristalização, a fusão e a transição vítrea.

Segundo Callister (2002), as temperaturas de fusão e de transição vítrea são parâmetros importantes em relação às aplicações de serviço dos polímeros. Elas definem,

respectivamente, os limites de temperatura superior e inferior para numerosas aplicações. Estas temperaturas são determinadas para um polímero a partir de um gráfico do volume específico (o inverso da densidade) em função da temperatura. A figura 3 mostra o gráfico do volume específico em função da temperatura para um processo de resfriamento do fundido líquido, para polímeros totalmente amorfo (curva A), semicristalino (curva B) e cristalino (curva C).



**Figura 3 - Gráfico do volume específico em função da temperatura para um processo de resfriamento do fundido líquido, para polímeros totalmente amorfo (curva A), semicristalino (curva B) e cristalino (curva C).**

Fonte: Callister (2002).

Durante a fusão de um polímero irá necessariamente ocorrer um rearranjo das moléculas na transformação de um estado molecular ordenado para um estado molecular desordenado. A química e a estrutura molecular irão influenciar a habilidade das moléculas que compõem as cadeias de polímero para efetuar esses arranjos e, portanto, irão afetar também a temperatura de fusão.

Mediante o aquecimento através de temperatura de transição vítrea, o polímero amorfo sólido se transforma de um estado rígido para um estado de borracha. De maneira correspondente, as moléculas que estão virtualmente congeladas nas suas posições a uma temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea ( $T_v$ ) começam a experimentar movimentos de rotação e translação quando a temperatura está acima de  $T_v$ . Dessa forma, o valor da temperatura de transição vítrea dependerá das características moleculares que afetam a rigidez da cadeia. A maioria desses fatores e as influências destes são os mesmos apresentados pela temperatura de fusão.

### ***2.1.3 Viscoelasticidade dos polímeros***

Sabe-se que um polímero amorfo pode se comportar como um vidro a temperaturas baixas, como um sólido com as características de uma borracha a temperaturas intermediárias (acima da temperatura de transição vítrea) e como um líquido viscoso à medida que a temperatura é aumentada ainda mais. Para deformações relativamente pequenas, o comportamento mecânico a temperaturas baixas pode ser elástico, isto é, em conformidade com a lei de Hook. Nas temperaturas mais altas, prevalece o comportamento viscoso ou tal qual o de um líquido. Em temperaturas intermediárias, encontra-se um sólido com as características mecânicas que são uma combinação desses dois extremos. Essa condição é conhecida por viscoelasticidade.

### **2.1.4 Fratura de polímeros**

As resistências à fratura dos materiais poliméricos são baixas quando comparadas com aquelas para os metais e as cerâmicas. Como regra geral, o modo de fratura em polímeros termofixos é frágil. Em termos simples, associada com o processo de fratura está a formação de trincas nas regiões onde existe uma concentração localizada de tensões, isto é, riscos, entalhes e falhas afiladas. As ligações covalentes na estrutura em rede ou as ligações cruzadas são rompidas durante a fratura.

## **2.2 Furação**

Segundo El-Sonbaty et al (2004), os vários processos de furação, incluindo a furação convencional, por ultrassom, por feixe de laser, por jato de água, entre outros, tem sido proposto por diversas razões econômicas e de qualidade, mas a furação convencional é a técnica mais largamente usada na indústria atual. Os autores afirmam que o aumento da velocidade de corte e avanço irá reduzir o tempo de usinagem e, portanto, melhorar a produtividade. Por outro lado, vários defeitos foram observados devido a isto, aumento da força axial, torque e temperatura de corte.

Muitos usuários acreditam que o processo de furação convencional seja algo muito simples, bastando definir a rotação e o avanço corretos. Isso é parcialmente verdade, uma vez que existem outros fatores que podem interferir na qualidade de furação requerida por uma determinada peça ou produto.

A escolha da ferramenta deve ser a resultante de uma série de fatores que precisam ser observados, a seguir são caracterizados alguns dos pontos principais para esta escolha.

O primeiro ponto que precisa ser avaliado é a rigidez da fixação da peça na máquina. É possível ter uma excelente fixação da ferramenta (fixação rígida), com mandril hidráulico, mas se a peça não estiver fixada adequadamente, o processo de furação ficará bastante comprometido. Capello (2004) faz um estudo sobre a influência do modo de prender a peça de trabalho para a furação.

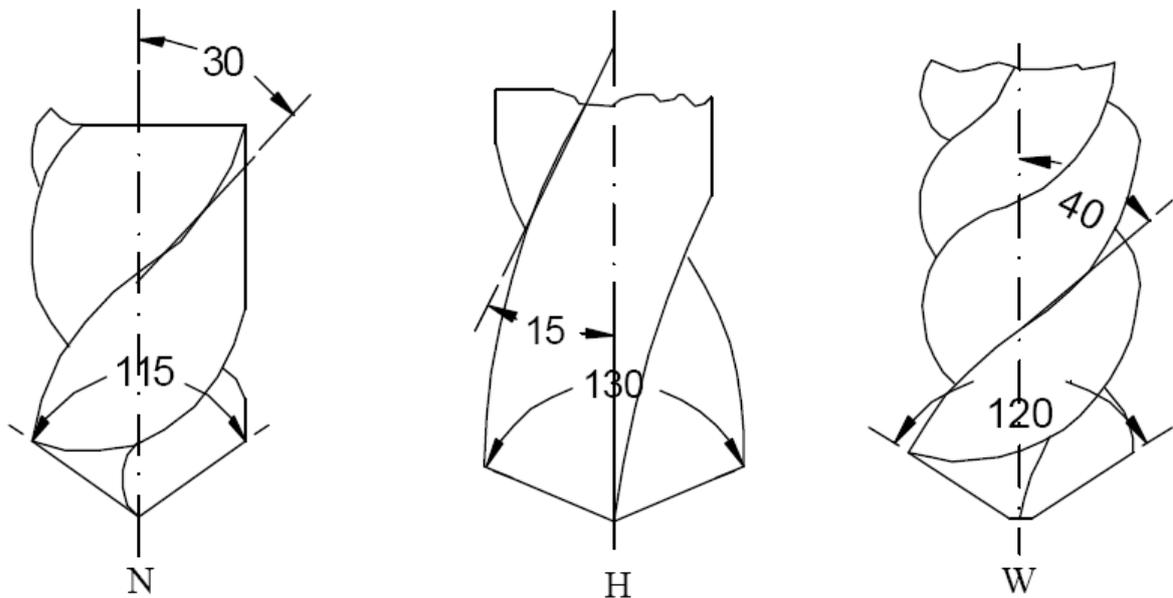
A rigidez da máquina, quando se trata de furação, é um fator que influencia a execução do processo. Abrão et al (2009) propõe uma metodologia para avaliar os desvios geométricos das máquinas-ferramenta através do seu produto acabado, mostrando a influência da rigidez da máquina-ferramenta para o seu produto. É necessário verificar a folga de barramento, os dispositivos de fixação adequados, o alinhamento de barramento (se necessário), o eixo árvore e até mesmo a curva de potência da máquina. Tudo isso dependendo do tipo de furação que será executado. Os principais riscos de uma fixação inadequada da ferramenta ou da peça são a quebra da ferramenta, diminuição de vida útil, tolerâncias inadequadas e custos elevados com trocas prematuras.

O inverso também pode acontecer. É possível ter uma excelente situação de fixação da peça, tanto de dispositivos, barramentos, etc., mas ter um sistema de fixação da ferramenta precário ou de má qualidade.

Portanto, antes de selecionar as ferramentas de acordo com a precisão requerida pelo projeto de uma determinada peça, é preciso considerar o sistema de fixação que possui. De nada adianta ter uma broca de altíssima precisão se essa tolerância vai ficar comprometida por outros fatores.

Outro ponto de grande influência para escolher a ferramenta ideal para o processo de furação é o material a ser usinado. Nas linhas de commodities dos principais fabricantes, há

basicamente três tipos de geometria para brocas de aço rápido: a tipo N, para aplicação universal, a geometria tipo H, para latão e suas ligas, e a tipo W, para materiais com formação de cavacos longos, como o alumínio e suas ligas. A figura 4 mostra estes tipos de geometria.

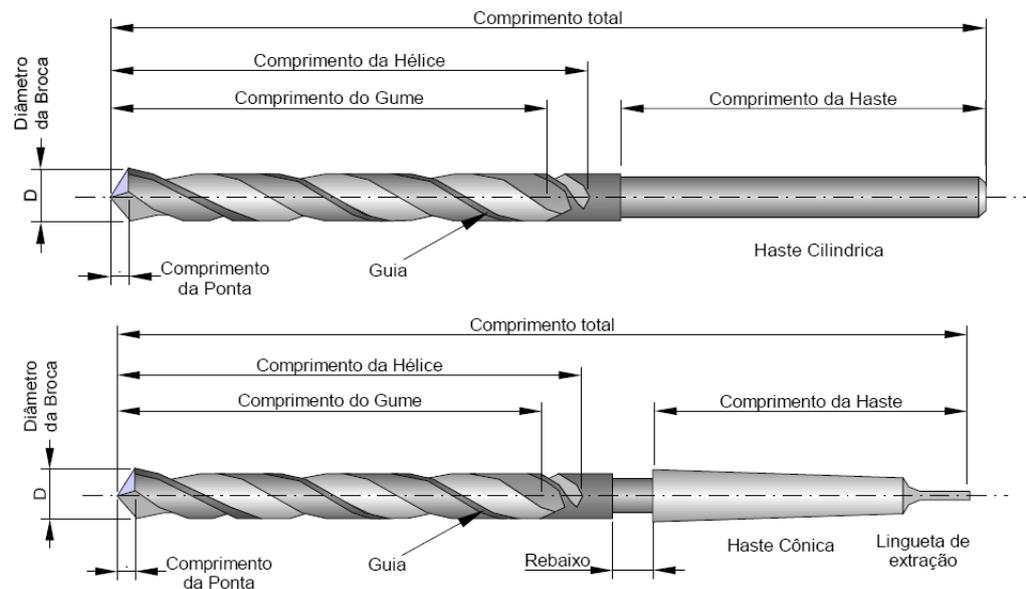


**Figura 4 - Classificação de brocas quanto ao ângulo de hélice.**  
**Fonte: Diniz, 2001.**

Por último, mas não menos importante, o fator profundidade de furação é outra variável que impacta diretamente a escolha da broca a ser utilizada. É importante considerar como será feito o escoamento dos cavacos para fora do canal produzido pela ferramenta. E quanto mais profundo, mais complicado é o processo.

### 2.2.1 Formas construtivas das brocas helicoidais

As brocas mais usadas na indústria são as brocas helicoidais. Estas podem ser divididas em três partes principais: ponta, corpo e haste. A figura 5 e a figura 6 mostram as partes de uma broca helicoidal segundo a norma NBR 6176.



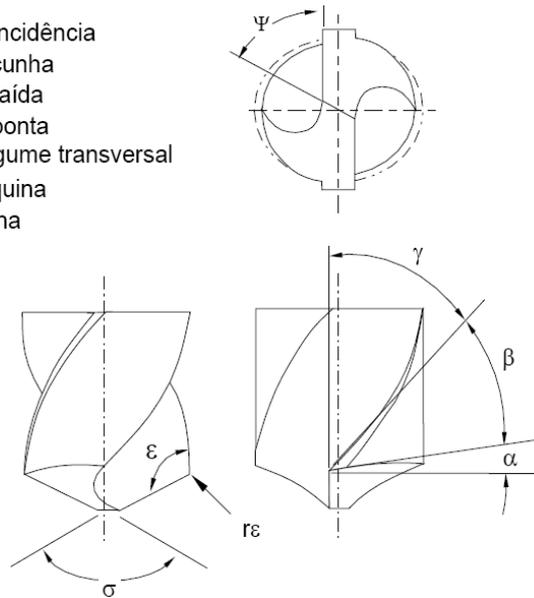
**Figura 5 - Partes de uma broca helicoidal.**  
**Fonte: Diniz, 2001.**

**Ponta:** onde se localizam as arestas principais e transversal de corte.

**Corpo:** parte da broca que contém os canais helicoidais.

**Haste:** onde é feita a fixação da ferramenta. De acordo com o mecanismo de fixação pode ser: cilíndrica, para montagem em mandril ou cônica, para montagem em cone morse.

$\alpha$  = ângulo de incidência  
 $\beta$  = ângulo de cunha  
 $\gamma$  = ângulo de saída  
 $\sigma$  = ângulo de ponta  
 $\Psi$  = ângulo do gume transversal  
 $\varepsilon$  = ângulo de quina  
 $r\varepsilon$  = raio de quina

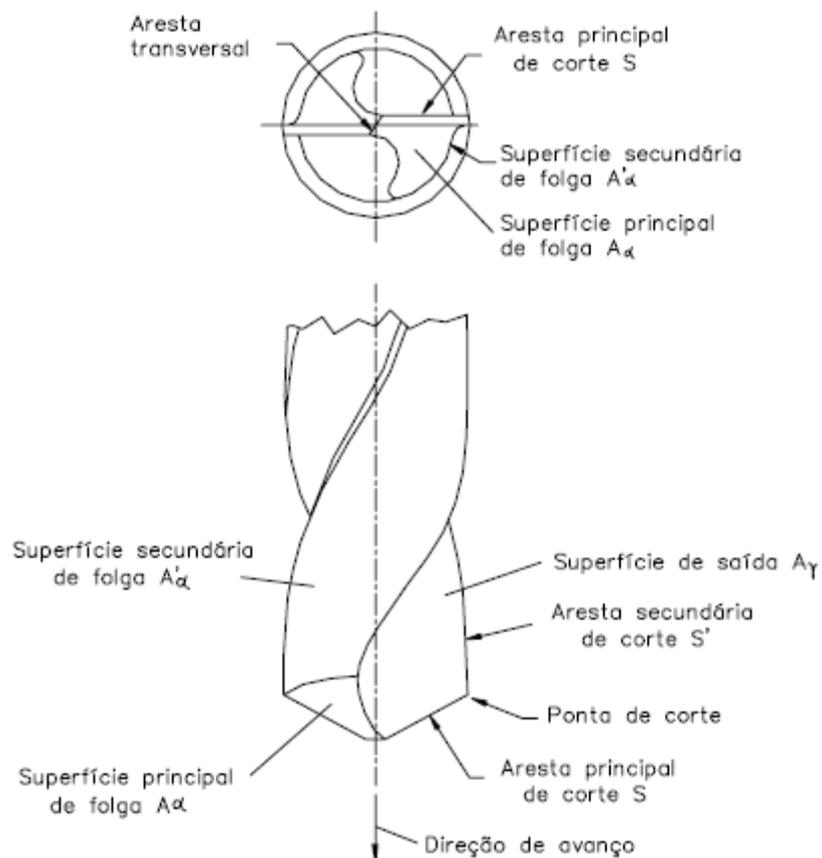


**Figura 6 - Partes de uma broca helicoidal (continuação).**  
**Fonte: Diniz, 2001.**

A superfície externa de uma broca helicoidal apresenta duas regiões, uma em cada aresta de corte, que possuem diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca. Estas regiões são chamadas guias, como mostra a figura 5. Possui duas funções básicas, guiar a broca dentro do furo e evitar que toda parede externa da broca atrite com as paredes do furo, diminuindo assim os esforços necessários.

### 2.2.2 Geometria da cunha de corte

As brocas helicoidais apresentam geralmente as seguintes partes construtivas, apresentadas na figura 7:



**Figura 7 - Arestas de corte e superfícies das pontas de uma broca helicoidal.**  
**Fonte: Diniz, 2001.**

A parte de corte é parte ativa da ferramenta constituída pelas suas cunhas de corte. A parte ativa da ferramenta é construída ou fixada sobre um suporte ou cabo da ferramenta, através do qual é possível fixar a ferramenta para a construção, afiação, reparo, controle e trabalho. Pode-se ter, portanto, uma superfície de apoio da ferramenta, ou a ferramenta poderá ser fixada pelo seu eixo.

A cunha de corte é a cunha da ferramenta, formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga.

A superfície de saída ( $A\gamma$ ) é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoa durante sua saída da região do trabalho de usinagem.

A superfície principal de folga ( $A\alpha$ ) é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal.

A superfície secundária de folga ( $A'\alpha$ ) é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta de corte secundária e que defronta com a superfície em usinagem secundária.

Aresta principal de corte (S) é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal. Gera na peça a superfície em usinagem principal.

Aresta secundária de corte (S') é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície em usinagem secundária.

A ponta de corte é a parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro das duas arestas através de um chanfro.

### ***2.2.3 Mecanismo de formação do cavaco***

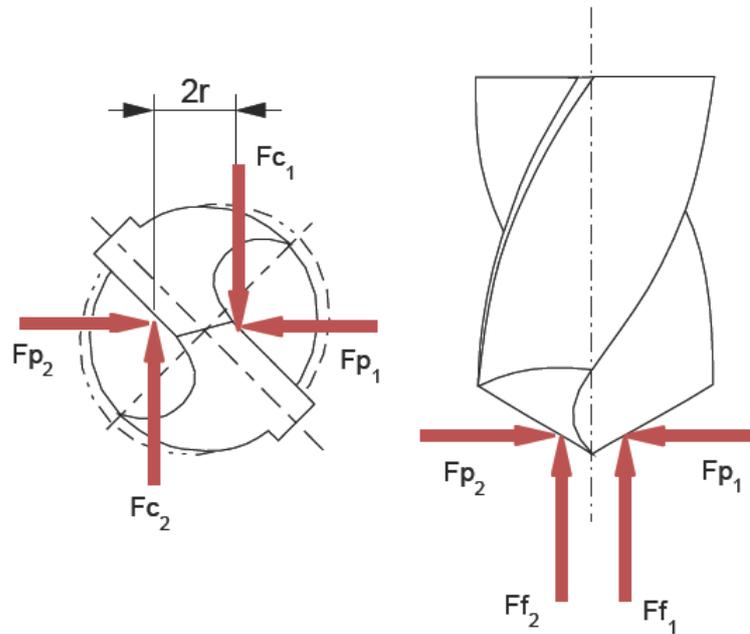
Diniz (2001) afirma que a formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, o acabamento superficial, a exposição do operador a risco de acidentes, entre outros. Assim, é fundamental induzir a geração de cavacos que tenham uma forma tal que sejam de fácil remoção do furo. Se o cavaco formado for em fita, será muito difícil extraí-lo do furo. Cavacos helicoidais ou em lascas são os que mais facilmente podem ser removidos dos furos.

A remoção do cavaco pode ainda ser auxiliada pela utilização de um ciclo de furação que retire freqüentemente a broca de dentro do furo durante o processo de corte e/ou pelo insuflamento de fluido de corte sob pressão diretamente no fundo do furo, através de canais especialmente construídos na broca.

O aumento do avanço facilita a quebra do cavaco e, conseqüentemente, a remoção do cavaco de dentro do furo.

#### **2.2.4 Força de corte na furação**

Segundo Stoeterau (2004), os esforços verificados em furação são basicamente três. A força de avanço ocorre na direção axial da ferramenta. A força passiva ocorre na direção do raio da ferramenta, as componentes observadas nas duas arestas de corte anulam-se devido à simetria da ferramenta. O momento torçor é tangencial a ferramenta, ocorre devido à rotação da broca. A figura 8 mostra as forças envolvidas num processo de furação.



**Figura 8 - Forças no processo de furação.**  
**Fonte: Stoeterau, 2004.**

Estes esforços são observados devido: a resistência ao corte do material nas duas arestas principais de corte, a resistência ao corte e esmagamento do material na aresta transversal de corte e a resistência devido ao atrito das guias com a parede do furo e entre a superfície de saída da broca e o cavaco.

Uma broca helicoidal durante o corte é basicamente submetida a esforços de torção, devido à rotação da broca, e a esforços de compressão devido ao avanço da broca. Vale salientar que, quando as arestas principais da broca não estão igualmente afiadas, o esforço de corte de uma aresta é diferente do esforço da outra aresta, podendo causar flexão da ferramenta.

### 2.2.5 *Materiais para ferramentas*

Para uma seleção criteriosa do material da ferramenta a ser utilizado no processo de furação se faz necessário conhecer o material a ser furado, as condições da máquina operatriz, a geometria e dimensões da ferramenta e as condições de operação. Porém segundo Diniz (2001), independente de qualquer um desses fatores as principais características que o material da ferramenta precisa apresentar, seja de maior ou menor importância, são: dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade química.

#### 2.2.5.1 Aços rápidos

O Aço Rápido é um aço ferramenta de alta liga contendo tungstênio, molibidênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio. Este nome provém quando do seu desenvolvimento, início do século vinte (1905), pois era o material de ferramenta que suportava as maiores velocidades de corte. Segundo Diniz (2001), o Aço Rápido é um material tenaz, de elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente, se comparado com os aços carbono usados para ferramentas, podendo ser utilizado até em temperaturas de corte da ordem de 600°C.

A sua dureza a quente é diretamente proporcional aos elementos de liga dissolvidos durante o seu tratamento térmico. O tipo e o número de carbonetos duros que se formam são responsáveis pela resistência a abrasão. A sua tenacidade também depende dos elementos de liga e do grau de dissolubilidades destes. Em geral os aços rápidos resistentes a abrasão são

poucos tenazes e vice-versa. A figura 9 mostra a influencia de alguns dos elementos de liga no aço rápido.

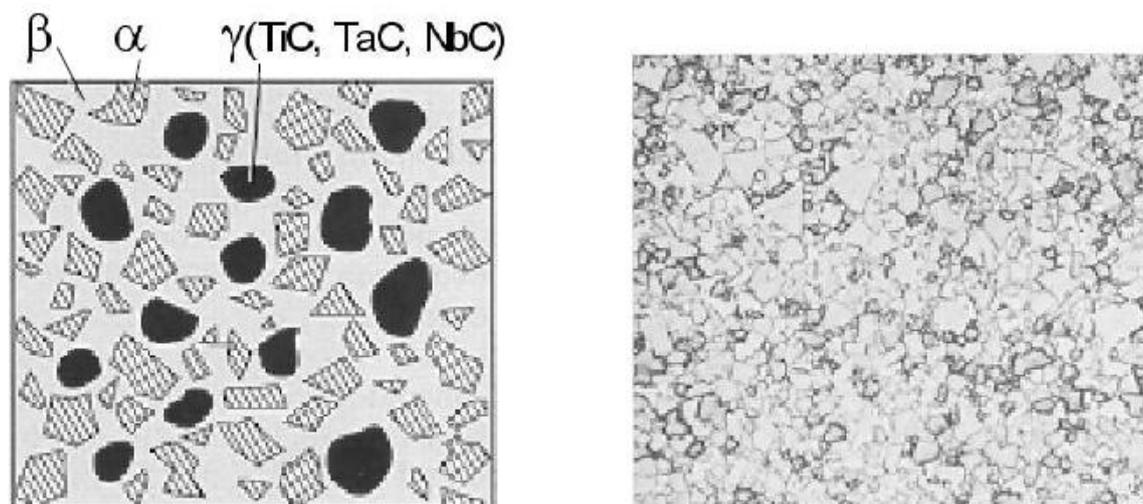
- **Tungstênio (W)**
  - formador de carbonetos
  - melhora revenimento
  - melhora resistência ao desgaste
- **Molibdênio (Mo)**
  - melhora temperabilidade
  - melhora tenacidade
  - substitui W
- **Vanádio (V)**
  - Formador de carbonetos
  - melhora resistência ao desgaste (resist. a quente)
  - usado para acabamento
- **Cobalto (Co)**
  - eleva temperatura de sensibilização a quente
  - melhora dureza a quente
  - melhor solubilidade de carbonetos

**Figura 9 - Influência dos elementos de liga nos Aços Rápidos.**  
Fonte: Stoeterau, 2004.

#### 2.2.5.2 Metal duro

O metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de materiais refratários, sinterizados com um ou mais metais, ferro, níquel ou cobalto, formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. As partículas duras são carbonetos de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbonetos, como carbonetos de titânio, tântalo e nióbio. O tamanho destas partículas varia geralmente entre 1 a

10  $\mu\text{m}$  e ocupam de 60 a 95% do volume do material. O metal aglomerante é, na grande maioria das vezes, o cobalto. A figura 10 mostra a estrutura de um metal duro.



onde:

$\alpha$  = carbonetos de tungstênio

$\beta$  = cobalto

$\gamma$  = carbonetos de titânio, tântalo e nióbio

**Figura 10 - Estrutura do Metal Duro.**

**Fonte: Stoeterau, 2004.**

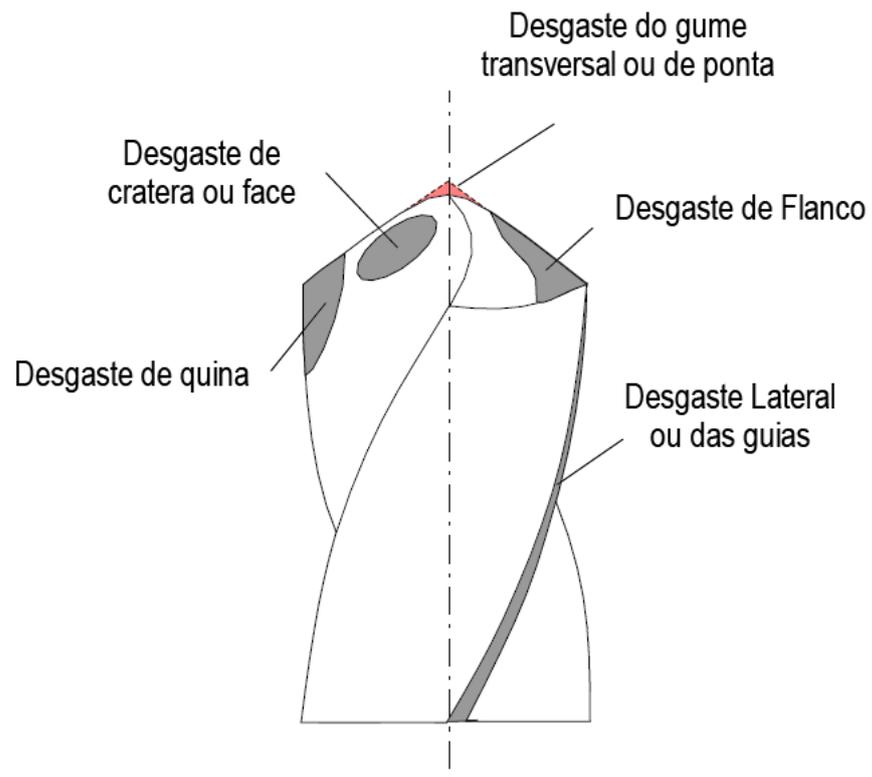
Dureza em altas temperaturas e a tenacidade, capacidade de resistência ao choque, como visto anteriormente, são propriedades que se exigem de qualquer material utilizado em ferramentas e que se encontram no metal duro. Outra característica na aplicação do metal duro é o seu coeficiente de dilatação térmica. Segundo Diniz (2001), o valor deste coeficiente para o metal duro é de cerca da metade do valor do aço, em temperaturas desde a ambiente até 675°C.

Por funcionar mais eficientemente a altas velocidades de corte e por resistirem a mais altas temperaturas de corte que qualquer aço rápido, a utilização de ferramentas de metal duro exige máquinas com uma gama de velocidades maiores e, também, máquinas mais rígidas, de

forma a prevenir a vibração que causaria choques entre ferramenta e peça, os quais poderiam quebrar a ferramenta com mais facilidade do que uma ferramenta de aço rápido, por serem mais frágeis.

### 2.2.6 Desgaste em brocas helicoidais

A figura 11 mostra os principais desgastes ocorridos em brocas helicoidais.



**Figura 11 - Desgaste em brocas helicoidais.**  
**Fonte: Stoeterau, 2004.**

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre a ferramenta e peça. Segundo Diniz (2001), este é o tipo de desgaste mais comum em

ferramentas de usinagem. Os desgastes de quina e das guias ocasionam a deterioração do acabamento superficial do furo e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que o furo mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. Estes desgastes são incentivados pelo aumento da velocidade de corte.

O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco. O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal se encontra com o desgaste de flanco. As ferramentas de metal duro recobertas, ferramentas cerâmicas e materiais de peça frágeis, que gera cavacos curtos, contribuem contra o desgaste de cratera.

O desgaste de ponta ou gume transversal é causado pela pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada a alta temperatura, gera deformação plástica da aresta de corte. Esta deformação provoca deficiências do controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial do furo. O crescimento desta deformação pode gerar a quebra da aresta de corte. Reduz a incidência deste desgaste pelo emprego de uma ferramenta com maior dureza a quente e maior resistência à deformação plástica, ou pela mudança de condições de usinagem e/ou geometria da ferramenta, visando à diminuição dos esforços e da temperatura de corte.

### **2.3 Usinabilidade dos materiais**

De acordo com Diniz (2001), a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão.

Em outras palavras, pode-se entender usinabilidade como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Entende-se como propriedades de usinagem de um material aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem, tais como vida da ferramenta, o acabamento superficial da peça, os esforços de corte, a temperatura de corte, a produtividade, as características do cavaco.

Pode-se ter um material que tenha uma boa usinabilidade quando se leva em conta uma propriedade de usinagem, como por exemplo, a vida da ferramenta, e não possuir boa usinabilidade quando se leva em conta outra propriedade, como por exemplo a rugosidade da peça usinada.

Segundo Diniz (2001), a usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, e sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (sejam a frio ou a quente) e do eventual encruamento.

Mas a usinabilidade não depende somente das condições intrínsecas do material, mas também das condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação e dos tipos de trabalhos executados pela ferramenta (operação empregada, corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta). Assim, um material pode ter um valor de usinabilidade baixo em certas condições de usinagem e um valor maior em outras condições de usinagem, por exemplo.

Diversos métodos são propostos para a medição do índice de usinabilidade. É comum se pensar no meio produtivo que a usinabilidade é uma propriedade intrinsecamente ligada à dureza do material da peça e à sua resistência mecânica. Assim, segundo esse raciocínio, um material macio é de boa usinabilidade e um material duro de baixa usinabilidade. Embora a dureza e a resistência mecânica sejam fatores bastante importantes, a quantidade de partículas duras, a microestrutura, a tendência ao empastamento do cavaco do material na superfície de

saída da ferramenta, entre outros, também o são. Por exemplo, pode-se ter um aço inoxidável tipo 303 (que possui sulfetos de manganês para melhorar sua usinabilidade) com dureza idêntica ao tipo 316, porém, a usinabilidade do primeiro é muito maior que a do segundo.

A seguir será descrito como algumas das propriedades dos materiais podem influenciar na usinabilidade.

### ***2.3.1 Dureza e resistência mecânica***

Valores baixos de dureza e resistência mecânica normalmente favorecem a usinabilidade. Porém, quando se tem materiais muito dúcteis (materiais que se deformam muito plasticamente antes de se romperem), a baixa dureza pode causar problemas, pois facilita a formação de aresta postiça de corte.

### ***2.3.2 Ductilidade***

Baixos valores de ductilidade são geralmente benéficos à usinabilidade. A formação de cavacos curtos é facilitada e se tem menor perda de energia com o atrito do cavaco-superfície de saída da ferramenta. Porém, em geral, consegue-se baixa ductilidade com alta dureza e vice-versa. Uma usinabilidade ótima se obtém com um compromisso entre dureza e ductilidade.

### **2.3.3 *Condutividade térmica***

Uma alta condutividade térmica do material da peça significa que o calor gerado pelo processo é rapidamente retirado da região de corte e, assim, a ferramenta não é excessivamente aquecida e, portanto, não se desgasta tão rapidamente. Então, uma alta condutividade térmica favorece a usinabilidade do material.

## **2.4 Tolerâncias de Forma e Tolerâncias de Posição**

Durante a fabricação, utilizando-se máquinas-ferramentas, surgem desvios nas peças de trabalho, provocadas pelas inexatidões das máquinas, tais como aqueles ocorridos devido à falta de rigidez do dispositivo de fixação, desgaste da ferramenta, etc. Tais desvios devem ser limitados e enquadrados em tolerâncias, de tal forma a não prejudicar o funcionamento das peças produzidas. Portanto, o projeto de uma determinada peça deve prever as tolerâncias geométricas, a fim de se obter a melhor qualidade funcional possível. A figura 12 mostra parâmetros que influenciam a qualidade de uma peça usinada.



**Figura 12 - Parâmetros que influenciam a qualidade de uma peça usinada.**  
 Fonte: Stoeterau, 2004.

Os desvios geométricos podem ser classificados em:

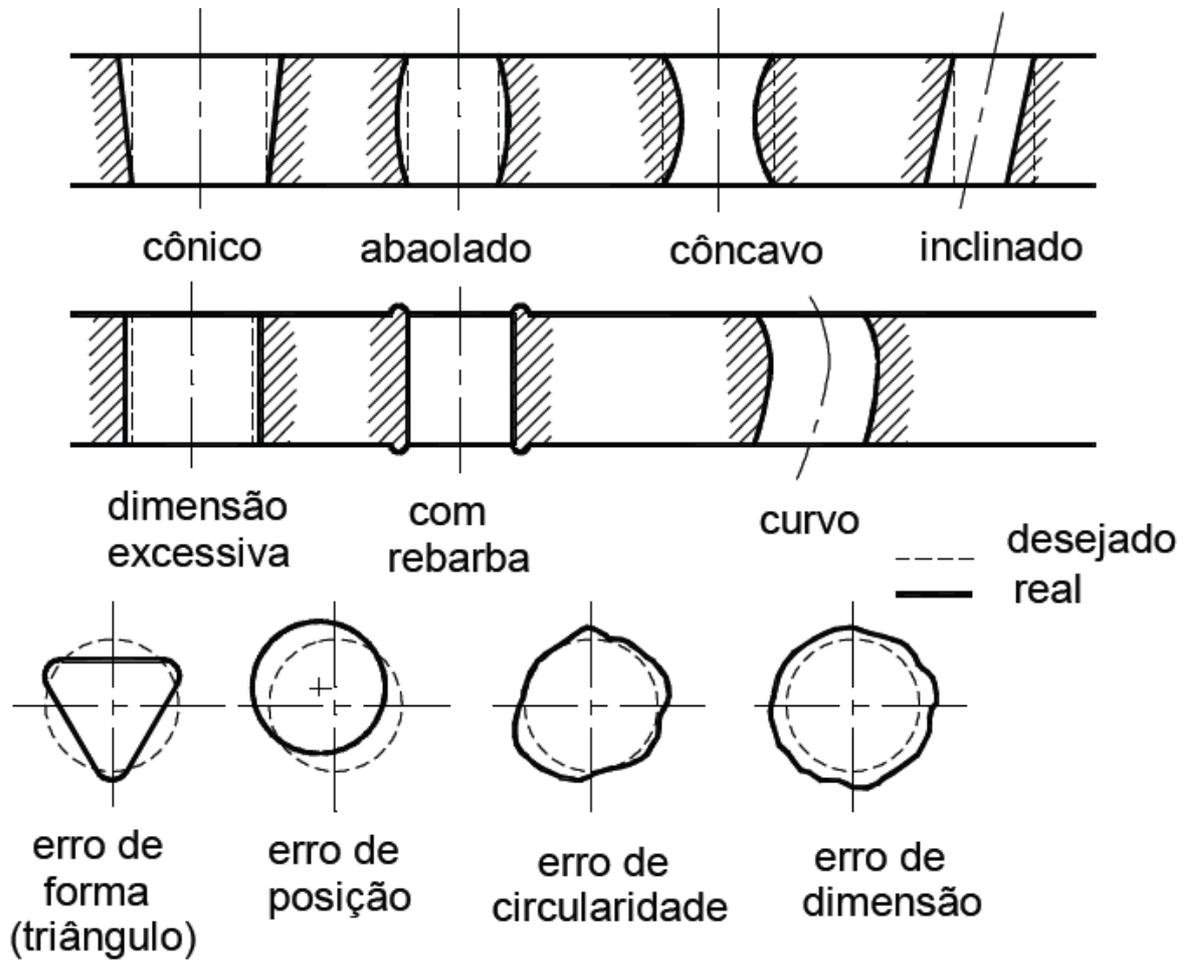
- a) Desvios macrogeométricos: reticidade, circularidade, cilndricidade, planeza, etc.;
- b) Desvios microgeométricos: rugosidade das superfícies;

Os desvios macrogeométricos são definidos pela norma ABNT NBR 6409, “Tolerâncias de forma e tolerâncias de posição” e os desvios microgeométricos pela norma ABNT NBR 6405, “Rugosidade das superfícies”.

A norma DIN 7184 apresenta de forma resumida os conceitos referentes ao assunto.

Os erros mais comuns na geometria dos furos são, como mostrados na figura 13:

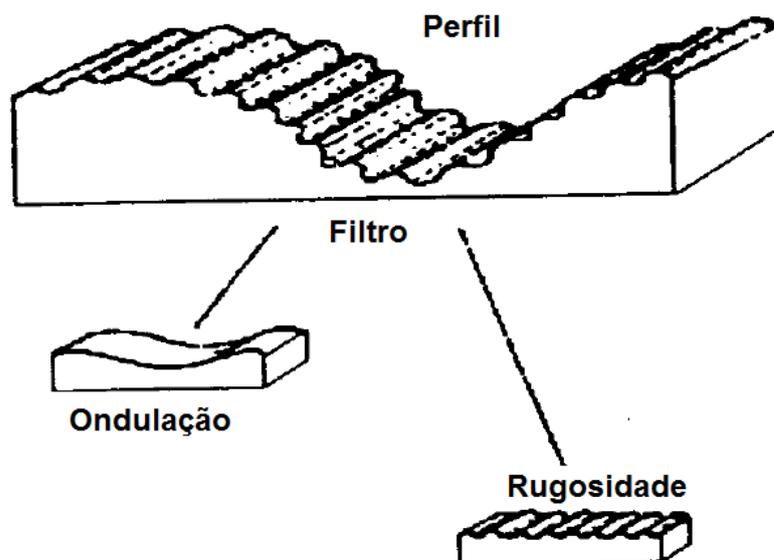
- Erros de forma: diâmetro não uniforme
- Rebarba: rebarba na entrada ou saída do furo
- Erros de posicionamento: deslocamento do centro do furo
- Erros de circularidade: seção circular distorcida
- Erros de dimensão: diâmetro resultante diferente da broca.



**Figura 13 - Erros mais comuns resultantes do processo de furação.**  
**Fonte: Stoeterau, 2004.**

A rugosidade ou textura primária é formada por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça e se encontra superposta ao perfil de ondulação.

A ondulação ou textura secundária é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento bem maior que sua amplitude surgida por imprecisões de movimentos dos equipamentos. A figura 14 mostra a rugosidade e a ondulação no perfil de uma peça.

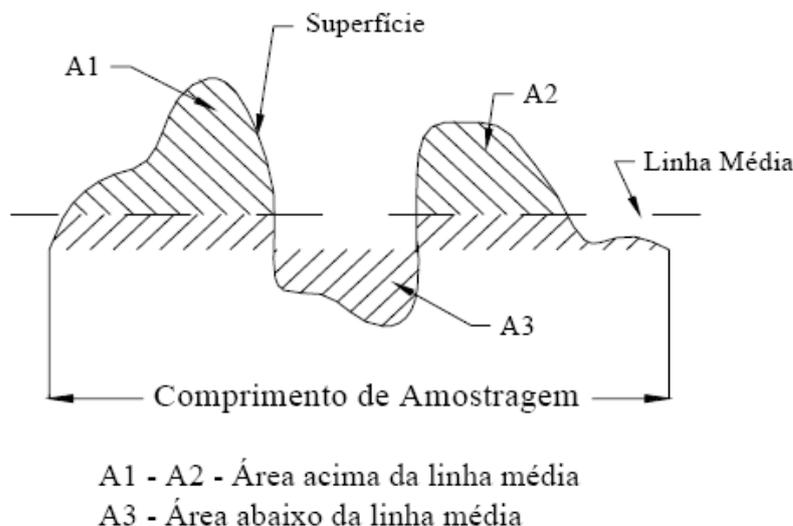


**Figura 14 - Perfil da peça: Rugosidade + Ondulações.**  
**Fonte: Palma, 2006.**

A textura superficial é medida através de diversos tipos de aparelhos (ópticos, laser, eletro-mecânicos), sendo mais utilizados os aparelhos eletro-mecânicos. Os aparelhos usados para medir rugosidade são chamados rugosímetros.

Para se efetuar a medição de uma rugosidade, deve-se definir alguns parâmetros utilizados em tais medições, de acordo com a norma ABNT NBR 6405. A referida norma define os termos e parâmetros necessários para a medição da rugosidade pelo sistema de apalpamento através de aparelhos eletro-mecânicos. O sistema adotado é o sistema de medição chamado de sistema M, visto que dentro da metrologia que controla superfícies, não se mede a dimensão de um corpo (metrologia dimensional) e sim os desvios em relação a uma forma ideal. Assim, tem-se que usar como linha de referência uma forma ideal, que no caso do sistema M é a linha média.

LINHA MÉDIA é definida como linha disposta paralelamente à direção do perfil, dentro do percurso de medição  $L_m$ , de modo que a soma das áreas superiores seja exatamente igual à soma das áreas inferiores, como mostra a figura 15.



**Figura 15 - Conceito de linha média.**  
Fonte: Palma, 2006.

PERCURSO INICIAL ( $L_v$ ) é a extensão da primeira parte do primeiro trecho apalpado, projetado sobre a linha média, não utilizado na avaliação. O trecho inicial tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas iniciais do sistema e a centragem do perfil de rugosidade.

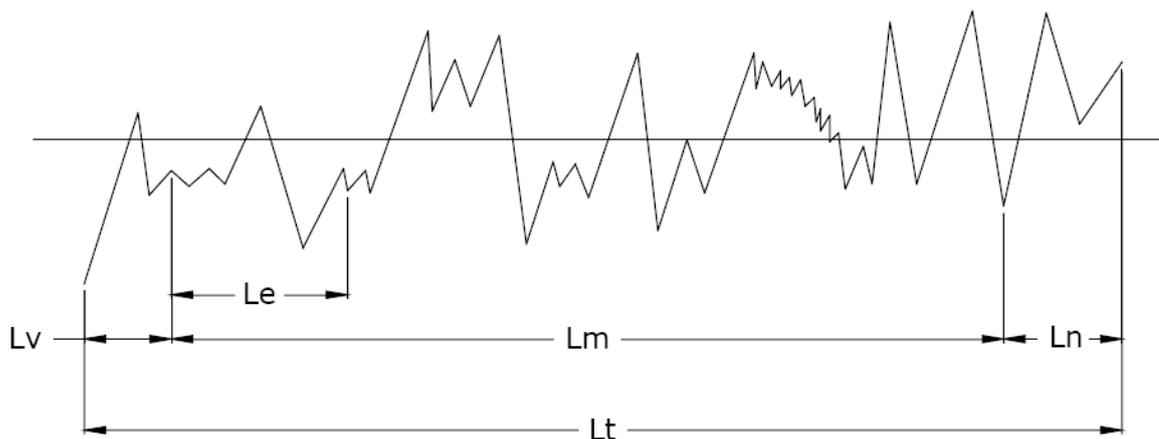
PERCURSO DE MEDIÇÃO ( $L_m$ ) é a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade usado diretamente na avaliação, projetado sobre a linha média.

COMPRIMENTO DE AMOSTRAGEM ( $L_e$ ) é tomado como um quinto do percurso de medição. O comprimento de amostragem deve ser suficiente para avaliar a rugosidade, isto é, deve conter todos os elementos representativos da rugosidade e excluir aqueles inerentes à ondulação. É de grande importância que esse comprimento de amostragem seja corretamente definido. Por exemplo, se o comprimento de amostragem for correto, conseguir-se-á isolar a rugosidade da ondulação, de tal forma que, se uma linha média for traçada para cada comprimento de amostragem e posteriormente alinhada, como resultado ter-se-á o perfil original com a ondulação filtrada. Se, caso contrário, o valor deste comprimento de amostragem for maior do que o necessário, incluirá valores do perfil de ondulação que

influenciarão os resultados da medição da rugosidade. Portanto, o comprimento de amostragem é o próprio “cut-off” citado anteriormente.

PERCURSO FINAL ( $L_n$ ) é a extensão da última parte do trecho apalpado, projetado sobre a linha média e não utilizado na avaliação. O trecho final tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição.

PERCURSO DE APALPAMENTO ( $L_t$ ) é a soma dos percursos inicial, de medição e final, como mostra a figura 16.

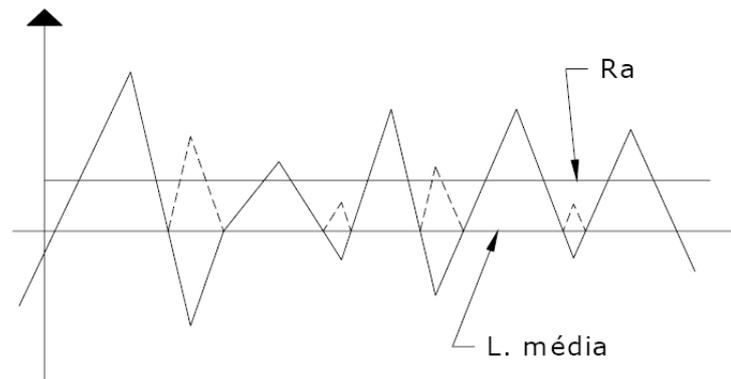


**Figura 16 - Conceitos de percursos durante o processo de medição de rugosidade.**  
**Fonte: Palma, 2006.**

Segundo Field (1995), o acabamento superficial está relacionado apenas com as irregularidades geométricas superficiais de materiais sólidos e também com as características dos instrumentos de medição. O acabamento superficial é definido em termos da rugosidade, ondulação, direção predominante das irregularidades e falhas. A medição da rugosidade tem sido tradicionalmente um dos principais métodos de verificação da qualidade superficial da peça. A rugosidade superficial consiste de irregularidades na superfície, geralmente inerentes ao processo de fabricação, tais como marcas de avanço produzidas durante a usinagem.

Irregularidades geométricas, tais como rugosidade e ondulações, podem ser medidas por uma variedade de instrumentos de medição incluindo os tipos de contato e sem contato. A técnica mais comum é medir a rugosidade com instrumentos de contato que fornecem valores numéricos de  $R_a$ ,  $R_t$  e  $R_z$ , entre outros.

A rugosidade média, denominada  $R_a$ , é possivelmente o mais antigo conceito de rugosidade ainda em uso. Sua disseminação pode ser atribuída à facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples. Sua definição pode ser expressa como o desvio médio de um perfil de sua linha média. Outra boa definição seria a distância média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento medido. A figura 17 mostra a rugosidade média do perfil de uma peça.



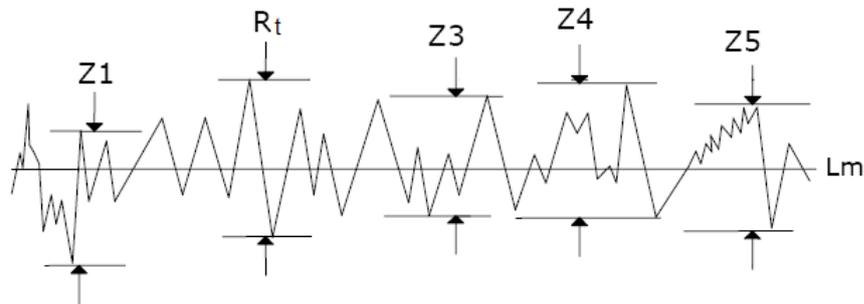
**Figura 17 - Rugosidade média  $R_a$ .**  
**Fonte: Palma, 2006.**

A rugosidade total  $R_t$ , ou rugosidade máxima é dada pela diferença entre o pico mais alto e a depressão mais baixa no comprimento considerado. Podendo ser um bom indicador da ocorrência de falhas no processo de fabricação.

O parâmetro  $R_z$  é definido com sendo a distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos, dentro de um comprimento medido. O parâmetro  $R_z$  fornece uma idéia mais clara para a monitoração da variação do acabamento superficial em um processo de fabricação. A média das distâncias verticais ( $R_z$ ) pode ser considerada como

sendo um parâmetro mais sensível à mudança no acabamento superficial em relação à  $R_a$ , isso se deve ao fato de que somente as alturas máximas de perfis, e não suas médias sejam comparadas e analisadas.

A figura 18 mostra a rugosidade média ( $R_z$ ) e total ( $R_t$ ) do perfil de uma peça.



**Figura 18 - Rugosidades, média ( $R_z$ ) e total ( $R_t$ ).**  
**Fonte: Palma, 2006.**

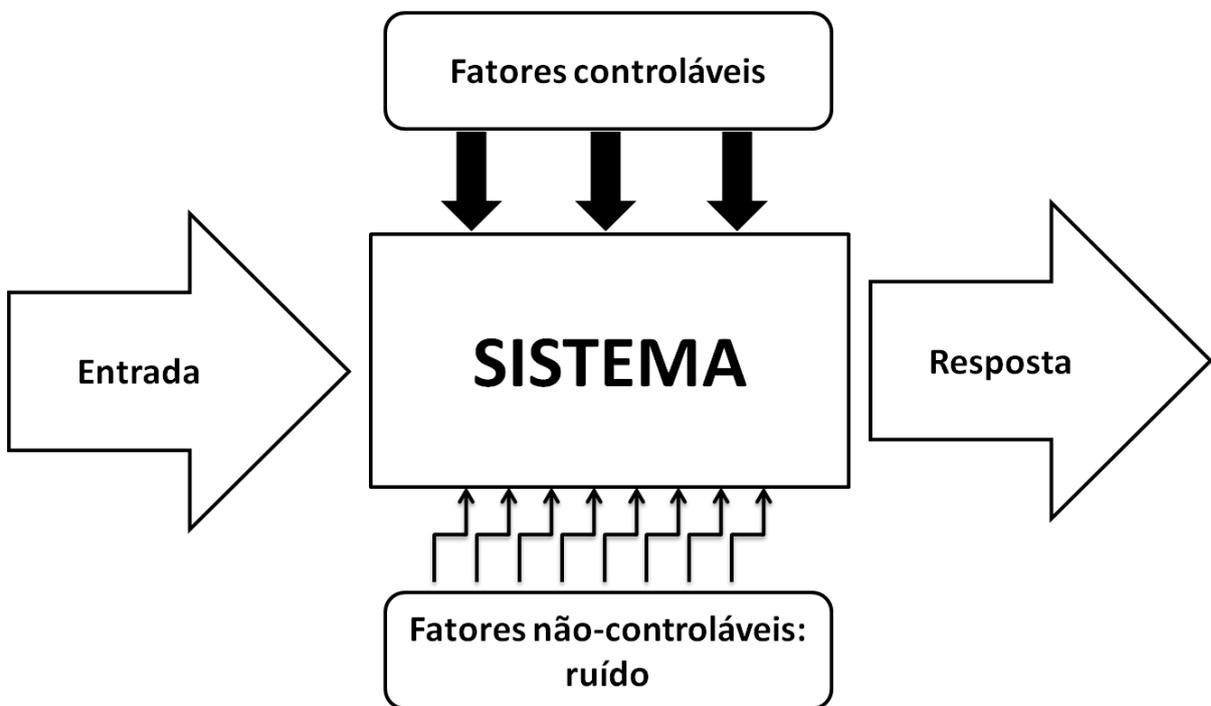
## 2.5 Método estatístico para projeto de experimento

### 2.5.1 Método de Taguchi

O método Taguchi foi desenvolvido pelo Dr. Genichi Taguchi, um engenheiro japonês interessado em controle da qualidade em processos de fabricação. O objetivo do método Taguchi é de aumentar a produtividade enquanto se diminui o seu custo. Ele busca desenvolver um produto ou processo tal que os parâmetros especificados no projeto o torne robusto aos efeitos dos fatores que causam a variabilidade no desempenho. Por este motivo este método é também conhecido com Projeto Robusto. Segundo Ross (1991), uma tecnologia, um produto ou um processo são robustos quando o desempenho de sua função não sofre influência dos fatores de ruído.

Na abordagem de Taguchi para o Projeto Robusto, um processo ou um produto é considerado um sistema que visa a transformação de energia para cumprir uma determinada função.

Dentro desta perspectiva, assume-se que em todo sistema de engenharia existem formas de relação perfeita ou ideal entre a entrada e a saída do sistema, na qual toda energia aplicada, de entrada, é transformada eficientemente em energia para cumprir a função desejada para o sistema. Quando a eficiência do sistema for menor que 100%, a parte da energia não eficiente é transformada em alguma outra forma de energia indesejável, responsável pelos problemas como: ruídos, vibrações, trincas, desgastes, etc. Esta parte de energia que não cumpri a função designada é considerada como perda de energia. A figura 19 mostra um modelo geral de um processo ou sistema.



**Figura 19 - Modelo geral de um processo ou sistema.**  
Fonte: Montgomery, 2004.

Com o intuito de minimizar as perdas nos processos, dois procedimentos são comumente utilizados: varia-se um fator de controle por vez ou vários fatores de controle por

vez e analisa as respostas. O primeiro pode levar a um resultado correto, porém, poderá exigir um número elevado de experimentos, o que o torna inviável em termos de custo e tempo. O segundo, por sua vez, pode levar a resultados não otimizados ou errôneos. Entretanto, dentre estes dois procedimentos está o mais robusto aos fatores de ruídos.

O método Taguchi usa a razão sinal-ruído (S/N) para indicar qual fator apresenta maior influencia sobre a resposta do sistema e qual o melhor nível a ser escolhido para atender as especificações do produto ou processo mais robusto. Há três categorias de razão S/N:

- Quanto menor melhor (LB: *lower is best*), usado quando se deseja minimizar os resultados;

$$LB: \text{ razão } S/N = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

- Quanto maior melhor (HB: *higher is best*) usado quando se deseja maximizar os resultados;

$$HB: \text{ razão } S/N = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

- Nominal é melhor (NB: *nominal is best*), usado quando se deseja reduzir a variabilidade em torno de um valor nominal.

$$NB: \text{ razão } S/N = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - u)^2 \right] \quad (3)$$

Onde,  $n$ ,  $i$ ,  $y$  e  $u$  denotam repetições, índice, valor observado e valor nominal respectivamente.

Assim, os níveis ótimos das variáveis de influência são aqueles que maximizam o S/N apropriado para cada análise estatística específica, Phadke (1989).

O método Taguchi recomenda vários arranjos ortogonais padronizados, sua escolha depende do número de e do tipo dos parâmetros a serem estudados. Os arranjos ortogonais são planejamentos fatoriais fracionados, ou seja, planejamentos fatoriais que têm o número de ensaios reduzidos ao se considerar somente os efeitos das variáveis de influência e de algumas de suas interações. Isso pode ser feito quando se conhece previamente que a interação de algumas variáveis não apresentará influência significativa sobre a variável de resposta.

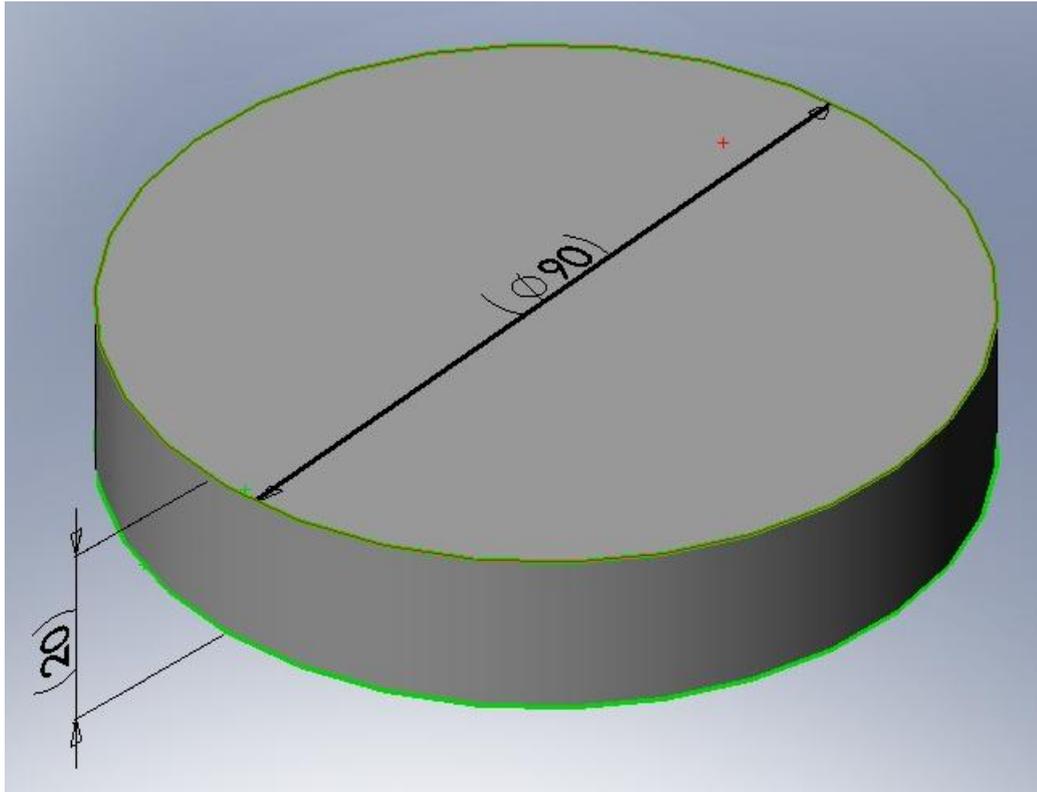
A grande crítica que se faz à metodologia de Taguchi é o fato dela não considerar os efeitos das interações das variáveis de influência, o que pode ser estatisticamente incorreto em algumas análises, pois como foi destacado, os arranjos ortogonais empregados por Taguchi nada mais são do que planejamento fatoriais fracionados, que foram originalmente desenvolvidos para situações em que previamente descartavam-se os efeitos de algumas interações de variáveis.

### **3 METODOLOGIA**

Neste capítulo serão apresentados os materiais, ferramentas e equipamentos utilizados nesta pesquisa, seguidos pela metodologia empregada para realização do experimento. No Laboratório de Processos de Fabricação da PUC-MG foram fabricados os corpos-de-prova e suporte de fixação. No Laboratório de Usinagem e Automação, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, foram realizados os ensaios e aquisição dos dados de medição da força de avanço na furação, desvio geométrico de circularidade e rugosidade.

#### **3.1 Corpos-de-prova**

Os corpos-de-prova serão tarugos de três polímeros com propriedades diferentes. São eles: UHMW, POM e Teflon. Peças torneadas de 90 mm de diâmetro por 20 mm de altura. A figura 20 mostra o modelo tridimensional do corpo-de-prova e suas dimensões.



**Figura 20 - Dimensões do corpo-de-prova.**

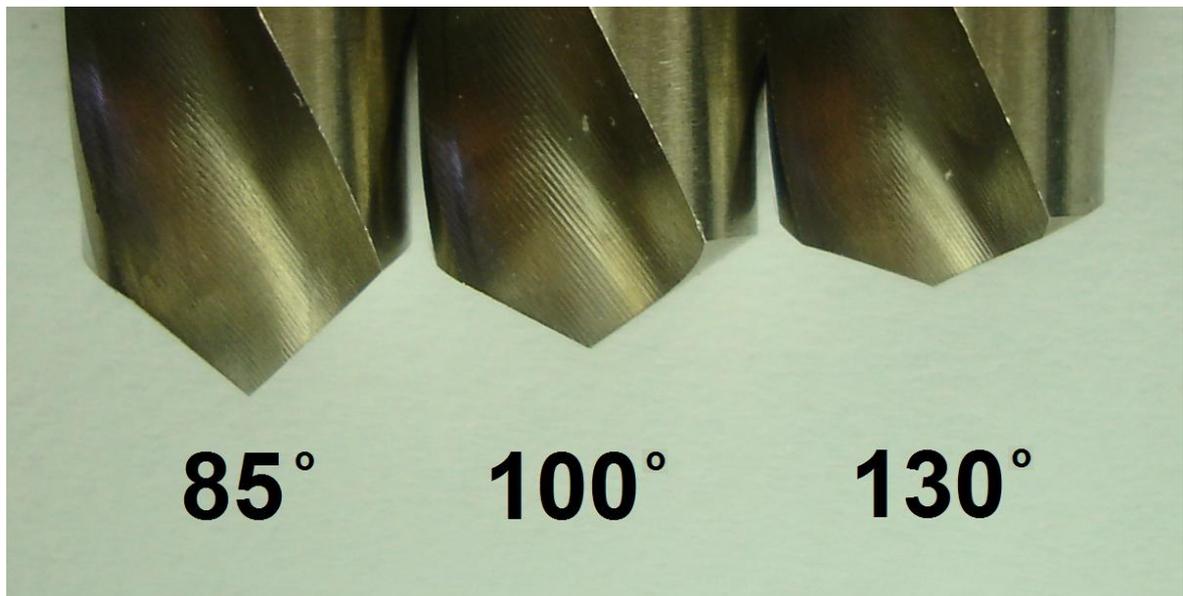
**Fonte: Dados da pesquisa.**

Estas dimensões foram escolhidas levando em consideração a quantidade de furos e ser ensaiado em cada corpo-de-prova, 12 furos, respeitando a distância mínima entre centros de furos, 20 mm. Esta distância mínima entre furos se deve ao fato que durante o ensaio ou na coleta de dados, um furo não interfira nos resultados finais de outro furo próximo. A especificação da espessura veio a partir da premissa dos furos a serem ensaiados serem passantes. Desse modo, a espessura mínima, para um melhor resultado, seria utilizar o princípio  $2 \times D$ . Neste caso, como o diâmetro dos furos é de 10 mm, e para economizar material, utilizaremos a espessura mínima: 20 mm.

### 3.2 Ferramentas de corte

Segundo Gaitonde et al (2008), muitos pesquisadores têm estudado a influência de parâmetros de corte na furação de plásticos compósitos com matrizes poliméricas, porém, há poucos trabalhos que reportem a influência do ângulo de ponta.

Com isso foram selecionadas brocas com três ângulos de pontas serão diferentes:  $85^\circ$ ,  $100^\circ$  e  $130^\circ$ , como mostra a figura 21.



**Figura 21 - Brocas helicoidais com ângulos de ponta diferentes.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

As ferramentas de corte serão brocas helicoidais de aço rápido com diâmetro de 10 mm com duas arestas de corte.

### **3.3 Centro de usinagem**

Para a realização do ensaio foi utilizado um centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 560, o qual possui um comando numérico computadorizado da SIEMENS, modelo Sinumerik 810D, com potência máxima de 9000W e rotação máxima de 7500rpm. Deslocamento máximo nos seguintes eixos: X = 560 mm, Y = 406 mm e Z = 508 mm. Mínimo incremento de posicionamento: 0,001 mm e 0,001°.

### **3.4 Sistema de medição de esforços de usinagem**

Para medir a força de avanço neste ensaio de furação foi usado um sistema composto por um micro computador com processador Intel, uma placa de aquisição analógico/digital DAQVIEW, um software DYNOWARE e um dinamômetro piezométrico KISTLER, modelo 9257BA.

### **3.5 Rugosímetro**

Um rugosímetro TEYLOR HOBSON, modelo SURTRONIC 2, foi utilizado para a medição da rugosidade superficial das paredes dos furos.

### **3.6 Máquina de medição por coordenadas**

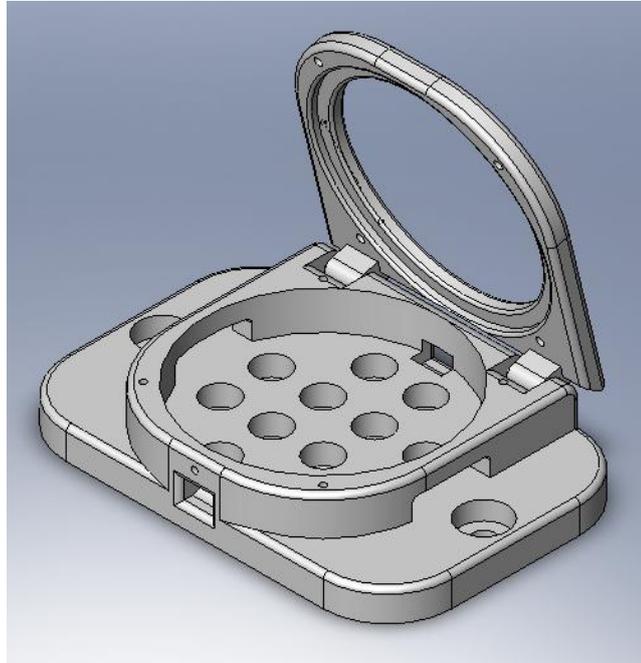
A máquina de medição por coordenadas TESA, modelo MICRO HITE 3D, equipada com o software REFLEX SCAN será utilizada para a medição do diâmetro e do desvio de circularidade dos furos.

### **3.7 Sistema de fixação**

Foi fabricado um sistema de fixação do corpo-de-prova no dinamômetro para uma efetiva coleta de dados. Para um melhor resultado no acabamento dos furos foi utilizado o apoio suporte ao corpo-de-prova. Segundo Capello (2004), em seu experimento, ele utilizou um suporte com pré-furo do mesmo diâmetro da broca, chamado de pré-furo estreito, um suporte com pré-furo maior que o diâmetro da broca, chamado de pré-furo largo e sem apoio suporte. Ao final do experimento o autor concluiu que o acabamento do furo foi melhor com o corpo-de-prova apoiado, ao invés de sem o apoio ao redor do furo, porém, para os parâmetros de furação escolhidos, não houve significativa influência no acabamento do furo para o corpo-de-prova apoiado com pré-furo pequeno ou o pré-furo largo. Com isso o suporte fabricado possibilita o apoio ao corpo-de-prova com pré-furos com 13 mm de diâmetro.

Com este suporte, a força de usinagem empregada na peça ensaiada seja transmitida e captada pelo dinamômetro. Além de fixar o corpo-de-prova no dinamômetro, este sistema de fixação permite referenciar o centro de usinagem para que sua programação seja possível e que apenas haja a troca da peça ensaiada sem a necessidade de ajustes, garantindo assim as

mesmas condições de contorno para cada corpo-de-prova ensaiado. A figura 22 mostra o sistema de fixação dos corpos-de-prova projetado para a realização dos ensaios.



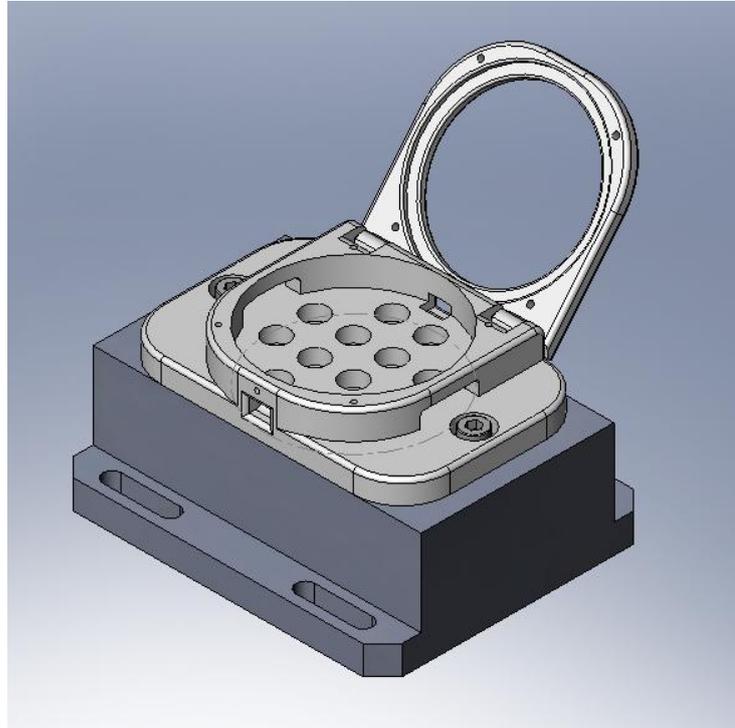
**Figura 22 - Sistema de fixação do corpo-de-prova.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

### 3.8 Método

Com os materiais a serem ensaiados já torneados e nas devidas dimensões e o dispositivo de fixação fabricado, inicia-se a montagem desses itens juntamente com o dinamômetro.

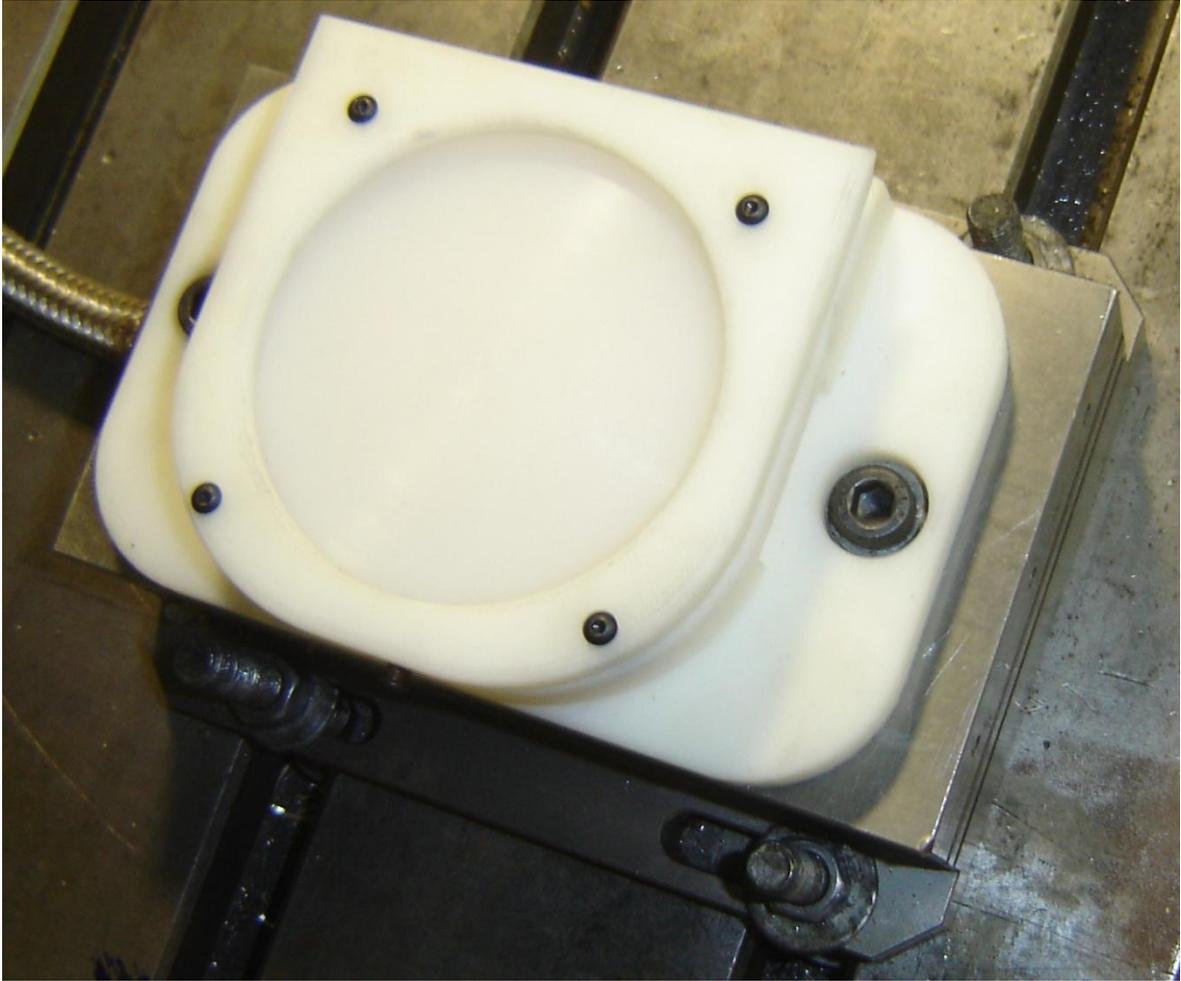
Utilizam-se os rasgos da mesa de trabalho do centro de usinagem, fixando o dinamômetro com parafuso e porca. O passo seguinte é a fixação do suporte no dinamômetro, utilizando-se parafusos. O próprio dinamômetro possui furos, com rosca, próprios para a

fixação de suportes para ensaios. A figura 23 mostra a fixação do suporte porta corpo-de-prova no dinamômetro.



**Figura 23 - Fixação do suporte no dinamômetro.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

O corpo-de-prova se encaixa no suporte, que com a tampa superior aparafusada, fixa-se o material a ser ensaiado, garantindo a correta fixação do conjunto ante o processo de furação, como mostra a figura 24.

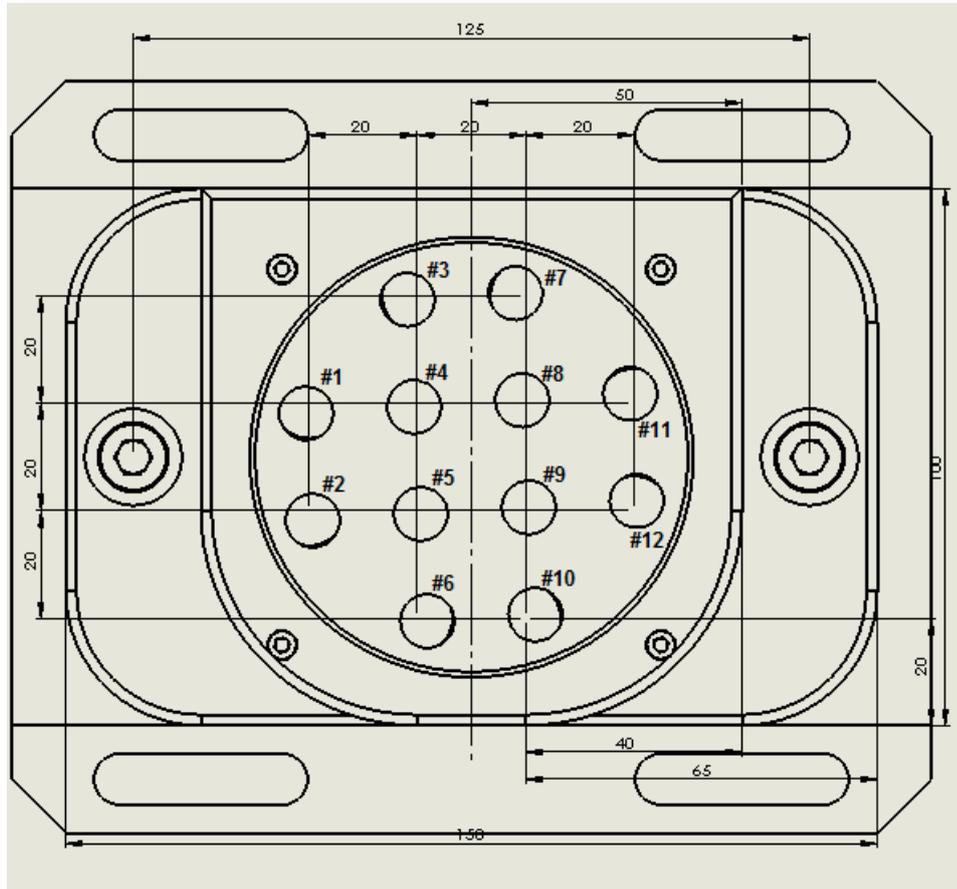


**Figura 24 - Corpo de prova fixado no suporte sobre o dinamômetro.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

Após a fixação do conjunto, é preciso referenciar o centro de usinagem com relação a esta montagem. O suporte do corpo-de-prova foi projetado para facilitar esta etapa. Todas as dimensões do suporte são conhecidos. Dessa maneira, utiliza-se dessas informações para referenciar o “zero peça” do centro de usinagem na superfície central do corpo-de-prova. Com a máquina referenciada é possível então fazer o programa de operação de usinagem.

Para programar o centro de usinagem, o qual executará o ensaio, além de conter a referência da peça é necessária a posição dos 12 furos, a seqüência de furação e os parâmetros de usinagem.

Os 12 furos serão distribuídos conforme a figura 25, dessa maneira também será a seqüência de furação.



**Figura 25 - Posição dos furos no corpo-de-prova em relação ao suporte.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

Para correlacionar tipo de material, geometria de ferramenta de corte e parâmetros de usinagem, é preciso definir estes últimos parâmetros. Tsao e Hocheng (2008b) concluem que a taxa de avanço e o diâmetro da broca são reconhecidamente os fatores de maior influência que afetam a força de avanço, enquanto que a taxa de avanço e a velocidade de rotação trazem a maior contribuição para a rugosidade das paredes dos furos. Considerando que a taxa de avanço da ferramenta é extremamente determinante no acabamento da parede do furo, e como pretende-se investigar parâmetros não tão parametrizados, utiliza-se apenas 2 avanços: 0,05 mm/rev e 0,15 mm/rev. Dessa forma, foram selecionados 3 velocidades de rotação da

ferramenta de corte, assim teremos 6 parâmetros de corte diferentes. O centro de usinagem utilizado possui uma rotação máxima de 7500 rpm, desse modo, para abranger a sua capacidade, foram selecionadas as velocidades de 1000 rpm, 3000 rpm e 5000 rpm.

Com seis parâmetros de corte diferentes e com o corpo-de-prova com capacidade de se fazer 12 furos, iremos replicar no mesmo corpo-de-prova os 6 parâmetros de corte, para a mesma ferramenta. Assim, teremos um tipo de broca para cada corpo-de-prova, necessitando o total de 3 corpos-de-prova para cada tipo de material, totalizando 9 corpos-de-prova. Cada furo receberá um conjunto de parâmetros, para que o resultado final não seja influenciado pela seqüência de furação, os parâmetros foram sorteados para cada furo, desse modo a seqüência de furos receberá uma configuração de parâmetros aleatória. A tabela 3 mostra os parâmetros de corte para cada furo.

**Tabela 3**  
**Tabela a ser preenchida durante o ensaio.**

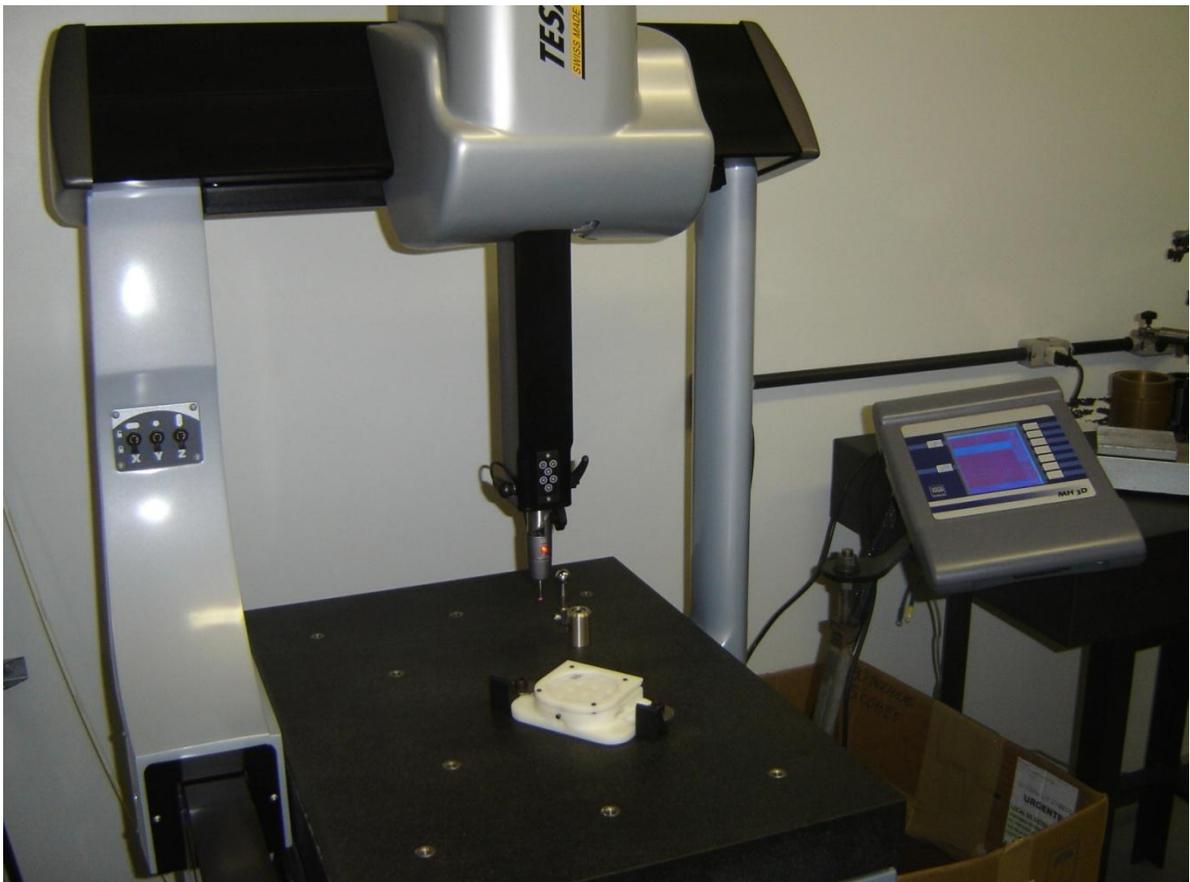
Material: _____				
Bolacha Nº _____			Data: ____/____/____	
Furo	Avanço	Rotação	Fz	
			min	máx
1	0,05	1000		
2	0,05	5000		
3	0,15	3000		
4	0,15	1000		
5	0,05	3000		
6	0,15	5000		
7	0,15	3000		
8	0,05	3000		
9	0,05	1000		
10	0,15	5000		
11	0,05	5000		
12	0,15	1000		

**Fonte: Dados da pesquisa.**

Totalizando 108 furos, e com muitos parâmetros envolvidos, foi criada esta tabela para facilitar a coleta de dados da força de furação  $F_z$ . Então após a furação de cada furo é coletado os valores máximo e mínimo da força de usinagem na direção Z do centro de usinagem.

Após preencher completamente a tabela de um material para a determinada broca, troca-se o corpo-de-prova com o material seguinte, até utilizar os três materiais para uma dada broca. Só então troca-se a broca com o novo ângulo de ponta, assim, sucessivamente até o término do experimento.

Com o término da etapa de furação e com os dados de força de usinagem, leva-se os corpos de prova para a máquina de medição por coordenadas para a medição dos desvios de circularidade. Foi adotado o plano médio entre as faces do corpo-de-prova para a medição do desvio de circularidade. A figura 26 mostra a máquina de medir por coordenadas.



**Figura 26 - Máquina de medição por coordenadas.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

É necessário fixar o corpo-de-prova na mesa de trabalho da máquina de medição por coordenadas para que o resultado não seja influenciado. Deve-se utilizar o próprio suporte fabricado para fixar os corpos-de-prova. Posicionado o material ensaiado, trava-se a sonda no plano médio do furo, ou seja, a 10 mm da face superior. É possível travar a sonda no plano médio graças a travas pneumáticas que a máquina possui. Ela possui uma trava por eixo cartesiano. Então, como é preciso medir em um determinado plano, iremos travar o eixo Z da máquina. Assim, pode-se coletar os pontos apenas neste plano, bastando apenas encostar a ponta da sonda na parede do furo. Com o mínimo de três pontos é possível interpolar um círculo, porém quanto maior a quantidade de pontos em uma circunferência, melhor representada ela será, desse modo, foi determinado o número de 10 pontos as serem coletados de forma aleatória e mais dispersa possível. A própria máquina irá calcular o desvio de circularidade com seu respectivo erro.

Após coletar os dados de circularidade de todos os furos, será preciso coletar a rugosidade de cada furo. Faz-se necessário também, fixar o corpo-de-prova para que o resultado de medição não possa ser influenciado. Mais uma vez o próprio suporte fabricado será utilizado para fixar o corpo-de-prova, assim como mostra a figura 27. De acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288, a qual propõe regras e procedimentos para a avaliação de rugosidade, determina que pelo menos três medições devem serem realizadas na superfície ensaiada, onde a superfície apresentar impressão de homogeneidade, caso na parede de furos, fazê-las igualmente espaçadas. Desse modo foi determinada a aquisição de três dados de rugosidade por furo, na altura média e espaçados com ângulo de 120°. Pretende-se assim, avaliar a rugosidade de um furo com a média e o desvio-padrão desses três dados.



**Figura 27 - Coleta de dados de rugosidade.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

De posse de todos esses dados será possível analisar a influência de cada parâmetro ensaiado, tipo de material, geometria da ferramenta de corte e parâmetros de usinagem com as características da peça acabada, neste caso: força de usinagem, desvio geométrico e acabamento superficial.

Para aplicar o método de Taguchi com os fatores de controle e níveis propostos, o método propõe um arranjo ortogonal  $L_9$ , conforme a tabela 4.

**Tabela 4**  
**Arranjo ortogonal  $L_9$ .**

Ensaio	Avanço (mm/rev)	Rotação (rpm)	Ângulo de ponta da broca (°)
1	0,05	1000	85
2	0,05	3000	100
3	0,05	5000	130
4	0,15	1000	100
5	0,15	3000	130
6	0,15	5000	85
7	0,05	1000	130
8	0,05	3000	85
9	0,05	5000	100

**Fonte: Dados da pesquisa.**

Como possuímos um fator de controle com dois níveis e dois fatores de controle com três níveis o guia do usuário do Minitab® apresenta uma técnica útil para adequar o arranjo ortogonal, conhecida por “tratamento fictício”. Segundo Minitab (2007), esta técnica consiste em repetir níveis para o mesmo fator de controle, contando que haja pelo menos dois níveis distintos. O autor afirma que este arranjo modificado continua ortogonal, porém não balanceado.

Este arranjo ortogonal propõe, para estes fatores de controle e níveis, a execução de apenas nove furos para se determinar o grau de influência de cada um nas respostas coletadas, em contraste com os dezoito furos de todas as combinações dos fatores de controle para cada material.

Os três parâmetros de saída neste experimento utilizam a categoria da razão sinal-ruído, quanto menor é melhor, pois quanto menor o valor desses parâmetros melhor a qualidade do produto acabado. Dessa forma utiliza-se a equação (1) para o cálculo da razão sinal-ruído para cada fator de controle e nível. A maior variação do sinal-ruído por fator de controle caracteriza este fator como o que possui maior influência no parâmetro de saída. Dessa forma o método de Taguchi classifica, neste experimento, se a taxa de avanço, a rotação e o ângulo de ponta da broca possuem maior influência na força de avanço, rugosidade na parede dos furos e desvio de circularidade.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados e discussões do experimento de furação de polímeros. Inicia-se com os resultados de força de avanço, rugosidade nas paredes dos furos e, por fim, desvio de circularidade, para os três materiais ensaiados, UHMW, POM e PTFE. As tabelas e gráficos apresentados neste capítulo são resultantes dos dados coletados durante o experimento. Como um dos objetivos específicos é a comparação de todos os dados obtidos no experimento com método estatístico de Taguchi, foi utilizado o programa estatístico Minitab®, versão 15.1.1.0.

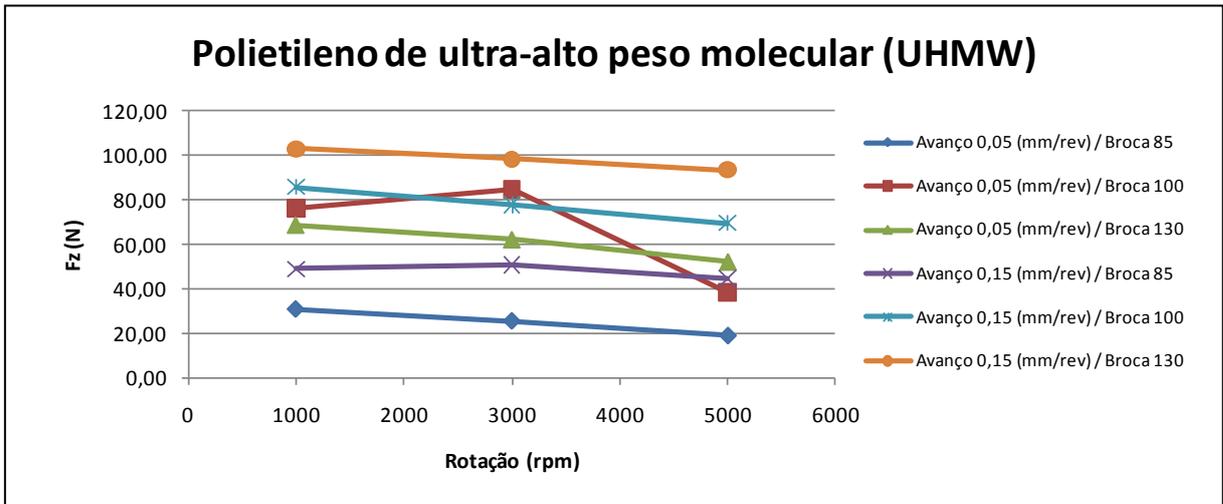
### 4.1 Força máxima de avanço (Fz)

A tabela 5, a figura 28, a figura 29 e a figura 30 mostram os resultados da força máxima de avanço obtida na furação do UHMW.

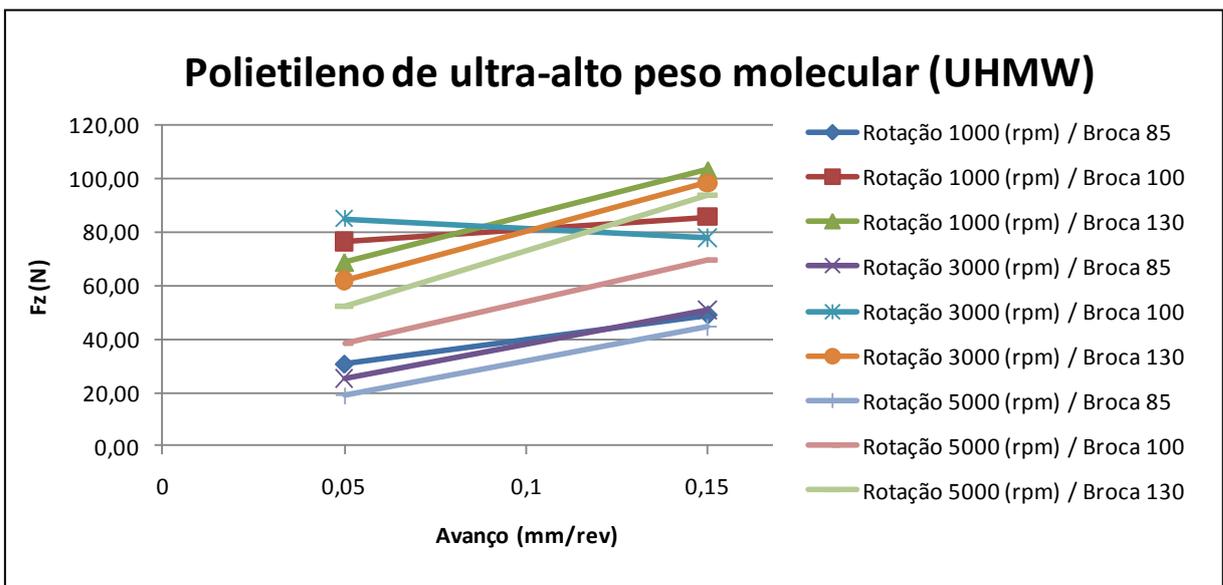
**Tabela 5**  
**Tabela com os dados da força máxima de avanço Fz no UHMW.**  
Polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMW)

Item	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rev)	Fz (N)					
			Broca 85°		Broca 100°		Broca 130°	
			Média	Desvio P.	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
1	1000	0,05	30,61	0,04	76,37	8,56	68,47	9,38
2		0,15	48,93	4,91	85,68	0,62	103,14	3,44
3	3000	0,05	25,35	0,21	84,83	4,79	61,99	3,04
4		0,15	50,73	1,54	77,81	0,93	98,35	0,59
5	5000	0,05	18,79	0,52	38,44	0,05	52,14	6,88
6		0,15	44,46	5,64	69,55	3,14	93,45	0,21

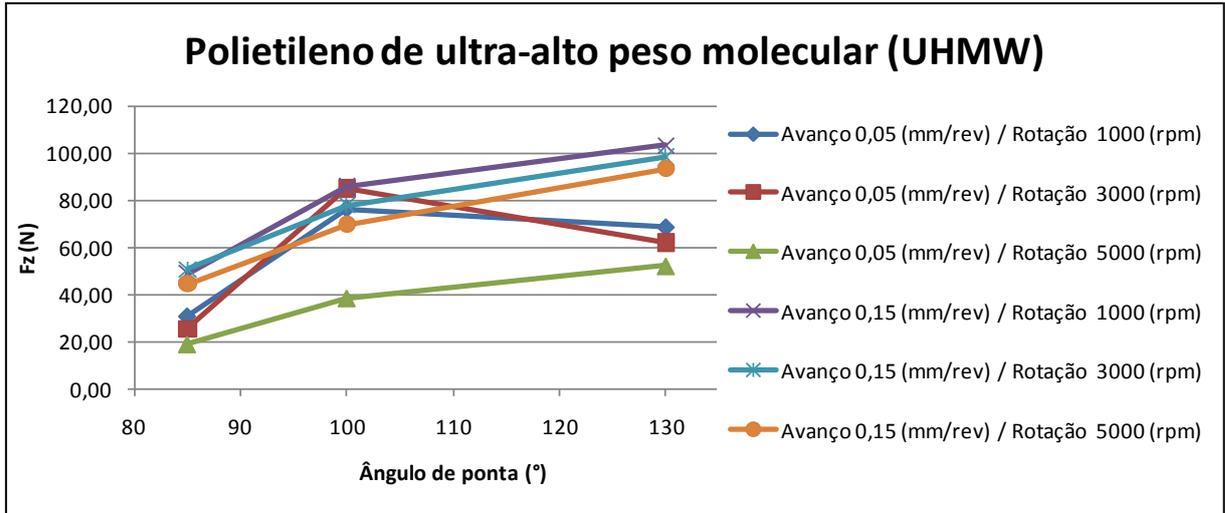
Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 28 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço  $F_z$  pela rotação no UHMW.**  
 Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 29 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço  $F_z$  pelo avanço no UHMW.**  
 Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 30 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço  $F_z$  pelo ângulo de ponta da broca no UHMW.**

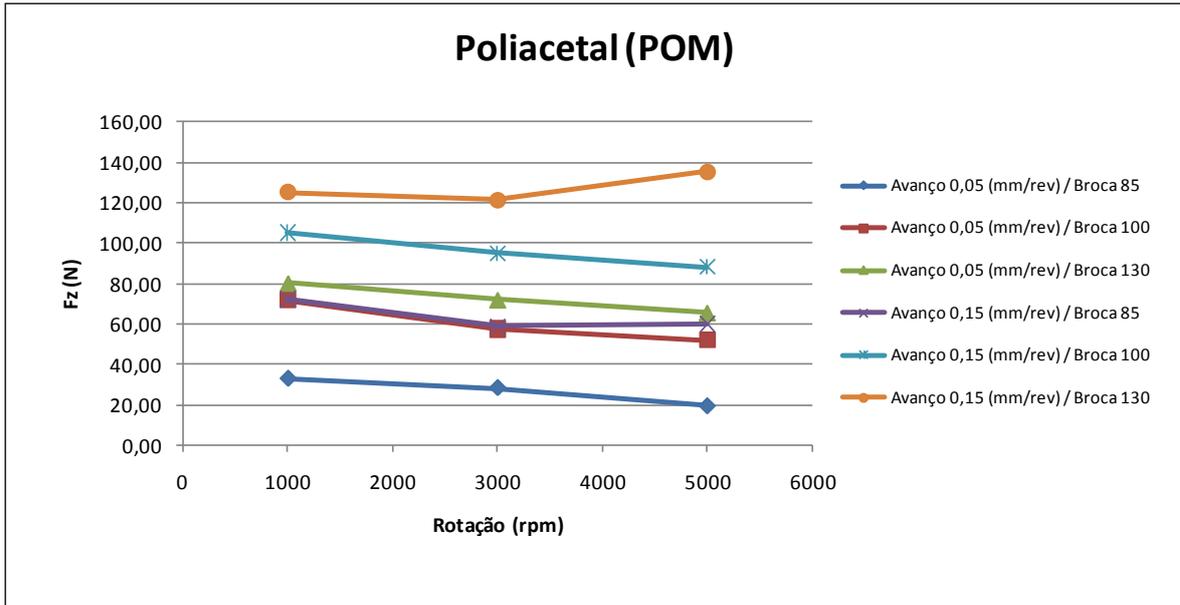
Fonte: Dados da pesquisa.

A tabela 6, a figura 31, figura 32 e figura 33 mostram os resultados da força máxima de avanço obtida na furação do POM.

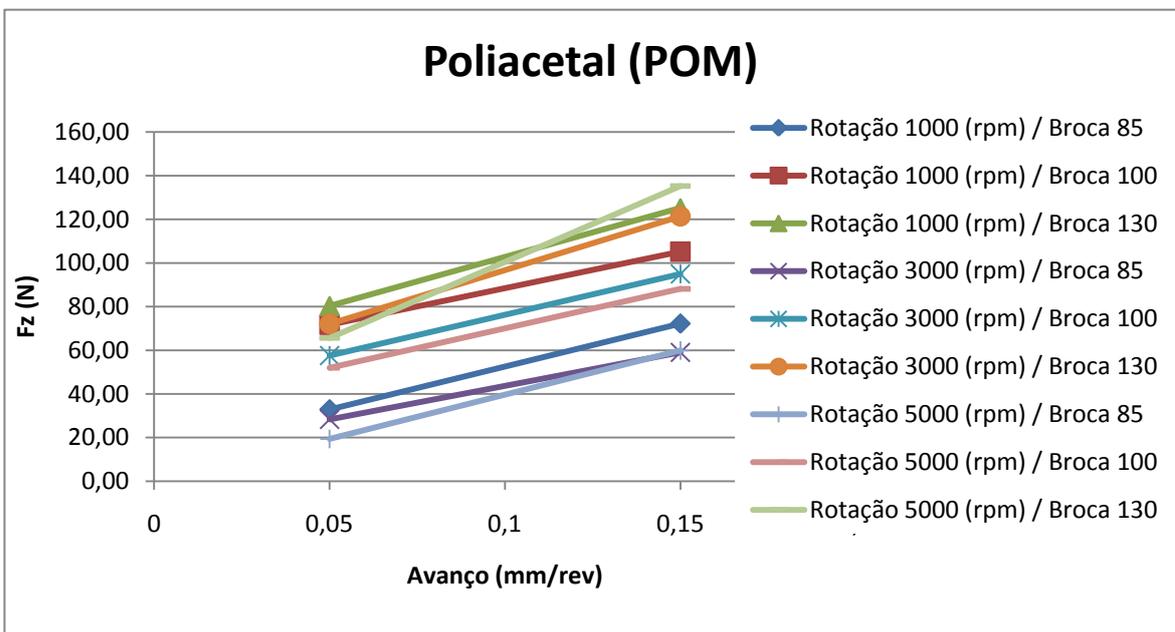
**Tabela 6**  
**Tabela com os dados da força de avanço  $F_z$  no POM.**

Poliacetil (POM)			Fz (N)					
Item	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rev)	Broca 85°		Broca 100°		Broca 130°	
			Média	Desvio P.	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
1	1000	0,05	32,90	2,96	71,69	4,45	80,35	0,71
2		0,15	72,24	5,61	105,23	6,55	125,22	12,23
3	3000	0,05	28,34	0,36	57,58	3,91	72,06	1,99
4		0,15	59,03	0,33	94,98	1,25	121,37	0,42
5	5000	0,05	19,38	1,56	52,00	4,70	65,64	1,23
6		0,15	59,90	0,78	88,14	1,96	135,28	0,21

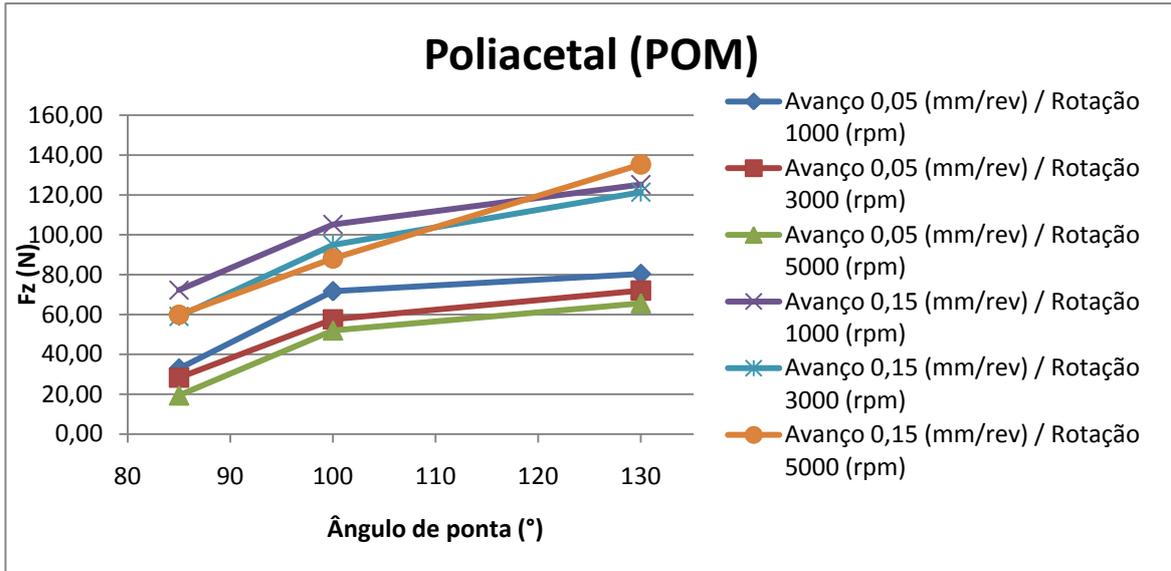
Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 31 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço  $F_z$  pela rotação no POM.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**



**Figura 32 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço  $F_z$  pelo avanço no POM.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**



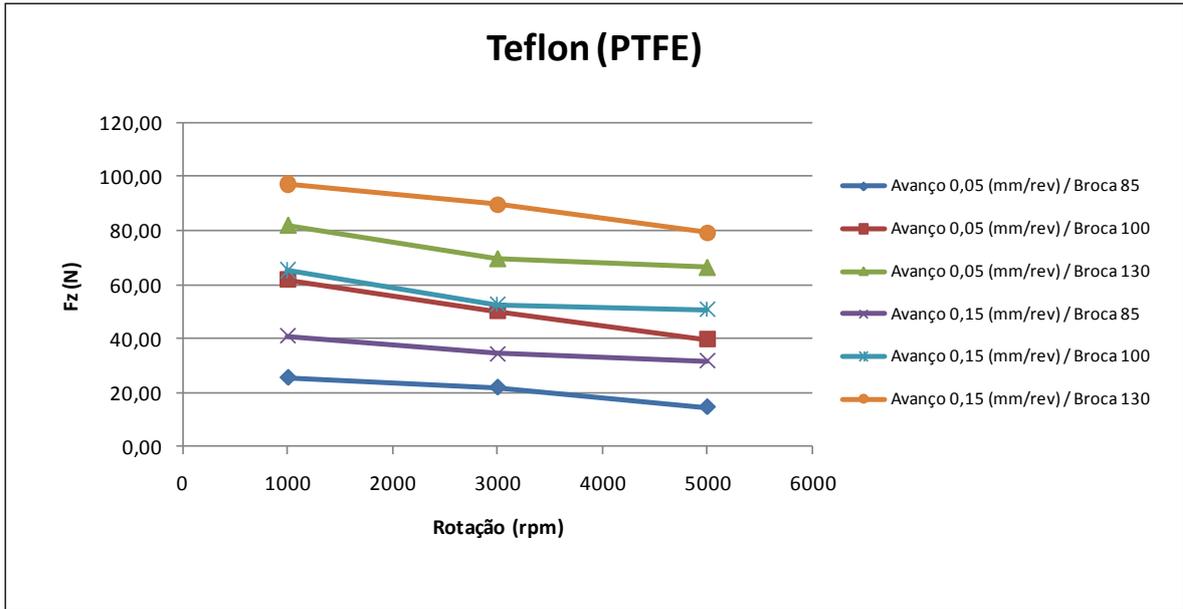
**Figura 33 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço  $F_z$  pelo ângulo de ponta da broca no POM.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

A tabela 7, a figura 34, figura 35 e figura 36 mostram os resultados da força máxima de avanço obtidos na furação do PTFE.

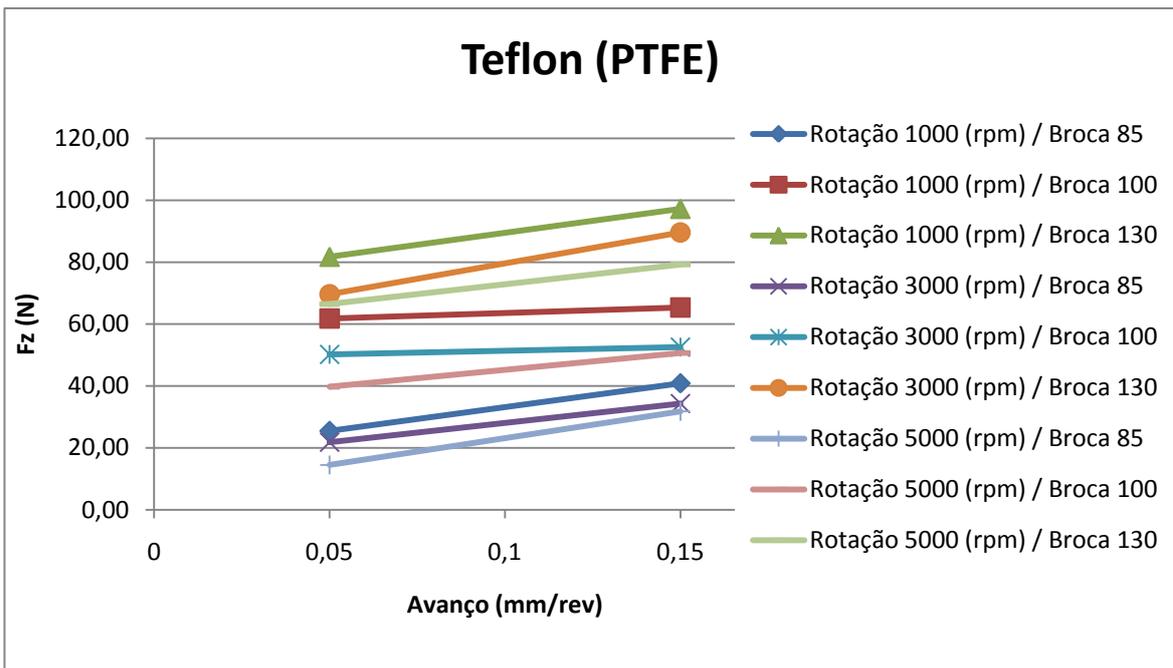
**Tabela 7**  
**Tabela com os dados da força de avanço  $F_z$  no PTFE.**

			Teflon (PTFE)					
Item	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rev)	Fz (N)					
			Broca 85°		Broca 100°		Broca 130°	
			Média	Desvio P.	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
1	1000	0,05	25,47	0,86	61,80	3,51	81,78	1,59
2		0,15	40,89	1,35	65,36	0,64	97,24	2,93
3	3000	0,05	21,83	0,10	50,18	0,88	69,65	0,63
4		0,15	34,34	0,59	52,59	0,40	89,62	0,88
5	5000	0,05	14,50	0,16	39,76	9,16	66,48	0,56
6		0,15	31,79	0,11	50,67	0,21	79,22	0,47

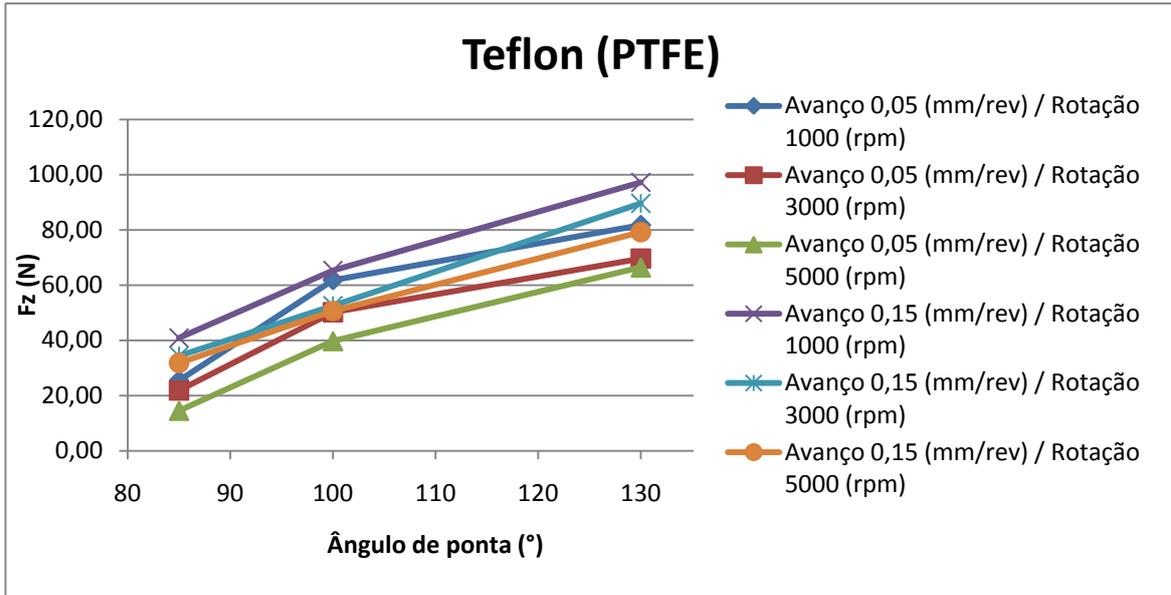
**Fonte: Dados da pesquisa.**



**Figura 34 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço  $F_z$  pela rotação no PTFE.**  
 Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 35 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço  $F_z$  pelo avanço no PTFE.**  
 Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 36 - Gráfico com os dados de força máxima de avanço  $F_z$  pelo ângulo de ponta da broca no PTFE. Fonte: Dados da pesquisa.**

Para todos os materiais, velocidades de rotação e ângulos de ponta da broca, o aumento da taxa de avanço da ferramenta aumentou também a força de avanço, devido ao fato da ferramenta empurrar mais o material do que com uma taxa de avanço menor, o que pode ser confirmado em Capello (2004). Tsao e Hocheng (2008b) concluem que a taxa de avanço e o diâmetro da broca são reconhecidamente os fatores de maior influência que afetam a força axial.

Para uma mesma taxa de avanço e ângulo de ponta da broca, observa-se uma tendência em todos os materiais de diminuir a força máxima de avanço com o aumento da rotação, exceto no: UHMW com avanço de 0,05 mm/rev e broca de 100° e avanço de 0,15 mm/rev e broca de 85°; POM com avanço de 0,15 mm/rev e broca de 130° e avanço de 0,15 mm/rev e broca de 85°. Os valores de desvio padrão entre os valores da amostra e sua replicata explicam algum destes comportamentos fora da tendência mostradas nos gráficos acima. Campos Rubio et al (2008) concluíram que pelo fato da temperatura de corte aumentar com o aumento da velocidade de rotação promove um amaciamento da matriz polimérica, este fato explica a diminuição da força de avanço máxima com o aumento da rotação.

A influência do ângulo de ponta das brocas em relação à força máxima axial é para com a diminuição do ângulo de ponta menor é a força máxima de avanço da ferramenta sobre o corpo-de-prova. Apenas no UHMW isso não ocorreu para: rotação de 1000 rpm com avanço de 0,05 e 3000 rpm também como avanço de 0,05 mm/rev. Esta influência do ângulo de ponta das brocas condiz com Gaitonde et al (2008), os quais afirmam que quando se reduz o ângulo de ponta da broca causa-se uma redução do ângulo da borda de corte, assim a força de avanço é reduzida.

Para uma comparação entre os materiais poliméricos utilizados, a tabela 8 contém os valores da diferença entre a maior força máxima de avanço com a menor força máxima em cada material ensaiado.

**Tabela 8**  
**Tabela com os valores de máximo, mínimo e delta (diferença entre máximo e mínimo) para a força máxima de avanço em cada material.**

Material	Fz (N)		
	Máx.	Min.	Delta
UHMW	103,14	18,79	84,35
POM	135,28	19,38	115,90
PTFE	97,24	14,50	82,74

**Fonte: Dados da pesquisa.**

Os máximos valores de força em cada material foram com avanço de 0,15 mm/rev, rotação de 1000 rpm e ângulo de ponta da broca com 130°, exceto para o poliacetal (POM), que apresentou um ponto fora da tendência com o mesmo avanço e ângulo de ponta, porém, com a rotação em 5000 rpm. Os mínimos valores de força em cada material foram com avanço de 0,05 mm/rev, rotação de 5000 rpm e ângulo de ponta da broca com 85°. Esta tendência dos materiais poliméricos apresentarem maior força de avanço na furação com maior taxa de avanço e menor rotação, menor força de avanço na furação com menor taxa de avanço e maior rotação, está de acordo com o experimento apresentado por El-Sonbaty et al

(2004). Os autores afirmam ainda que a diminuição da força de avanço e torque com o aumento da velocidade de corte foi devido ao aumento do calor gerado pelo baixo coeficiente térmico e baixa temperatura de transição dos plásticos.

Os dados analisados acima foram inseridos no programa estatístico para a aplicação do método de Taguchi. A tabela 9 mostra os dados utilizados para o cálculo da razão sinal-ruído, S/N, conforme a equação (1), quanto menor é o melhor, pois quanto menor a força da ferramenta sobre o corpo-de-prova, mais energia é gasta de maneira eficiente, ou seja, menor a perda de energia para empurrar o material ao invés de cortá-lo, Capello (2004).

**Tabela 9**  
**Força máxima de avanço para cada material no arranjo ortogonal L<sub>9</sub> de Taguchi.**

Ensaio	Avanço (mm/rev)	Rotação (rpm)	Ângulo de ponta da broca (°)	Valores medidos Fz (N)		
				UHMW	POM	PTFE
1	0,05	1000	85	30,61	32,90	25,47
2	0,05	3000	100	84,83	57,58	50,18
3	0,05	5000	130	52,14	65,64	66,48
4	0,15	1000	100	85,68	105,23	65,36
5	0,15	3000	130	98,35	121,37	89,62
6	0,15	5000	85	44,46	59,90	31,79
7	0,05	1000	130	68,47	80,35	81,78
8	0,05	3000	85	25,35	28,34	21,83
9	0,05	5000	100	38,44	52,00	39,76

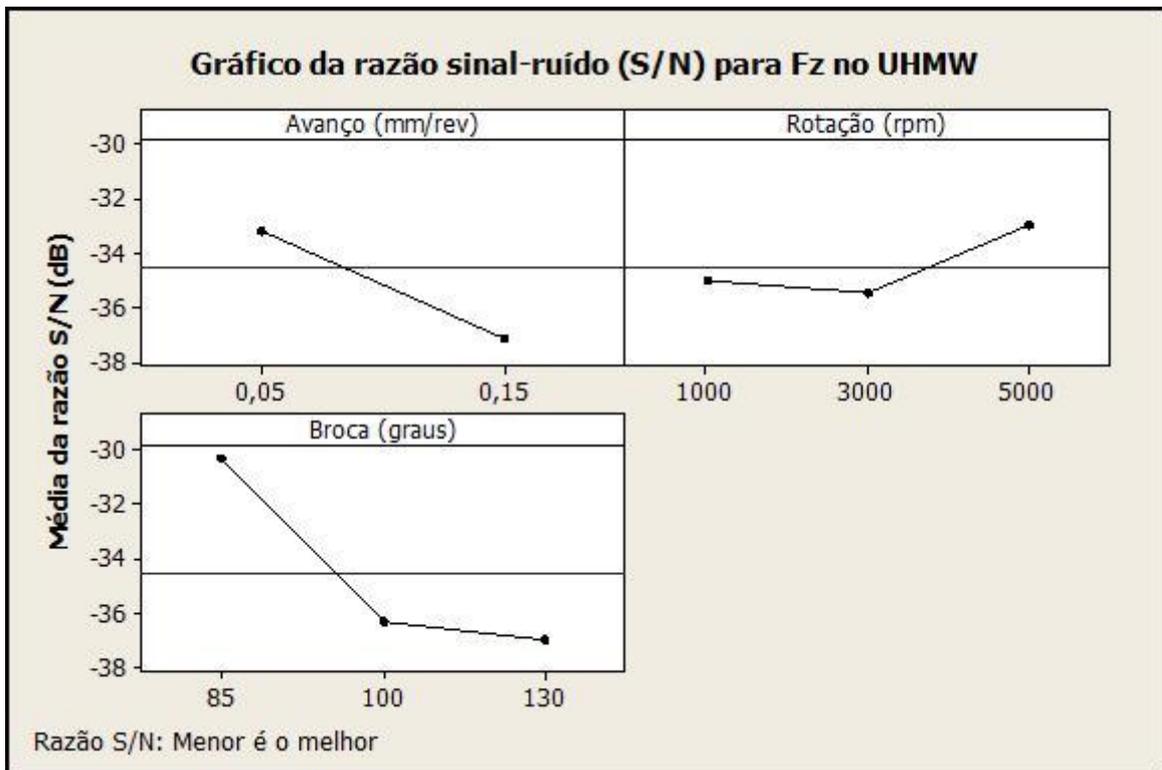
**Fonte: Dados da pesquisa.**

A tabela 10 e a figura 37 mostram os dados de saída do programa para a força máxima de avanço (Fz) na furação do UHMW.

**Tabela 10**  
Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no UHMW.

Nível	Avanço	Rotação	Broca
	(dB)	(dB)	(dB)
1	-33,19	-35,03	-30,25
2	-37,16	-35,5	-36,31
3		-33	-36,97
Delta	3,97	2,5	6,72
Influência	2	3	1

Fonte: Dados da pesquisa.



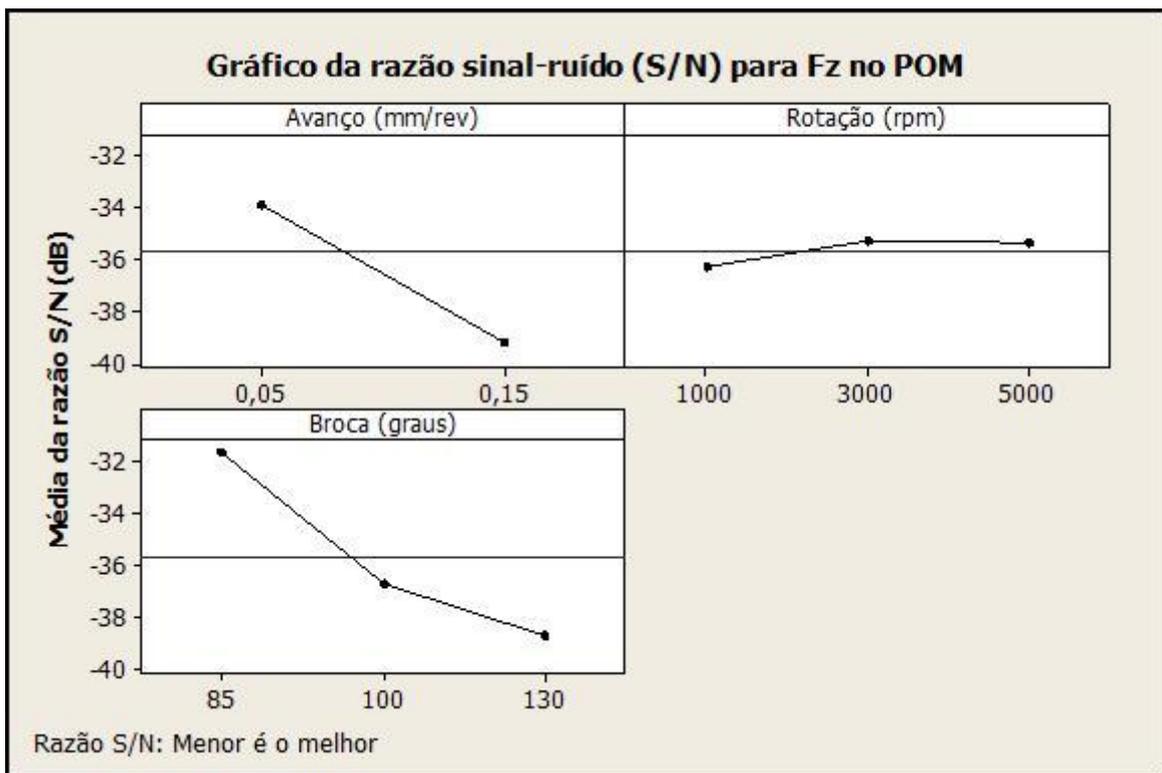
**Figura 37 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no UHMW.**  
Fonte: Dados da pesquisa.

A tabela 11 e a figura 38 mostram os dados de saída do programa para a força máxima de avanço (Fz) na furação do POM.

**Tabela 11**  
Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no POM.

Nível	Avanço (dB)	Rotação (dB)	Broca (dB)
1	-33,89	-36,3	-31,65
2	-39,22	-35,31	-36,66
3		-35,4	-38,71
Delta	5,33	0,98	7,06
Influência	2	3	1

Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 38 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no POM.**  
Fonte: Dados da pesquisa.

A tabela 12 e a figura 39 mostram os dados de saída do programa para a força máxima de avanço (Fz) na furação do PTFE.

**Tabela 12**  
Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no PTFE.

Nível	Avanço	Rotação	Broca
	(dB)	(dB)	(dB)
1	-32,6	-34,23	-28,32
2	-35,13	-33,28	-34,1
3		-32,83	-37,92
Delta	2,53	1,4	9,6
Influência	2	3	1

Fonte: Dados da pesquisa.

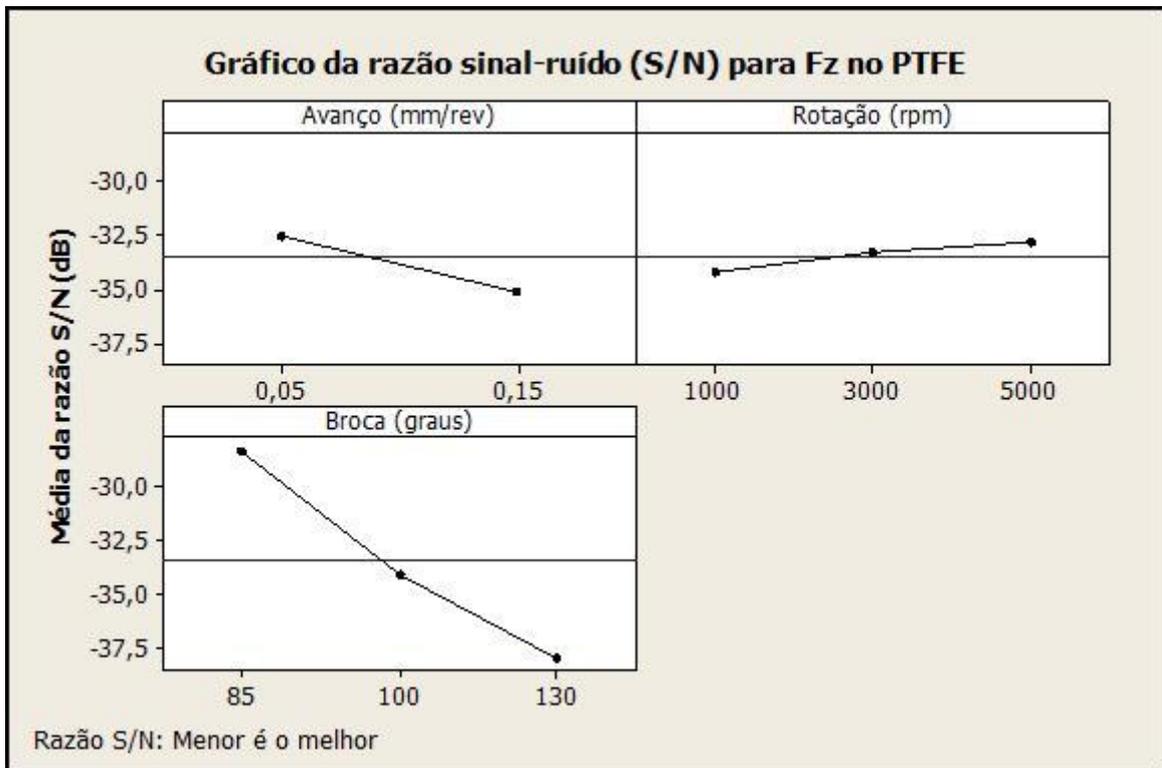


Figura 39 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da força Fz no PTFE.  
Fonte: Dados da pesquisa.

A classificação dos fatores de controle que causam maior influência na força máxima de avanço na furação destes polímeros foram as mesmas. O ângulo de ponta é o fator que mais influencia na força de avanço, seguido pela taxa de avanço e o fator que menos influencia na furação destes polímeros é a rotação da ferramenta.

De acordo com os gráficos da resposta sinal-ruído a melhor combinação dos fatores de controle e seus respectivos níveis foram:

- UHMW: Taxa de avanço de 0,05 mm/rev, rotação de 5000 rpm e ângulo de ponta de broca com 85°;
- POM: Taxa de avanço de 0,05 mm/rev, rotação de 3000 rpm e ângulo de ponta de broca com 85°;
- PTFE: Taxa de avanço de 0,05 mm/rev, rotação de 5000 rpm e ângulo de ponta de broca com 85°;

Analisando os gráficos gerados da força máxima de avanço na furação para cada material notam-se que os gráficos que possuem o ângulo de ponta das brocas na abscissa (figura 30, figura 33 e figura 36), possuem suas curvas uma inclinação maior que as curvas dos demais gráficos. Ou seja, uma variação do ângulo de ponta da broca causa maior impacto na força máxima de avanço que a variação da taxa de avanço e rotação, para os níveis ensaiados. O segundo fator que causa maior impacto na força máxima de avanço é a taxa de avanço, pois a segunda maior inclinação das curvas dos gráficos de força máxima de avanço está onde a taxa de avanço se apresenta na abscissa. Conseqüentemente, dos fatores de controle propostos, a rotação da ferramenta causa o menor impacto na força de avanço para na furação destes materiais.

Desta maneira, o método de Taguchi aplicado para um ensaio de apenas nove furos está de acordo com os dados coletados de todas as combinações possíveis dos fatores de controle e níveis propostos.

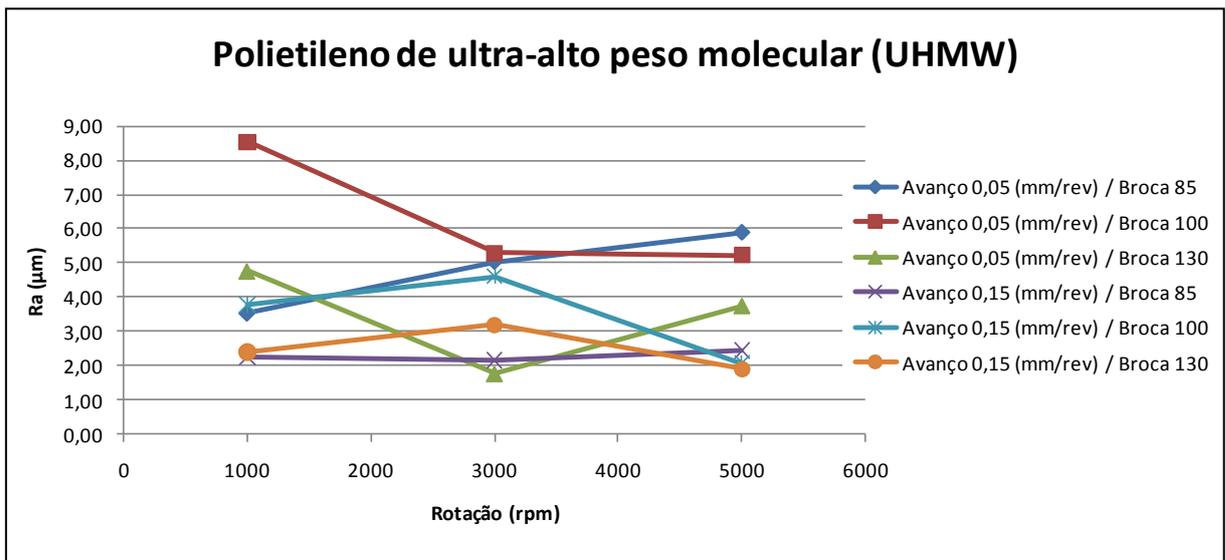
## 4.2 Acabamento superficial nas paredes dos furos

A tabela 13, a figura 40, figura 41 e figura 42 mostram os resultados da rugosidade média obtidos na furação do UHMW.

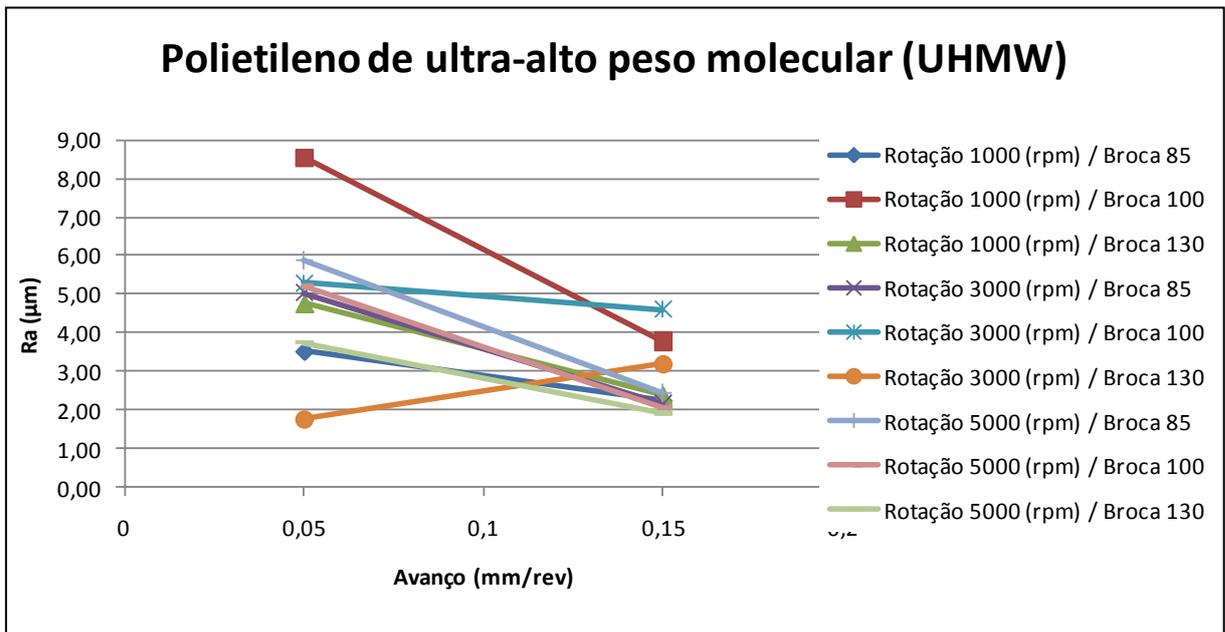
**Tabela 13**  
**Tabela com os dados da rugosidade média Ra no UHMW.**  
Polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMW)

Item	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ )					
			Broca 85°		Broca 100°		Broca 130°	
			Média	Desvio P.	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
1	1000	0,05	3,53	0,09	8,53	0,73	4,77	0,35
2		0,15	2,26	0,01	3,79	0,08	2,40	0,08
3	3000	0,05	5,03	0,11	5,29	0,23	1,77	0,03
4		0,15	2,16	0,13	4,60	0,16	3,19	0,28
5	5000	0,05	5,88	0,21	5,23	0,04	3,76	0,78
6		0,15	2,45	0,14	2,08	0,17	1,91	0,06

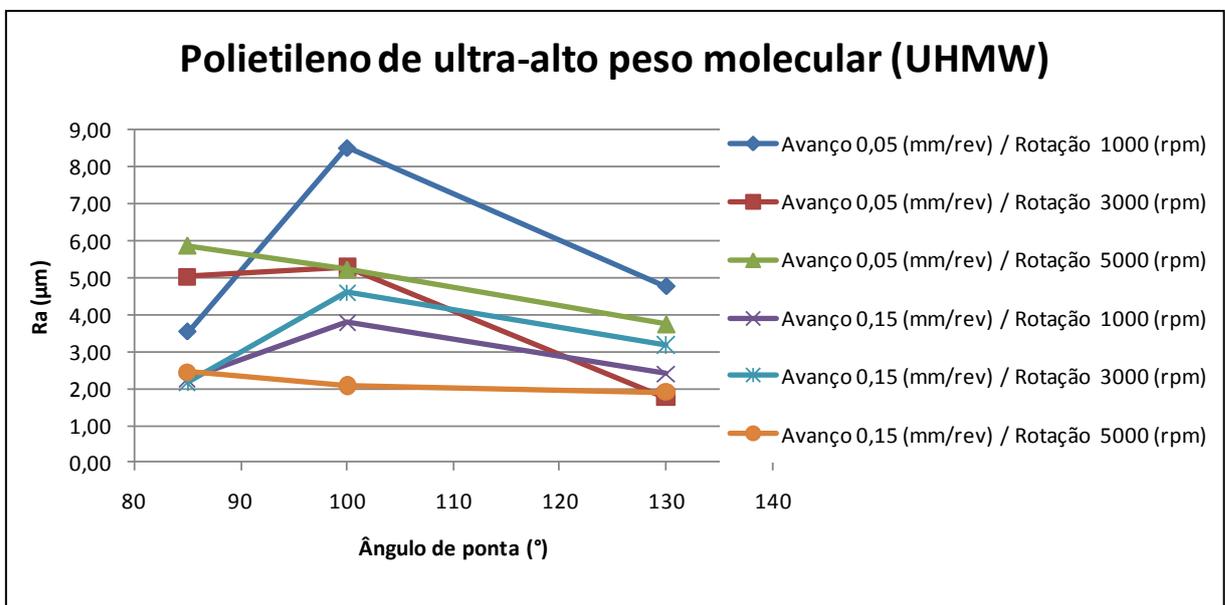
Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 40 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pela rotação no UHMW.**  
Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 41 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo avanço no UHMW.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**



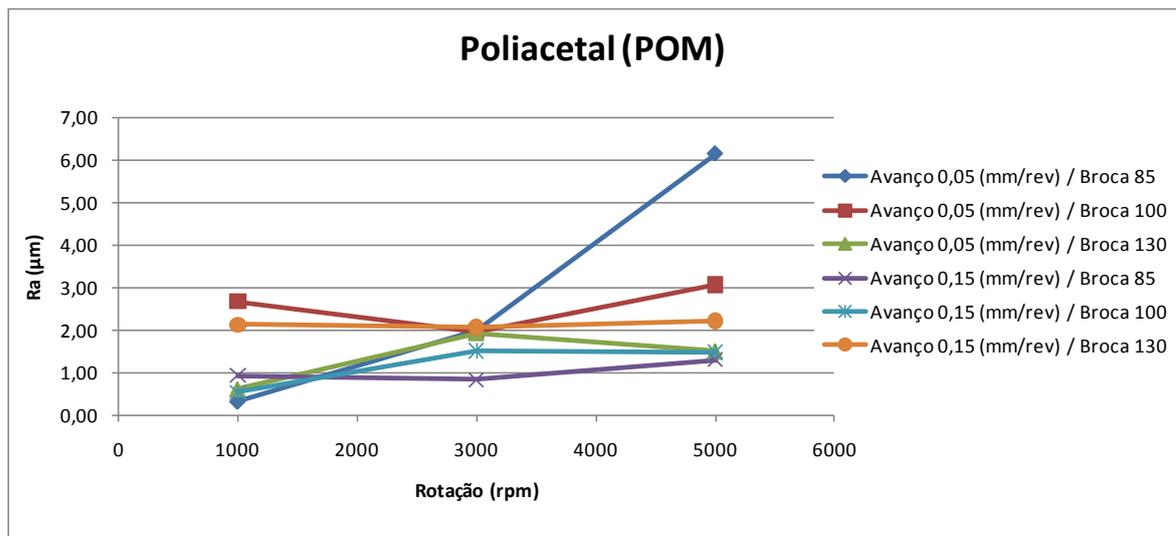
**Figura 42 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo ângulo de ponta da broca no UHMW.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

A tabela 14, a figura 43, figura 44 e figura 45 mostram os resultados da rugosidade média obtidos na furação do POM.

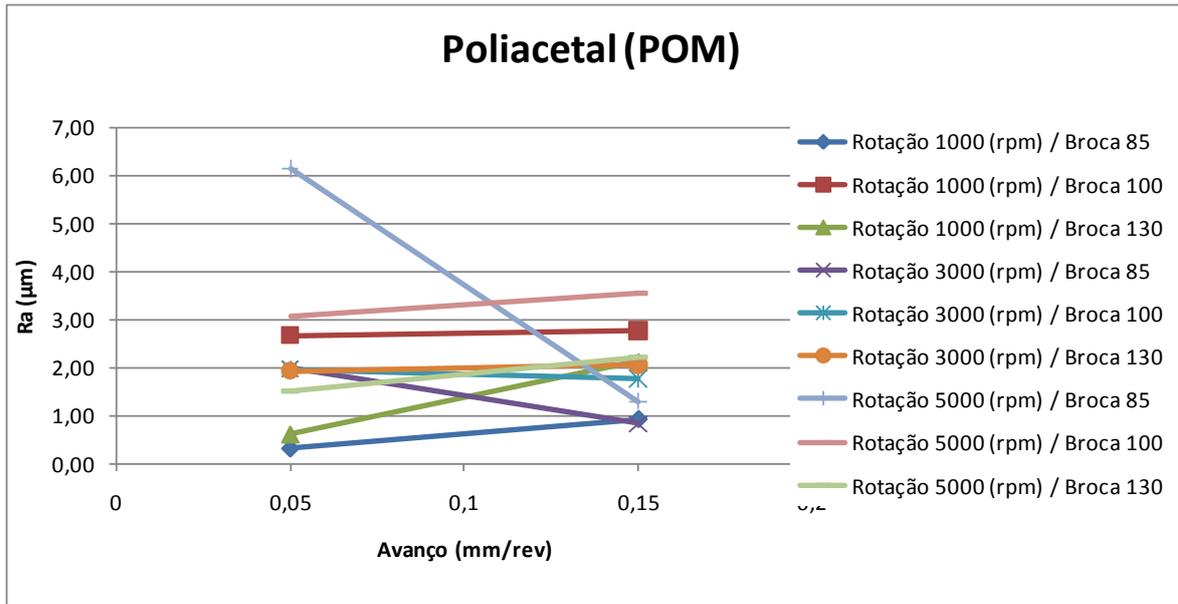
**Tabela 14**  
**Tabela com os dados da rugosidade média Ra no POM.**

Poliacetal (POM)								
Item	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ )					
			Broca 85°		Broca 100°		Broca 130°	
			Média	Desvio P.	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
1	1000	0,05	0,32	0,01	2,66	0,17	0,61	0,02
2		0,15	0,92	0,02	2,76	0,10	2,12	0,04
3	3000	0,05	1,97	0,18	1,96	0,33	1,92	0,07
4		0,15	0,82	0,04	1,76	0,01	2,06	0,07
5	5000	0,05	6,14	0,12	3,07	0,00	1,50	0,06
6		0,15	1,29	0,06	3,55	0,07	2,21	0,03

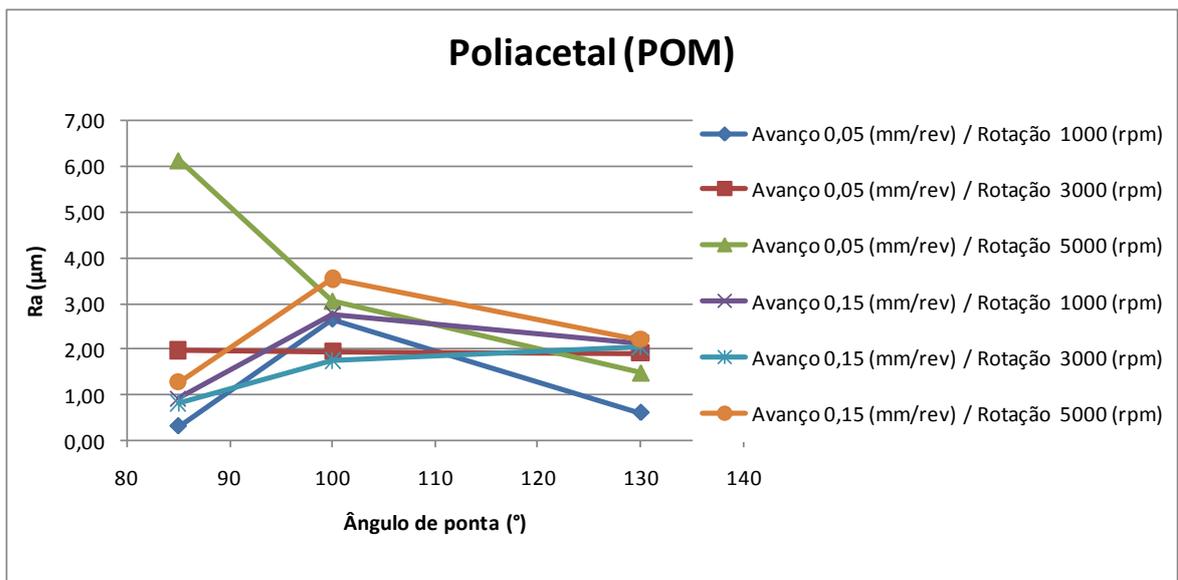
Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 43 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pela rotação no POM.**  
 Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 44 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo avanço no POM.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**



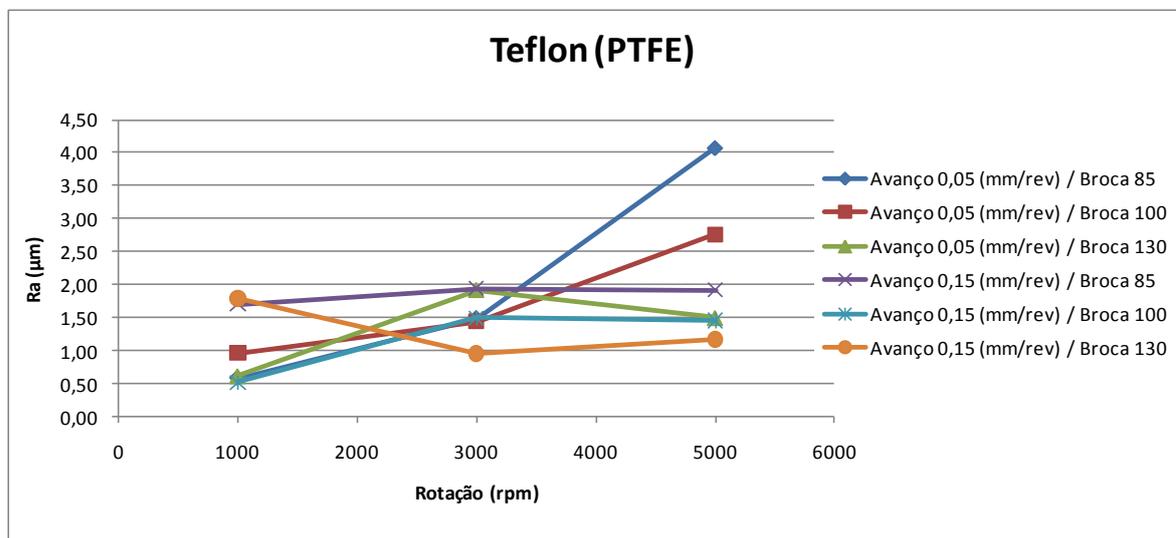
**Figura 45 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo ângulo de ponta da broca no POM.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

A tabela 15, a figura 46, figura 47 e figura 48 mostram os resultados da rugosidade média obtidos na furação do PTFE.

**Tabela 15**  
**Tabela com os dados da rugosidade média Ra no PTFE.**

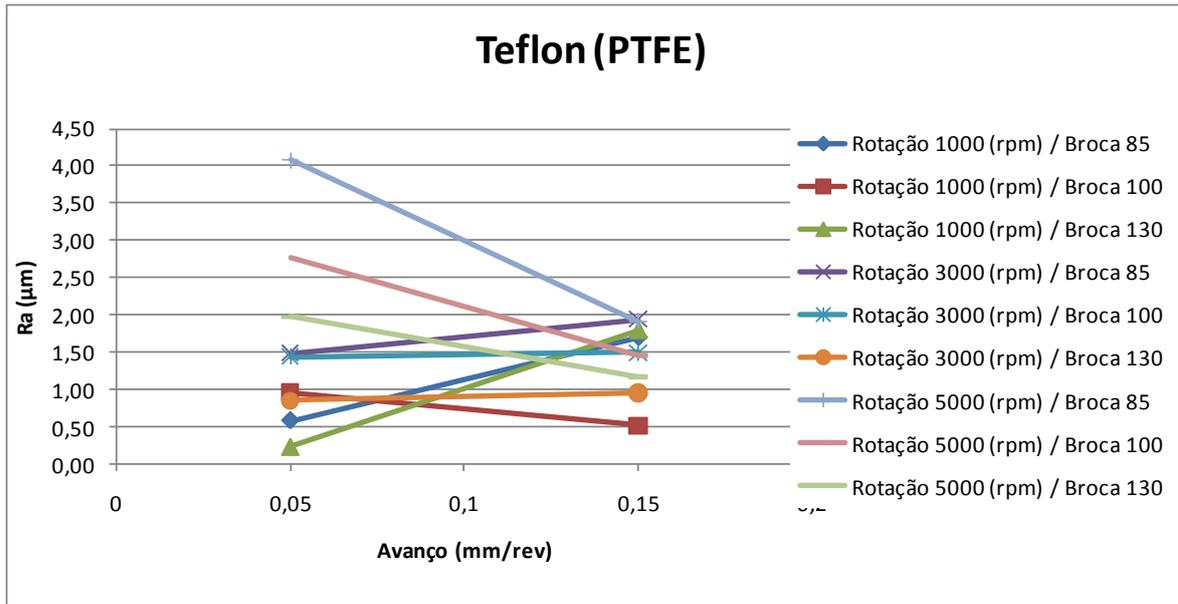
Teflon (PTFE)			Ra ( $\mu\text{m}$ )					
Item	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rev)	Broca 85°		Broca 100°		Broca 130°	
			Média	Desvio P.	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
1	1000	0,05	0,58	0,05	0,97	0,24	0,24	0,04
2		0,15	1,71	0,03	0,52	0,09	1,79	0,20
3	3000	0,05	1,49	0,09	1,44	0,04	0,85	0,05
4		0,15	1,95	0,06	1,50	0,05	0,96	0,09
5	5000	0,05	4,07	0,26	2,76	0,27	1,97	0,03
6		0,15	1,92	0,03	1,46	0,09	1,18	0,16

Fonte: Dados da pesquisa.

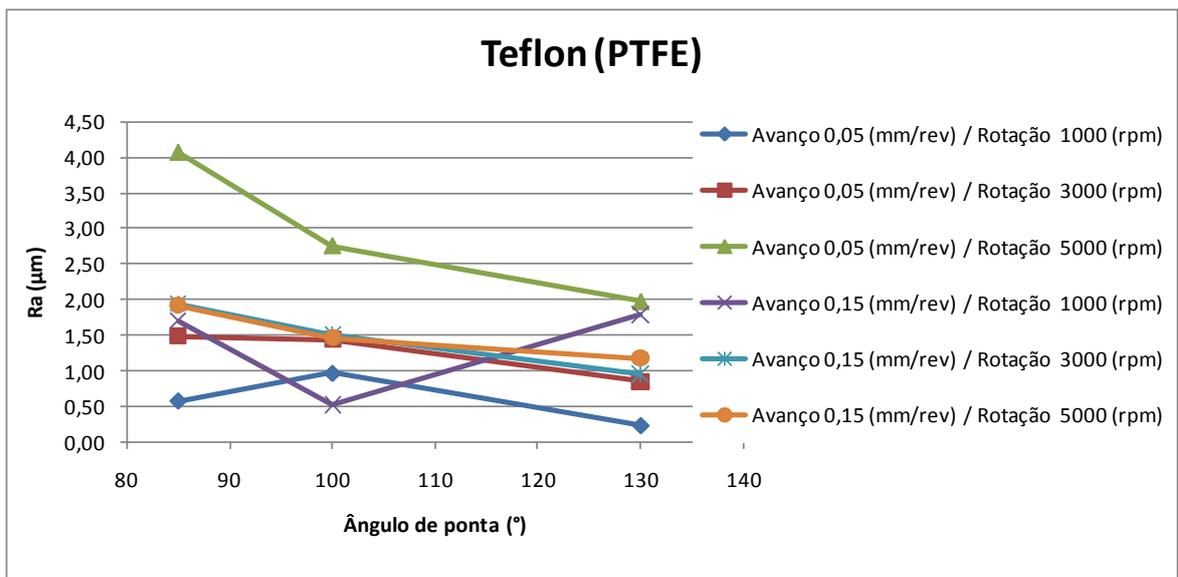


**Figura 46 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pela rotação no PTFE.**

Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 47 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo avanço no PTFE.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**



**Figura 48 - Gráfico com os dados de rugosidade média Ra pelo ângulo de ponta da broca no PTFE.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

Para todos os materiais, velocidades de rotação e ângulos de ponta da broca, não houve uma tendência clara nos dados de rugosidade média com a variação dos níveis dos fatores de controle. Uma possível explicação para isso pode ser observado nos dados de desvio padrão de cada material. Nestes dados apresentados, a porcentagem entre o valor de

desvio padrão com relação a sua média ultrapassa a 24% em certas combinações de parâmetros. A tendência mais notória se faz nas curvas do gráfico da

figura 41, onde o aumento da taxa de avanço no UHMW provoca uma diminuição da rugosidade na parede dos furos, exceto para a rotação de 3000 rpm e ângulo de ponta da broca de 130°. No poliacetal, POM, o aumento da taxa de avanço provoca um aumento na rugosidade média, o oposto do UHMW, exceto para a rotação de 3000 rpm com os ângulos de ponta das brocas de 85° e 100° e para a rotação de 5000 rpm com o ângulo de ponta da broca de 85°. O teflon, PTFE, foi o material que apresentou menor tendência nos dados de rugosidade média. Das nove combinações possíveis dos parâmetros de entrada, para a variação da taxa de avanço, cinco deles aumentaram a rugosidade média com o aumento da taxa de avanço, são eles: rotação de 1000 rpm com ângulos de ponta de 85° e 130°, rotação de 3000 rpm com ângulos de ponta de 85°, 100° e 130°. Com a rotação de 5000 rpm, o aumento da taxa de avanço provocou no PTFE a diminuição da rugosidade média nas paredes dos furos.

Segundo Tsao e Hocheng (2008a), a taxa de avanço e a velocidade de rotação trazem a maior contribuição para a rugosidade das paredes dos furos em matrizes poliméricas reforçadas com fibras de vidro. El-Sonbaty et al (2004), afirmam que baixos avanços em alguns casos melhoram a rugosidade da superfície devido a redução da força de avanço. Segundo os autores, em outros casos a furação com baixa taxa de avanço e alta rotação leva ao aumento de temperatura nas arestas de corte da ferramenta, ajudado pelo baixo coeficiente de condutividade térmica e baixa temperatura de transição dos plásticos. Este calor acumulado ao redor da ferramenta durante a furação destrói a estabilidade da matriz polimérica e produz um corte não uniforme e áspero, de acordo com Hocheng et al (1993). Deste modo, o calor gerado pelo atrito da ferramenta e o material ensaiado pode influenciar os resultados.

Em uma comparação dos materiais ensaiados, com relação a rugosidade média da superfície dos furos, nota-se que os menores valores de rugosidade foram medidos no PTFE, seguido pelo POM e UHMW. De acordo com o anexo A, nesta mesma ordem, PTFE, POM e UHMW, estes materiais possuem, do maior para o menor as seguintes especificações técnicas: densidade e temperatura de fusão e nesta ordem de materiais, porém, do menor para o maior o coeficiente de condutividade térmica.

Os dados analisados acima foram inseridos no programa estatístico para a aplicação do método de Taguchi. A tabela 16 mostra os dados utilizados para o cálculo da razão sinal-ruído, S/N, conforme a equação (1), quanto menor é o melhor, pois quanto menor a rugosidade na parede do furo melhor é o acabamento na superfície medida.

**Tabela 16**  
**Rugosidade média para cada material no arranjo ortogonal L<sub>9</sub> de Taguchi.**

Ensaio	Avanço (mm/rev)	Rotação (rpm)	Ângulo de ponta da broca (°)	Valores medidos Ra ( $\mu\text{m}$ )		
				UHMW	POM	PTFE
1	0,05	1000	85	3,53	0,32	0,58
2	0,05	3000	100	5,29	1,96	1,44
3	0,05	5000	130	3,76	1,50	1,97
4	0,15	1000	100	3,79	2,76	0,52
5	0,15	3000	130	3,19	2,06	0,96
6	0,15	5000	85	2,45	1,29	1,92
7	0,05	1000	130	4,77	0,61	0,24
8	0,05	3000	85	5,03	1,97	1,49
9	0,05	5000	100	5,23	3,07	2,76

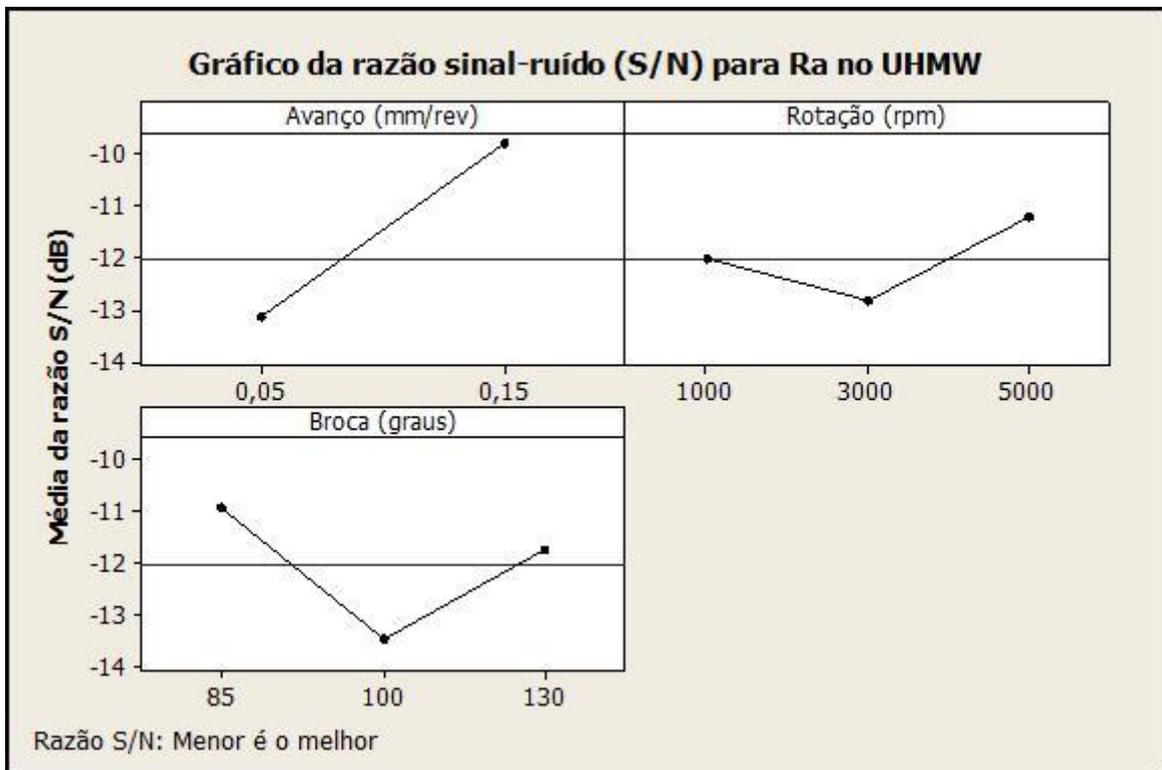
Fonte: Dados da pesquisa.

A tabela 17 e a figura 49 mostram os dados de saída do programa para a rugosidade média, Ra, na furação do UHMW.

**Tabela 17**  
**Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no UHMW.**

Nível	Avanço (dB)	Rotação (dB)	Broca (dB)
1	-13,149	-12,031	-10,932
2	-9,809	-12,856	-13,466
3		-11,22	-11,709
Delta	3,34	1,635	2,534
Influência	1	3	2

Fonte: Dados da pesquisa.



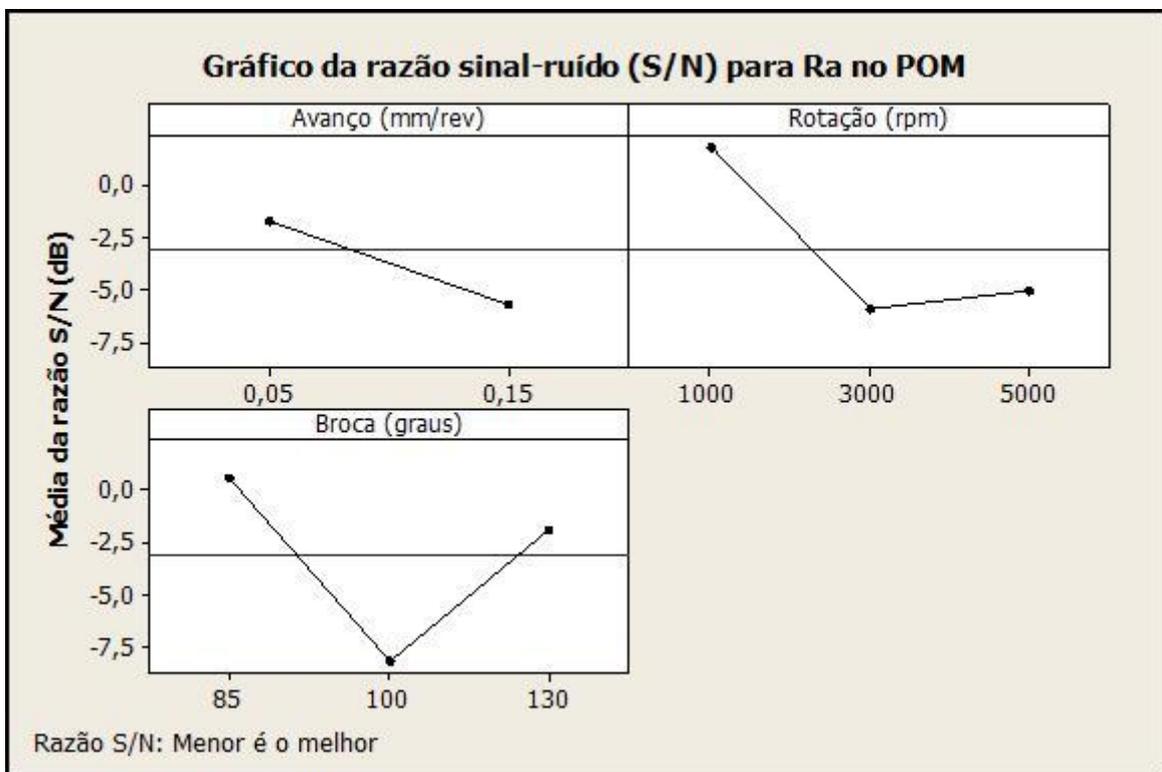
**Figura 49 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no UHMW.**  
 Fonte: Dados da pesquisa.

A tabela 18 e figura 50 a mostram os dados de saída do programa para a rugosidade média, Ra, na furação do POM.

**Tabela 18**  
Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no POM.

Nível	Avanço (dB)	Rotação (dB)	Broca (dB)
1	-1,807	1,7715	0,5937
2	-5,7679	-6,0041	-8,1357
3		-5,1492	-1,8399
Delta	3,9609	7,7756	8,7294
Influência	3	2	1

Fonte: Dados da pesquisa.



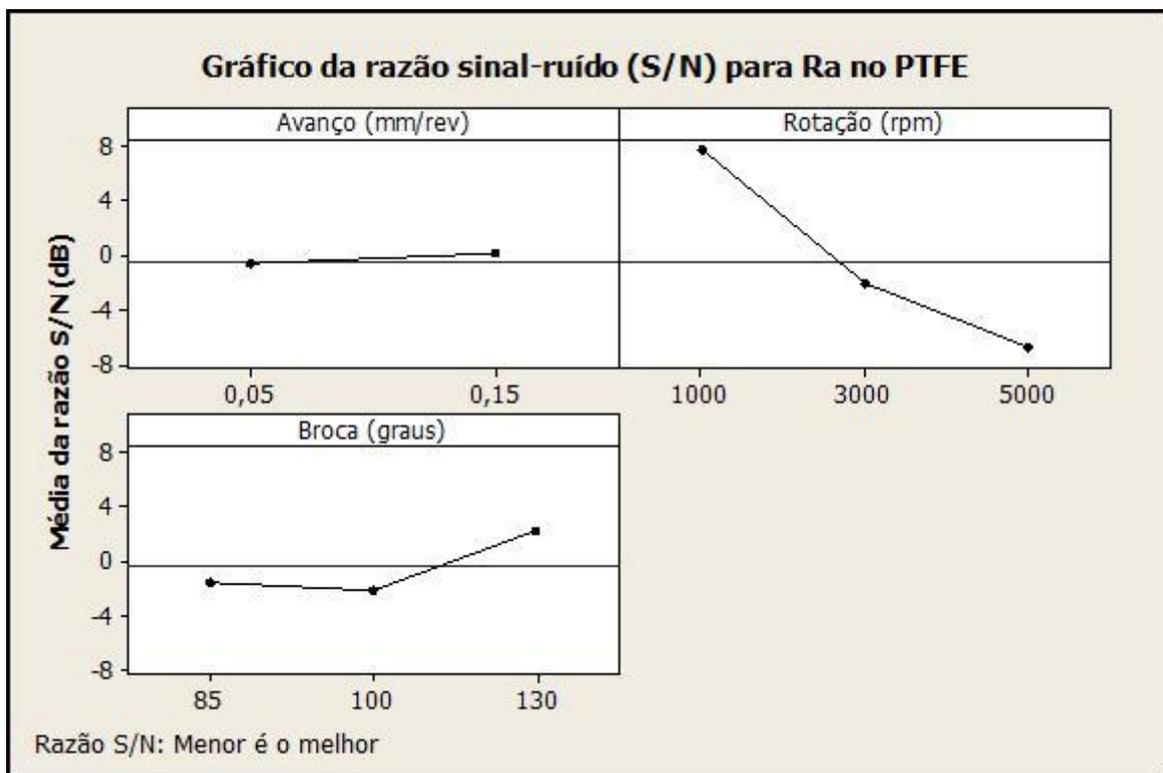
**Figura 50 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no POM.**  
Fonte: Dados da pesquisa.

A tabela 19 e a figura 51 mostram os dados de saída do programa para a rugosidade média, Ra, na furação do PTFE.

**Tabela 19**  
Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no PTFE.

Nível	Avanço (dB)	Rotação (dB)	Broca (dB)
1	-0,6957	7,6078	-1,4827
2	0,1144	-2,0888	-2,127
3		-6,7961	2,3327
Delta	0,8101	14,4039	4,4597
Influência	3	1	2

Fonte: Dados da pesquisa.



**Figura 51 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, da rugosidade Ra no PTFE.**  
Fonte: Dados da pesquisa.

Cada material apresentou um fator de controle diferente que causa maior impacto na rugosidade média da parede dos furos. O UHMW apresentou a taxa de avanço como fator de maior influência, entre os abordados neste trabalho, no acabamento superficial dos furos. No POM o fator de maior influência é o ângulo de ponta da broca e por fim, a velocidade de rotação da ferramenta causa um maior impacto na rugosidade média na furação do UHMW.

De acordo com os gráficos da resposta sinal-ruído a melhor combinação dos fatores de controle e seus respectivos níveis foram:

- UHMW: Taxa de avanço de 0,15 mm/rev, rotação de 5000 rpm e ângulo de ponta de broca com 85°;
- POM: Taxa de avanço de 0,05 mm/rev, rotação de 1000 rpm e ângulo de ponta de broca com 85°;
- PTFE: Taxa de avanço de 0,15 mm/rev, rotação de 1000 rpm e ângulo de ponta de broca com 130°;

### 4.3 Desvio de circularidade nos furos

A tabela 20, a figura 52, figura 53, e figura 54 mostram os resultados do desvio de circularidade obtidos na furação do UHMW.

**Tabela 20**  
**Tabela com os dados do desvio de circularidade no UHMW.**  
Polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMW)

Item	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rev)	Desvio de circularidade ( $\mu\text{m}$ )					
			Broca 85°		Broca 100°		Broca 130°	
			Média	Desvio P.	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
1	1000	0,05	17,0	7,1	13,0	0,0	23,5	4,9
2		0,15	18,0	7,1	8,5	0,7	13,0	5,7
3	3000	0,05	56,0	2,8	42,5	9,2	34,0	17,0
4		0,15	19,5	14,8	16,0	9,9	13,5	10,6
5	5000	0,05	29,0	-	18,5	4,9	23,0	8,5
6		0,15	22,0	5,7	22,5	10,6	25,0	5,7

Fonte: Dados da pesquisa.

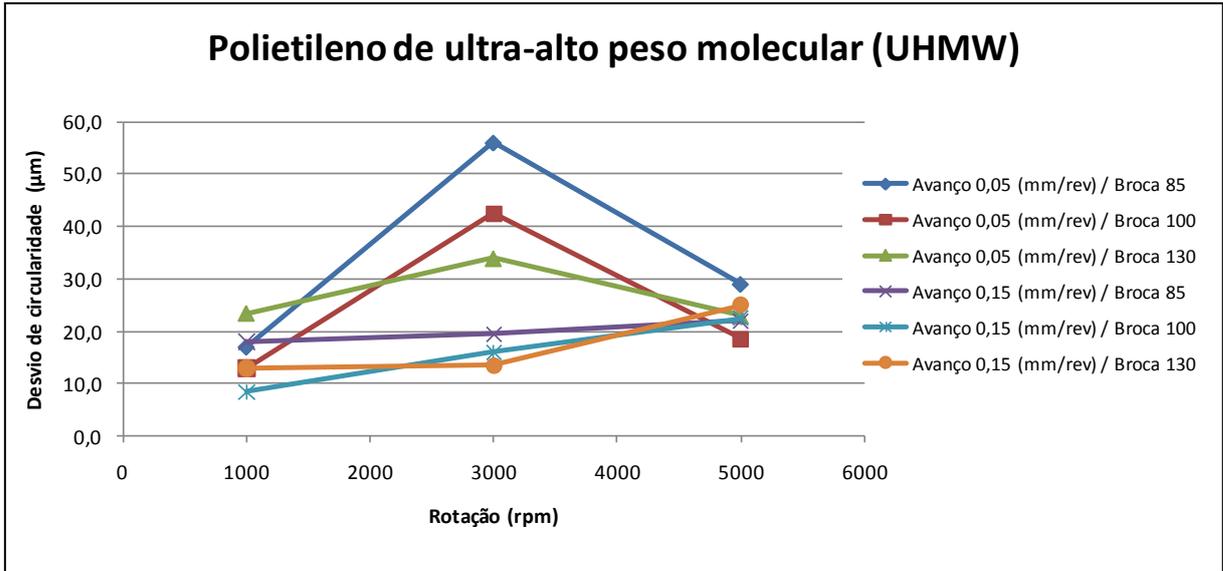


Figura 52 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pela rotação no UHMW.  
 Fonte: Dados da pesquisa.

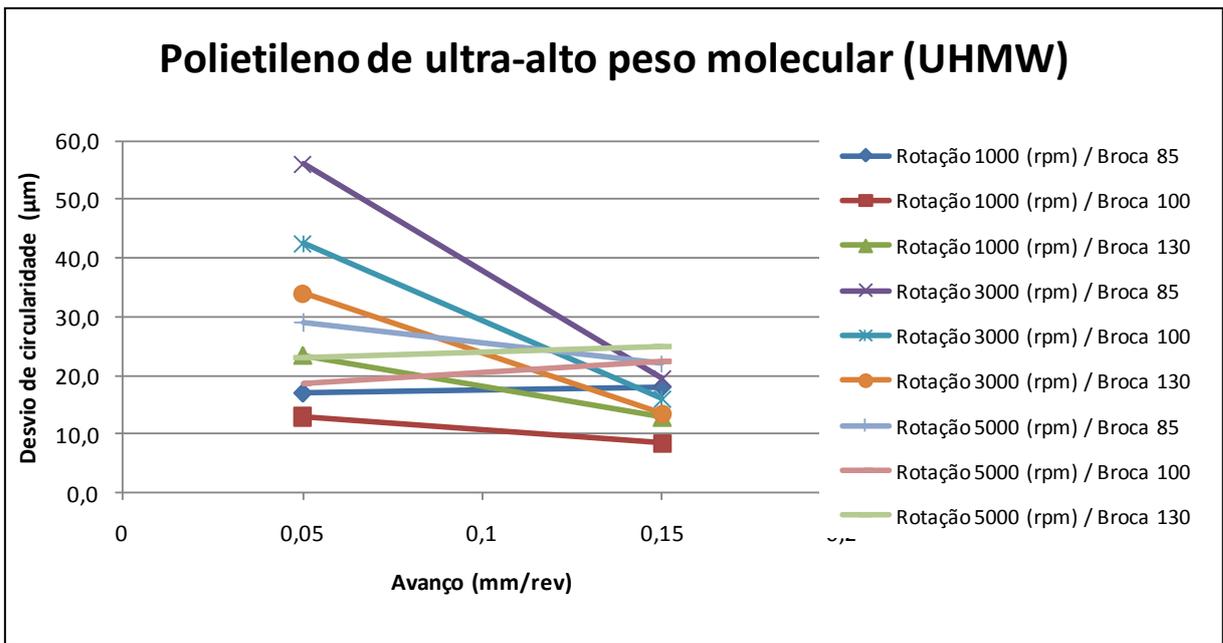
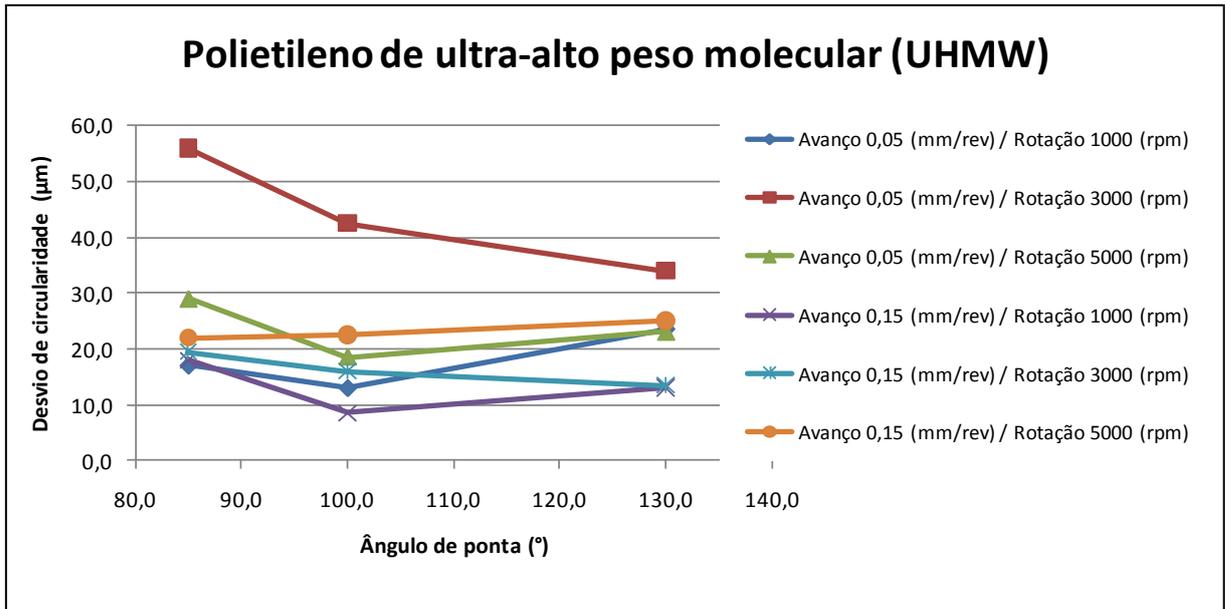


Figura 53 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo avanço no UHMW.  
 Fonte: Dados da pesquisa.



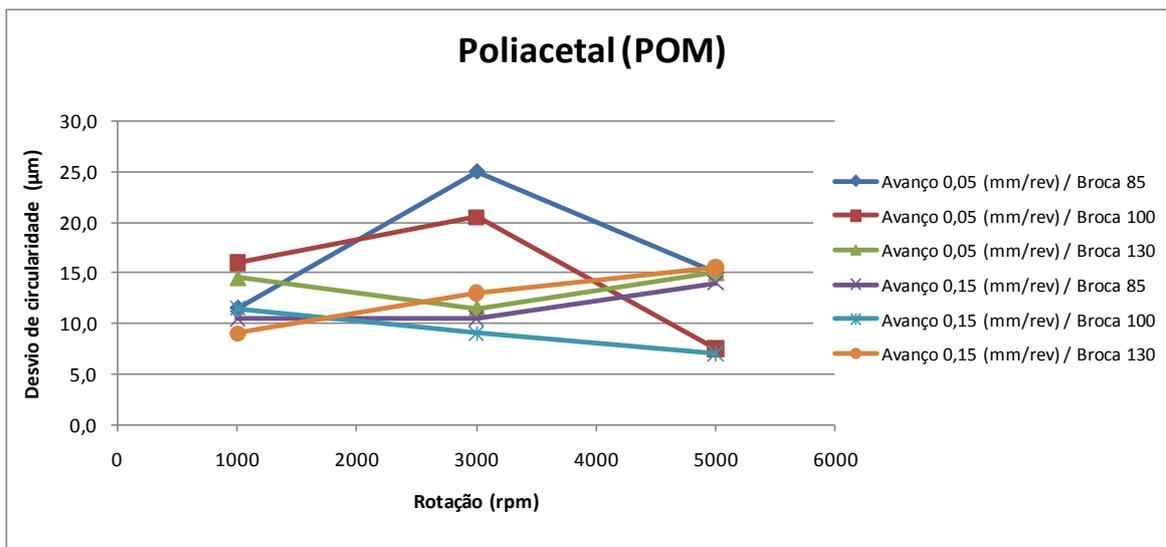
**Figura 54 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo ângulo de ponta da broca no UHMW. Fonte: Dados da pesquisa.**

A tabela 21, a figura 55, figura 56, e figura 57 mostram os resultados do desvio de circularidade obtidos na furação do POM.

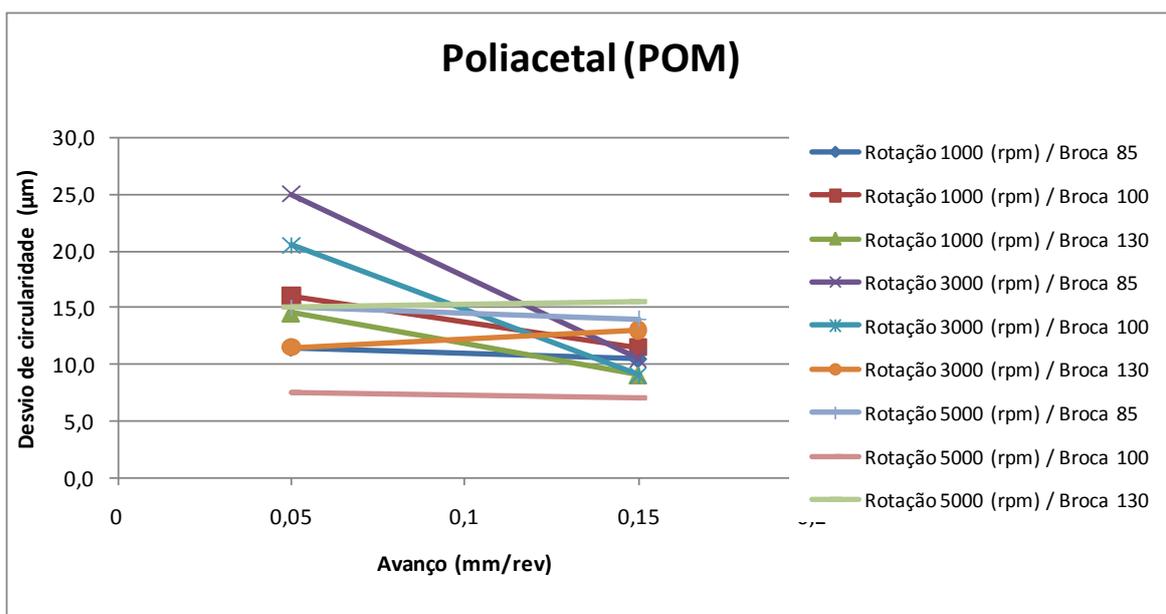
**Tabela 21**  
**Tabela com os dados do desvio de circularidade no POM.**

		Poliacetil (POM)						
Item	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rev)	Desvio de circularidade (µm)					
			Broca 85°		Broca 100°		Broca 130°	
			Média	Desvio P.	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
1	1000	0,05	11,5	0,7	16,0	0,0	14,5	7,8
2		0,15	10,5	2,1	11,5	2,1	9,0	5,7
3	3000	0,05	25,0	-	20,5	9,2	11,5	4,9
4		0,15	10,5	10,6	9,0	5,7	13,0	9,9
5	5000	0,05	15,0	0,0	7,5	0,7	15,0	9,9
6		0,15	14,0	1,4	7,0	1,4	15,5	3,5

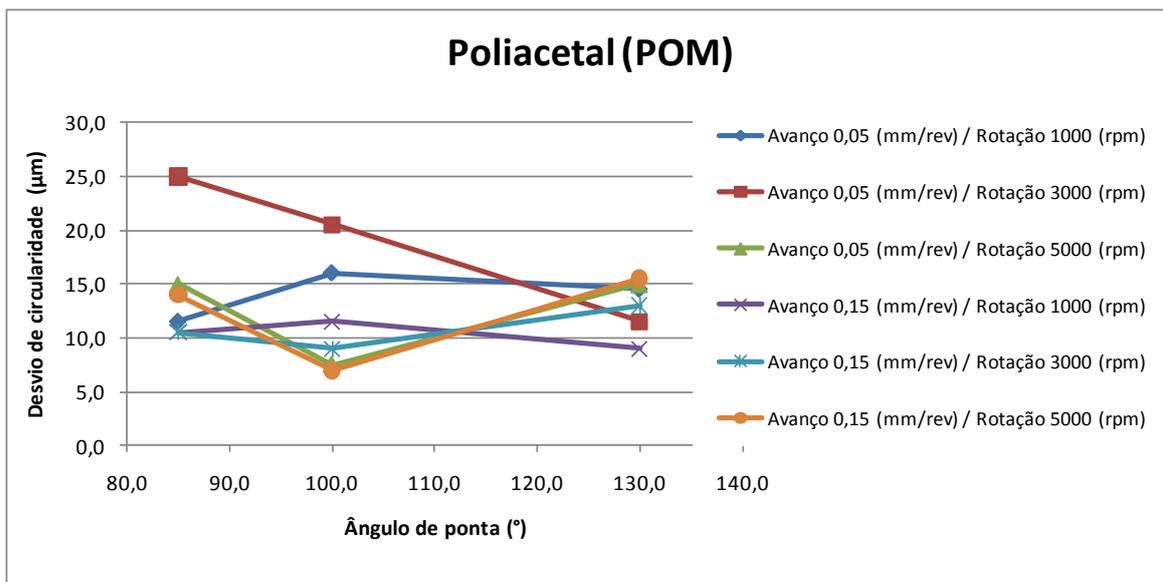
**Fonte: Dados da pesquisa.**



**Figura 55 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pela rotação no POM.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**



**Figura 56 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo avanço no POM.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**



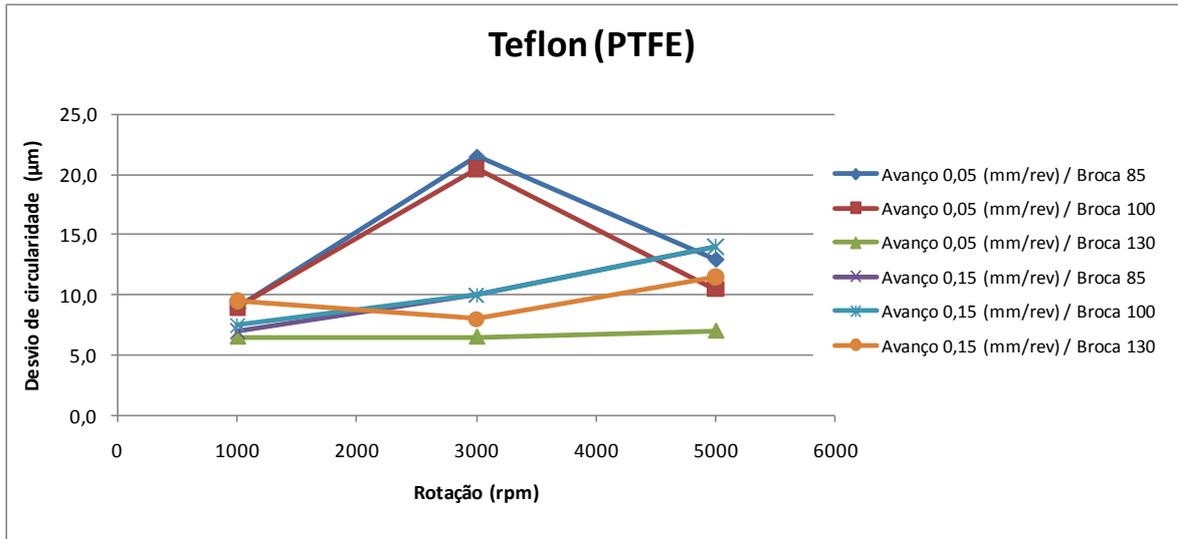
**Figura 57 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo ângulo de ponta da broca no POM.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

A tabela 22, a figura 58, figura 59 e figura 60 mostram os resultados do desvio de circularidade obtidos na furação do PTFE.

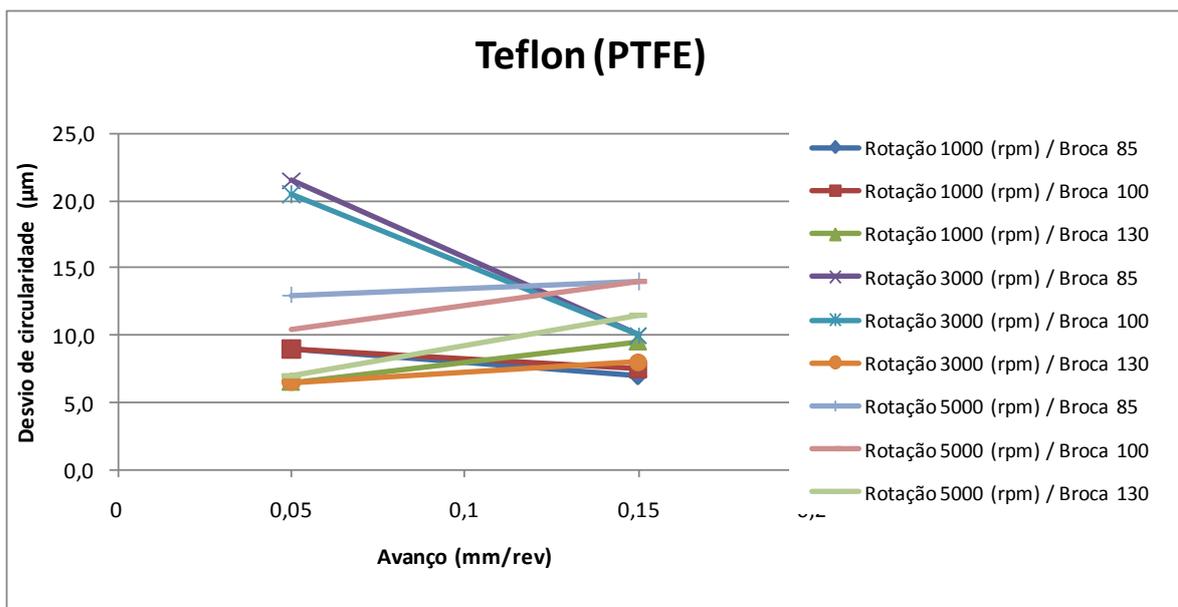
**Tabela 22**  
**Tabela com os dados do desvio de circularidade no PTFE.**

Teflon (PTFE)			Desvio de circularidade ( $\mu\text{m}$ )					
Item	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rev)	Broca 85°		Broca 100°		Broca 130°	
			Média	Desvio P.	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
1	1000	0,05	9,0	0,0	9,0	1,4	6,5	2,1
2		0,15	7,0	0,0	7,5	0,7	9,5	7,8
3	3000	0,05	21,5	0,7	20,5	2,1	6,5	0,7
4		0,15	10,0	8,5	10,0	7,1	8,0	7,1
5	5000	0,05	13,0	1,4	10,5	0,7	7,0	0,0
6		0,15	14,0	-	14,0	1,4	11,5	2,1

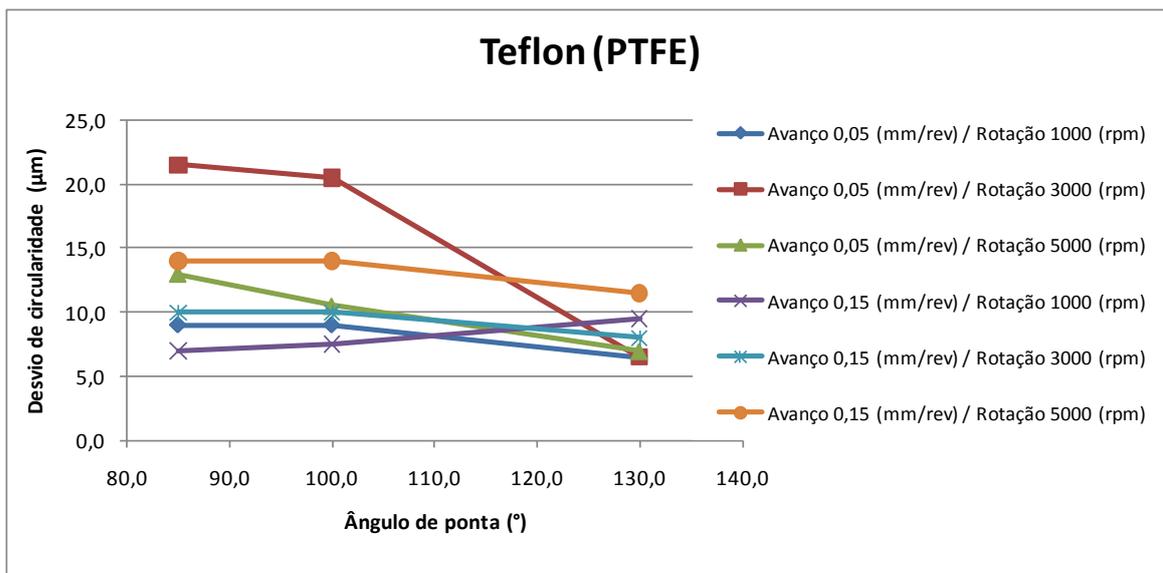
**Fonte: Dados da pesquisa.**



**Figura 58 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pela rotação no PTFE.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**



**Figura 59 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo avanço no PTFE.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**



**Figura 60 - Gráfico com os dados do desvio de circularidade pelo ângulo de ponta da broca no PTFE. Fonte: Dados da pesquisa.**

Foram retirados três valores dos dados apresentados acima para uma mostrar e analisar os dados que melhor representam o desvio de circularidade. Como a média e o desvio padrão são de apenas dois valores coletados, amostra e sua replicata, nos campos do desvio padrão que possuem um traço, o valor correspondente a sua média possui diretamente o valor coletado. São os seguintes valores retirados: 246,0  $\mu\text{m}$  no UHMW, 55,0  $\mu\text{m}$  para o POM e 35,8  $\mu\text{m}$  para o PTFE. Estes valores retirados não condiziam com o restante dos valores coletados, conforme se pode observar em suas respectivas tabelas.

Do mesmo modo em que para todos os materiais, velocidades de rotação e ângulos de ponta da broca, não houve uma tendência clara nos dados de rugosidade média, assim também ocorreu com os dados de desvio de circularidade. Observa-se nos dados de desvio padrão destes valores coletados uma possível explicação para este comportamento. Nestes dados apresentados, a porcentagem entre o valor de desvio padrão com relação a sua média ultrapassa a 75% em certas combinações de parâmetros. Notam-se certas particularidades em cada material com relação aos fatores de controle. Na figura 53 é notório que o aumento da taxa de avanço na furação do UHMW e na velocidade de rotação de 3000 rpm provoca uma

diminuição mais acentuada do desvio de circularidade. O POM, por sua vez, na figura 56, mostra que na velocidade de rotação de 500 rpm a variação da taxa de avanço não causa significativa alteração nos valores de desvio de circularidade. O teflon, PTFE, na figura 60, mostra que a variação do ângulo de ponta de 85° para 100° não causa significativa influência nos valores de desvio de circularidade comparado com os valores quando o ângulo de ponta da broca altera para 130°, exceto apenas para a rotação de 5000 rpm e avanço de 0,05 mm/rev.

Segundo Davim (2009), a velocidade de rotação da ferramenta é o principal fator que afeta a variação do diâmetro do furo e a taxa de avanço é o principal fator atuante na cilindridade. Devido ao calor gerado ao redor da ferramenta na furação de polímeros, conforme discutido na análise da rugosidade, da mesma maneira este fator atua nos valores de desvio de circularidade.

Assim como na comparação entre os materiais na avaliação da rugosidade, nota-se que os menores valores de desvio de circularidade foram medidos no PTFE, seguido pelo POM e UHMW. Assim as propriedades destes materiais influenciam da mesma maneira a rugosidade na parede dos furos e o desvio de circularidade, não se pode afirmar que influenciam com a mesma intensidade.

Os dados analisados acima foram inseridos no programa estatístico para a aplicação do método de Taguchi. A tabela 23 mostra os dados utilizados para o cálculo da razão sinal-ruído, S/N, conforme a equação (1), quanto menor é o melhor, pois quanto menor o desvio de circularidade nos furos, melhor é a peça acabada.

**Tabela 23**  
Desvio de circularidade para cada material no arranjo ortogonal L<sub>9</sub> de Taguchi.

Ensaio	Avanço (mm/rev)	Rotação (rpm)	Ângulo de ponta da broca (°)	Valores medidos C (μm)		
				UHMW	POM	PTFE
1	0,05	1000	85	17,0	11,5	9,0
2	0,05	3000	100	42,5	20,5	20,5
3	0,05	5000	130	23,0	15,0	7,0
4	0,15	1000	100	8,5	11,5	7,5
5	0,15	3000	130	13,5	13,0	8,0
6	0,15	5000	85	22,0	14,0	24,5
7	0,05	1000	130	23,5	14,5	6,5
8	0,05	3000	85	56,0	40,0	21,5
9	0,05	5000	100	18,5	7,5	10,5

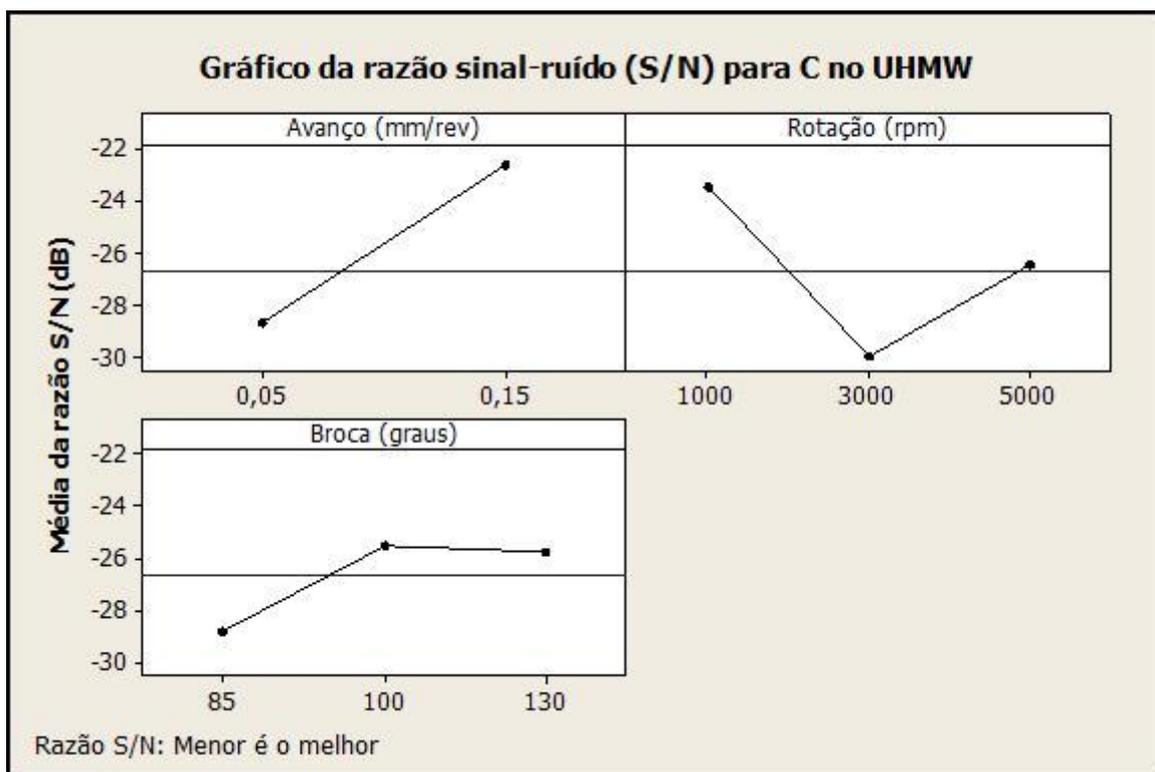
Fonte: Dados da pesquisa.

A tabela 24 e a figura 61 mostram os dados de saída do programa para o desvio de circularidade na furação do UHMW.

**Tabela 24**  
Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no UHMW.

Nível	Avanço (dB)	Rotação (dB)	Broca (dB)
1	-28,69	-23,54	-28,81
2	-22,68	-30,05	-25,5
3		-26,48	-25,75
Delta	6,01	6,51	3,31
Influência	2	1	3

Fonte: Dados da pesquisa.



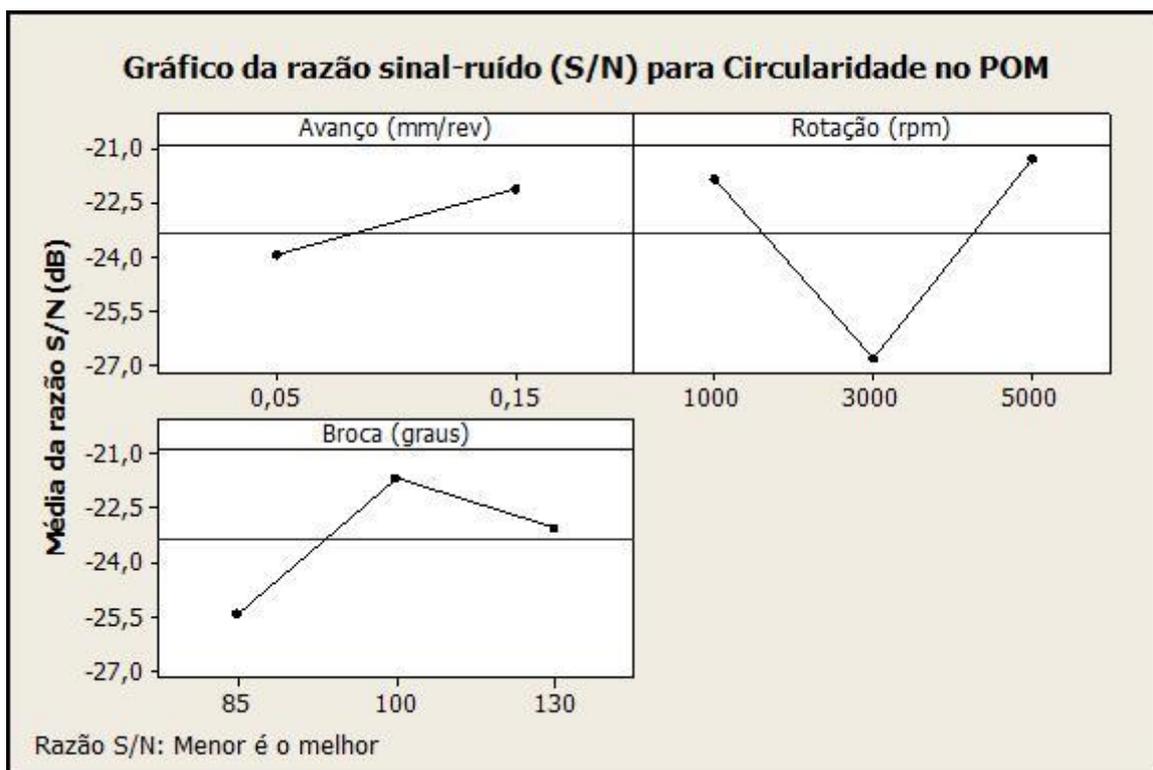
**Figura 61 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no UHMW.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

A tabela 25 e a figura 62 mostram os dados de saída do programa para o desvio de circularidade na furação do POM.

**Tabela 25**  
**Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no POM.**

Nível	Avanço (dB)	Rotação (dB)	Broca (dB)
1	-23,96	-21,89	-25,39
2	-22,14	-26,85	-21,65
3		-21,32	-23,01
Delta	1,82	5,54	3,74
Influência	3	1	2

**Fonte: Dados da pesquisa.**



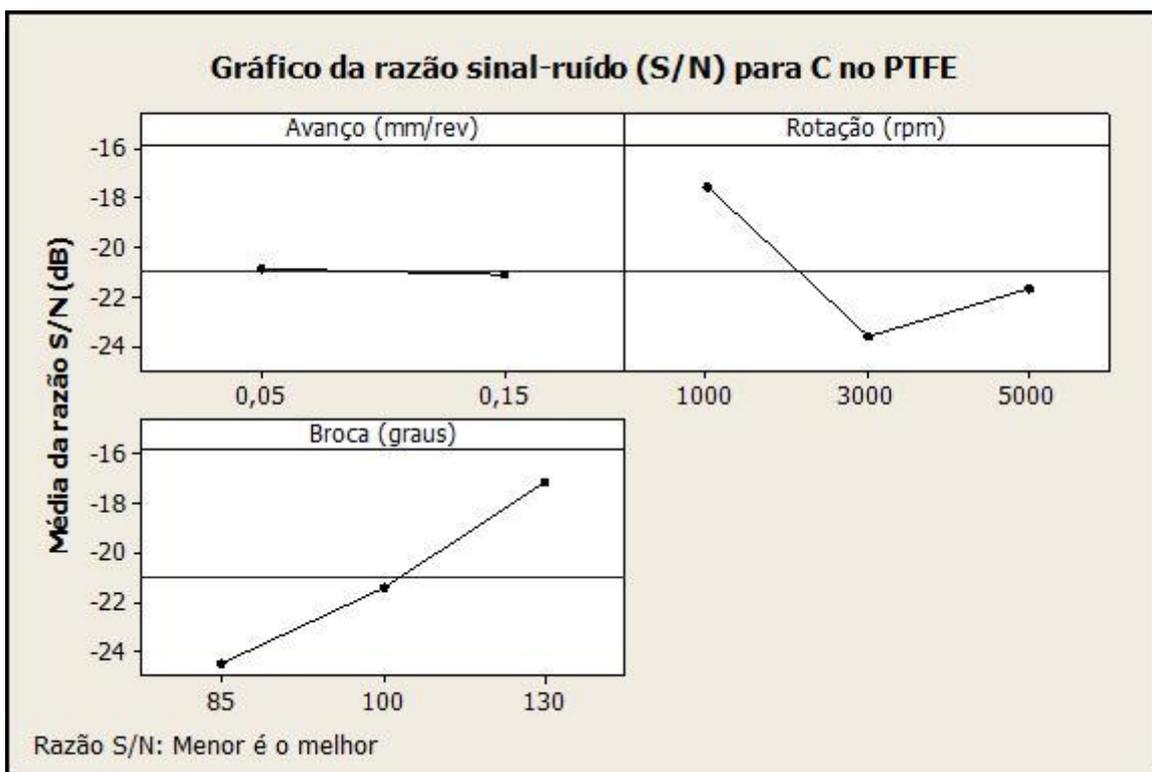
**Figura 62 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no POM.**  
**Fonte: Dados da pesquisa.**

A tabela 26 e a figura 63 mostram os dados de saída do programa para o desvio de circularidade na furação do PTFE.

**Tabela 26**  
**Tabela resposta da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no PTFE.**

Nível	Avanço (dB)	Rotação (dB)	Broca (dB)
1	-20,93	-17,61	-24,51
2	-21,12	-23,65	-21,39
3		-21,7	-17,07
Delta	0,19	6,03	7,43
Influência	3	2	1

**Fonte: Dados da pesquisa.**



**Figura 63 - Gráfico da razão sinal-ruído, menor é o melhor, do desvio de circularidade no PTFE. Fonte: Dados da pesquisa.**

Dois materiais apresentaram o mesmo fator de controle que causa maior impacto no desvio de circularidade nos furos. O UHMW e o POM apresentaram a rotação como fator de maior influência, enquanto que o PTFE apresentou o ângulo de ponta da broca como fator de maior influência no desvio de circularidade. O segundo fator que causa maior impacto para esta saída foi a taxa de avanço para o UHMW, ângulo de ponta para o POM e rotação para o PTFE. Destes, o último fator de maior influência para POM e PTFE é a taxa de avanço, enquanto que para o UHMW é o ângulo de ponta da broca.

De acordo com os gráficos da resposta sinal-ruído a melhor combinação dos fatores de controle e seus respectivos níveis foram:

- UHMW: Taxa de avanço de 0,15 mm/rev, rotação de 1000 rpm e ângulo de ponta de broca com 100°;

- POM: Taxa de avanço de 0,15 mm/rev, rotação de 5000 rpm e ângulo de ponta de broca com 100°;
- PTFE: Taxa de avanço de 0,05 mm/rev, rotação de 1000 rpm e ângulo de ponta de broca com 130°;

## 5 CONCLUSÃO

Sintetizando os resultados encontrados com relação a cada resposta mensurada, que são força de avanço na furação, o acabamento superficial das paredes dos furos e o desvio geométrico de circularidade, podemos concluir que:

- Força de avanço: O fator de controle ângulo de ponta da broca causa maior influência com relação a força de avanço na furação dos três materiais, UWMH, POM e PTFE, seguidos pela taxa de avanço e velocidade de rotação da ferramenta.
- Acabamento superficial dos furos: Cada material apresentou um fator de controle que possui um maior grau de influência. Uma explicação para este fato seria a diferença das propriedades de cada material, porém, com a falta de um comportamento padronizado desta resposta, com variação dos fatores de controle, faz-se entender que fatores não controlados influenciaram significativamente os resultados do experimento, como aquecimento ao redor da ferramenta e vibração mecânica, conforme confirmado nos dados de desvio padrão. Os fatores controlados que mais influenciaram esta resposta foram, taxa de avanço, ângulo de ponta da broca e velocidade de rotação da ferramenta, para UHMW, POM e PTFE respectivamente.
- Desvio geométrico de circularidade: Dois materiais apresentaram o mesmo fator de controle como parâmetro que causa maior influência na resposta desvio de circularidade. Da mesma forma que houve uma falta de padronização no comportamento da resposta acabamento superficial, ocorreu o mesmo com os dados de desvio de circularidade. Mais uma vez os fatores não controlados

influenciaram estes resultados de forma significativa, como aquecimento ao redor da ferramenta e vibração mecânica, conforme confirmado nos dados de desvio padrão. A velocidade de rotação foi o fator controlável que possui o maior grau de influência, para esta resposta, no UHMW e POM. Para o PTFE o ângulo de ponta da broca é o fator que possui maior grau de influência.

Analisando os dados da resposta apresentada pelo método de Taguchi pode-se concluir que:

- O método de Taguchi aplicado neste experimento refletiu o mesmo resultado analisado com a combinação de todos os fatores de controle com seus respectivos níveis. Desta forma apenas nove furos por material seriam necessários.

## **5.1 Proposta de continuidade de trabalho**

Os resultados apresentados neste trabalho podem ser completados investigando os tópicos a seguir:

- Analisar a força da ponta do rugosímetro para avaliar a sua influência nos dados de rugosidade;
- Coletar mais dados de rugosidade e circularidade;
- Calor gerado ao redor da ferramenta de corte.
- Vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça. Estudo dos modos de vibração neste conjunto e sua influência com relação à posição de cada furo.

## REFERÊNCIAS

- ABRÃO, A. M.; LIZARDO, B. F.; PINHEIRO, B. L.; CAMPOS RUBIO, J. Metodologia experimental para avaliação dos desvios geométricos em máquinas-ferramenta através do produto acabado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2009. n.1 p.130-139.
- AGOSTINHO, O. L. **Tolerâncias, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Bluecher, 1977.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14922: Semi acabados de UHMW** – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6162: Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais**. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6176: Brocas helicoidais**. Rio de Janeiro: ABNT, 1978.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405: Rugosidade das superfícies**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409: Tolerâncias geométricas, tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento**; generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288: Especificações geométricas do produto (GPS)** – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CAMPOS RUBIO, J.; ABRÃO, A. M.; FARIA, P. E.; ESTEVES CORREA, A.; PAULO DAVIM, J. Effects of high speed in the drilling of glass fiber reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor. **Machine Tools & Manufacture**, n.48, p.715–720, 2008.
- CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber, 2002.
- CAPELLO, Edoardo. Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates. **Journal of Materials Processing Technology**, n.148, p.186–195, 2004.
- DAVIM, J.P. **Machining Composite Materials**, London: ISTE-Wiley, 2009.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Artliber, 2001. 248p.

EL-SONBATY, I.; KHASHABA, U. A.; MACHALY, T. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. **Composite Structures**, n.63, p.329–338, 2004.

FARIA, P. E. **Estudo sobre a furação de compósito de resina epóxi reforçado com fibras de vidro**. 2007. 204f. Tese (Livre docência) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; CAMPOS RUBIO, J.; ESTEVES CORREIA, A.; ABRÃO, A. M.; PAULO DAVIM, E. J. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. **Journal of Materials Processing Technology**, n.203, p.431–438, 2008.

GERMAN NATIONAL STANDARD. **DIN 8580: Manufacturing Methods**; Classification. Berlin: [s.n.], 1974.

HOCHENG, H.; PWU, H. Y.; YAO, K. C. Machinability of some fiber reinforced thermoset and thermoplastics in drilling. **Materials Manufacturing Process**, n.8, p.653–682, 1993.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. F. **Usinagem dos metais**. Uberlândia: EDUFU, 1999. 224p.

MARK, J. E.; **Polymer data handbook**. New York: Oxford University Press, 1999.

MINITAB. **Taguchi designs**. Minitab user's guide 2, 2007 Cap. 24, 40p.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

NOVASKI, O. **Custos de usinagem**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1991.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1994.

PALMA, E. S., **Apostila de metrologia**, 2006. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte. (Desenvolvimento de material didático para a disciplina de Metrologia).

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust desing**. USA: Prentice-Hall, 1989.

ROSS, Phillip J. **Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade**. São Paulo: Makron: McGraw-Hill, 1991.

SANG-OOK, An.; EUN-SANG, Lee; SANG-LAI, Noh. A study on the cutting characteristics of glass fiber reinforced plastics with respect to tool materials and geometries. **Journal of Materials Processing Technology**, n.68, p.60-67, 1999.

STOETERAU, R. L. **Introdução a Usinagem dos Materiais**. 2004. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. (Desenvolvimento de material didático - Apostila didática).

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 2. ed. London: Butterworths, 1984. 245p.

TSAO, C. C. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill, **Materials and Design**, n.29, p.1740–1744, 2008.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. Effects of peripheral drilling moment on delamination using special drill bits. **Journal of Materials Processing Technology**, n.201, p.471–476, 2008a.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network. **Journal of Materials Processing Technology**, n.203, p.342–348, 2008b.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005.

## ANEXOS

Anexo A – Tabela com os principais dados dos materiais ensaiados.

<b>UHMW</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>Norma ASTM</b>	<b>Valores</b>
Massa molar média		$>7,0 \times 10^6$ g/mol
Densidade	D-792	0,93 g/cm <sup>3</sup>
Dureza	D-2240	62 Shore D
Coeficiente de atrito estático	D-1894	0,3
Coeficiente de atrito dinâmico	D-1894	0,2
Temperatura de fusão	D-3418	133 °C
Temperatura de deflexão térmica (0,45 MN/m <sup>2</sup> )	D-648	79 °C
Temperatura de deflexão térmica (1,81 MN/m <sup>2</sup> )	D-648	48 °C
Condutividade térmica a 23 °C	D-177	0,41 W/mK

**Fonte: (Wiebeck et al 2005)**

<b>POM</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>Norma ASTM</b>	<b>Valores</b>
Massa molar média		$2 - 9 \times 10^4$ g/mol
Densidade	D-792	1,42 g/cm <sup>3</sup>
Dureza	D-785	94 Rockwell
Coeficiente de atrito estático		0,32
Temperatura de fusão	D-2133	165 °C
Temperatura de deflexão térmica (0,45 MN/m <sup>2</sup> )	D-648	158 °C
Temperatura de deflexão térmica (1,81 MN/m <sup>2</sup> )	D-648	110 °C
Condutividade térmica a 23 °C	D-177	0,3 W/mK

Fonte: (Mark 1999)

<b>PTFE</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>Norma ASTM</b>	<b>Valores</b>
Massa molar média		$1 - 5 \times 10^7$ g/mol
Densidade	D-792	2,28 g/cm <sup>3</sup>
Dureza	D-2240	42 Shore D
Temperatura de fusão	D-3418	327 °C
Temperatura de deflexão térmica (0,45 MN/m <sup>2</sup> )	D-648	132 °C
Temperatura de deflexão térmica (1,81 MN/m <sup>2</sup> )	D-648	60 °C
Condutividade térmica a 23 °C		0,25 W/mK

Fonte: (Mark 1999)

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)