

# INVESTIGAÇÃO DA RUGOSIDADE E DESVIOS GEOMÉTRICOS (ERROS DE CILINDRICIDADE E CIRCULARIDADE) NO ALARGAMENTO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR

MARCELO DIAS FONSECA<sup>1</sup>; RICARDO AUGUSTO GONÇALVES<sup>2</sup>; ÁLISSON ROCHA MACHADO<sup>3</sup>

**Resumo:** O alargamento é um processo de usinagem que têm como finalidade melhorar o acabamento superficial de furos previamente usinados. Este é um processo bastante utilizado principalmente na produção de blocos de motores à combustão interna, normalmente produzidos em ferro fundido cinzento, alumínio e ferro fundido vermicular. Este último é um material que tem demandado mais pesquisas de usinagem, pelas dificuldades inerentes, incluindo estudos com relação à rugosidade e desvios geométricos (erros de cilindridade e circularidade) no alargamento do mesmo. O objetivo portanto é analisar o efeito da variação dos parâmetros de corte ( sobremetal, guia cilíndrica e avanço) na rugosidade e nos desvios geométricos( erros de cilindridade e circularidade) durante o processo de alargamento.

**Palavras-chave:** Alargamento, Ferro Fundido Vermicular, Rugosidade, Cilindridade e Circularidade.

**Abstract:** Reaming is a process of machining that aims to improve the surface finish of previously machined holes. This is a process widely used mainly in the production holes of blocks of internal combustion engines, usually produced in gray cast iron, aluminum and compact graphite iron. The latter being a material which has demanded more research and studies on their machinability, including those related to the roughness and geometric deviations (roundness and cylindricity) of the reaming process. The aim therefore is analyze the variation effect of cutting parameters on roughness and geometric deviations (errors of roundness and cylindricity) of this process.

**Key Words:** Tapping, Compact Graphite Iron, Roughness, Roundness and Cylindricity.

---

1 Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia (MG), 38400-902, [marcelodif@yahoo.com.br](mailto:marcelodif@yahoo.com.br)

2 Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia (MG), 38400-902, [ricardo\\_eng\\_mec@hotmail.com.br](mailto:ricardo_eng_mec@hotmail.com.br)

3 Orientador. Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Uberlândia (MG), 38400-902, [alissonm@mecanica.ufu.br](mailto:alissonm@mecanica.ufu.br)

## 1 – INTRODUÇÃO

O alargamento é um processo de usinagem onde uma ferramenta rotativa com geometria especial, faz um leve corte nos furos cilíndricos ou cônicos, a fim de reduzir a rugosidade superficial e melhorar acabamento dos mesmos (Metals Handbook, 1989). Essa operação também pode ser definida, segundo a norma DIN 8589, como um tipo de furação que utiliza uma ferramenta de alargar (alargadores) para produzir pequenas espessuras de cavacos e criar superfícies com alta qualidade dimensional e de forma (Da Silva, 2001).

A produção de um bloco de motor é uma seqüência de várias operações de usinagem até chegar totalmente pronto ao final do processo. Dentre essas operações a execução de furos é a mais comum, e exige operações posteriores a fim de melhorar a qualidade superficial, a precisão de forma e dimensional. Isso é conseguido empregando-se, entre outras, a operação de alargamento. Com a necessidade cada vez maior de se diminuir os custos de produção evitando prejuízos com refugos e retrabalhos na produção de furos, tem-se exigido muito das operações de usinagem, incluindo o alargamento, no sentido de otimização do processo produtivo. (Da Silva, 2001).

O artigo tem como objetivo, analisar o efeito da variação dos parâmetros de corte (sobremetal, guia cilíndrica e avanço) na rugosidade e nos desvios geométricos (erros de cilindricidade e circularidade) durante o processo de alargamento.

Dentre os componentes mecânicos que sofrem operações de alargamento, se destacam os blocos de motores de combustão, que normalmente são feitos de ferro fundido cinzento, embora hoje exista no mercado a utilização de ferros fundidos vermiculares e até mesmo os blocos de motores feitos de ligas de alumínio. Este trabalho será desenvolvido utilizando o ferro fundido vermicular.

O ferro fundido vermicular (*Compacted Graphite Iron (CGI)*), é um material atualmente muito difundido pela indústria automobilística para a fabricação de blocos de motor. Ele apresenta características de condutividade térmica e amortecimento próximas ao do ferro fundido cinzento, porém com propriedades mecânicas superiores, possibilitando a fabricação de motores com menor peso, melhor desempenho e redução de poluição ambiental por gases e ruídos. A utilização do ferro fundido vermicular apresenta como desvantagem sua pior usinabilidade quando comparado com o ferro fundido cinzento, motivando pesquisas na

melhoria de suas ligas, aprimoramento das técnicas de usinagem e desenvolvimento dos materiais das ferramentas (Xavier, 2003), onde se insere este trabalho.

Em aplicações mecânicas onde é requerida elevada exatidão, as tolerâncias dimensionais nem sempre são suficientes para garantir os requisitos de funcionalidade das peças (Rosas, 1983 apud Da Silva, 2001). As medidas do diâmetro, por exemplo, não são suficientes para assegurar que um furo seja totalmente cilíndrico. Na maioria dos casos, as peças são compostas por elementos geométricos, ligados entre si por superfícies de formatos simples, tais como superfícies planas, cilíndricas ou cônicas, que têm formas definidas e são posicionadas entre si. Durante a fabricação, a forma e o posicionamento relativo desses elementos geométricos são desviados da situação ideal. Se estes desvios irão comprometer a funcionalidade da peça, tolerâncias deverão ser aplicadas aos mesmos. As tolerâncias desses desvios (tolerância de forma, de orientação, de posição e de batimento) constituem as chamadas tolerâncias geométricas (Rosas, 1983 apud Da Silva, 2001).

Os desvios de forma são definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem, e podem ser classificados em: reticidade, circularidade, cilíndricidade, planicidade, etc.

Na fabricação de peças, não é possível produzir superfícies ideais, já que, ao observar num microscópio, as superfícies fabricadas apresentam ondulações e irregularidades, mesmo que a olho nu elas sejam completamente lisas. A rugosidade da superfície é um conjunto dessas irregularidades finas, resultantes da ação inerente do processo de corte. A altura ou profundidade isolada das irregularidades é medida em um pequeno comprimento de amostragem, denominado *cut-off*. A rugosidade média Ra é a média aritmética dos valores absolutos do perfil real ao perfil médio (König, 1981, apud Bezerra, 1998). O acabamento dos furos alargados depende, dentre outros fatores, da dureza das peças de trabalho, das condições das arestas de corte, do avanço e da velocidade de corte (Metals Handbook, 1989).

## **2 – MATERIAIS E MÉTODOS**

As brocas utilizadas na furação e os alargadores foram fornecidos pela empresa OSG Tungaloy Sulamericana de Ferramentas Ltda. Para a furação foram usadas brocas de metal duro com diâmetros diferenciados de acordo com o sobremetal necessário para realizar cada teste de alargamento. Os alargadores usados possuíam diâmetro nominal de 12 mm e eram de metal duro integral da classe K20 revestidos com AlCrN.

Neste trabalho foram usadas barras de ferro fundido vermicular (CGI), FV450 fornecidas pela Fundação Tupy. As características do ferro fundido vermicular estão mostradas na tabela 1.

Tabela 1: Características do ferro fundido vermicular (CGI) (fonte: Viana, 2004)

Matriz	Grafita					Dureza Brinell (HB 5/750)	Microdureza na Perlita (HV 01)			
	Forma	Nodular	Partículas p/mm <sup>2</sup>	Tamanho (%)						
				8	7			6	5	4
Perlita com ~2% de Ferrita	III-VI	7 %	218	22,0	37,0	33,0	7,0	1,0	237	321 a 366

Na primeira etapa deste trabalho foi feito um planejamento fatorial fracionário 2<sup>3</sup>, objetivando verificar a influência das variáveis avanço, guia cilíndrica, sobremetal e sistema de lubrificação/refrigeração na qualidade dos furos feitos com os alargadores de metal duro revestidos com AlCrN. Os parâmetros de corte foram divididos em dois níveis. Sobremetal (0,2 e 0,5 mm), guia cilíndrica (0,1 e 0,3 mm) e avanço da ferramenta (0,1 e 0,5 mm/rot). Foram utilizadas três atmosferas distintas de usinagem. Primeiramente foram feitos ensaios à seco e posteriormente foi usado um fluido lubrificante na forma de jorro e MQF ( mínima quantidade de fluido).

Tabela 2: Variáveis utilizadas – Primeira Etapa

NÍVEIS:	-1	+1
<b>Revestimento</b>	Alcrona® (AlCrN)	
<b>Sobremetal</b>	0,2	0,5
<b>Guia Cilíndrica</b>	0,1	0,3
<b>Avanço da ferramenta</b>	0,1	0,5
<b>Total de testes</b>	8 testes + 2 repetições de cada	

Tabela 3: Parâmetros de Corte – Primeira Etapa

Teste n°	Sobremetal	Guia	Fz(mm/rot)	Sist.
<b>1</b>	0,2	0,1	0,1	<b>Seco</b>
<b>2</b>	0,5	0,1	0,1	<b>Seco</b>
<b>3</b>	0,2	0,3	0,1	<b>Seco</b>
<b>4</b>	0,5	0,3	0,1	<b>Seco</b>
<b>5</b>	0,2	0,1	0,5	<b>Seco</b>
<b>6</b>	0,5	0,1	0,5	<b>Seco</b>
<b>7</b>	0,2	0,3	0,5	<b>Seco</b>
<b>8</b>	0,5	0,3	0,5	<b>Seco</b>
<b>9</b>	0,2	0,1	0,1	<b>MQF</b>
<b>10</b>	0,5	0,1	0,1	<b>MQF</b>
<b>11</b>	0,2	0,3	0,1	<b>MQF</b>
<b>12</b>	0,5	0,3	0,1	<b>MQF</b>
<b>13</b>	0,2	0,1	0,5	<b>MQF</b>
<b>14</b>	0,5	0,1	0,5	<b>MQF</b>
<b>15</b>	0,2	0,3	0,5	<b>MQF</b>
<b>16</b>	0,5	0,3	0,5	<b>MQF</b>
<b>17</b>	0,2	0,1	0,1	<b>Jorro</b>
<b>18</b>	0,5	0,1	0,1	<b>Jorro</b>
<b>19</b>	0,2	0,3	0,1	<b>Jorro</b>
<b>20</b>	0,5	0,3	0,1	<b>Jorro</b>
<b>21</b>	0,2	0,1	0,5	<b>Jorro</b>
<b>22</b>	0,5	0,1	0,5	<b>Jorro</b>
<b>23</b>	0,2	0,3	0,5	<b>Jorro</b>
<b>24</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>Jorro</b>

Já na segunda etapa foram comparados os resultados obtidos variando o tempo de parada, avanço e forma de retração do eixo árvore. Como é mostrado na tabela 4.

Tabela 4: Segunda Etapa

Testes	Tempo de Parada (s)	Avanço da Retração	Eixo Árvore
<b>1</b>	0	Convencional	Girando
<b>2</b>	2	Convencional	Girando
<b>3</b>	0	530	Girando
<b>4</b>	2	530	Girando
<b>5</b>	0	Convencional	Parado
<b>6</b>	2	Convencional	Parado
<b>7</b>	0	1120	Girando
<b>8</b>	2	1120	Girando

Eixo Árvore:

- Girando: Ferramenta usina e retorna à posição inicial com o eixo árvore girando.
- Parado: Ferramenta usina para de rotacionar e retorna à posição inicial com o eixo árvore parado.

Obs: Avanço de Retração convencional 10000 mm/min

Condições:

Sobremetal: 0,5 mm

Rotação: 1061 rpm

Guia Cilíndrica: 0,1 mm

Revestimento: Alcrona

Avanço: 530 mm/rot

Os ensaios de furação e alargamento foram realizados em um centro de usinagem ROMI Discovery 760, 11 KW, rotação de 10 a 10.000 rpm. Foram utilizados corpos de prova de ferro fundido vermicular, além das brocas e alargadores de metal duro como já foi informado anteriormente.

Para uma melhor fixação e menor batimento na realização do processo de alargamento, os alargadores eram presos à máquina através de um mandril hidromecânico de alta precisão Corogrip®, fabricado pela Sandvik Coromant®, mostrado na figura 1.



Figura 1: Mandril hidráulico usado nos ensaios de alargamento

Os furos foram do tipo cego com comprimento de 20 mm, e o comprimento de alargamento foi de 15 mm. Essa folga de 5 mm foi deixada no fundo do furo para que os

cavacos se acumulassem ali, e a ferramenta não corresse o risco de quebrar devido a este acúmulo de material.

Os corpos de prova de ferro fundido vermicular foram blanques retangulares com dimensões de 300 mm X 60 mm X 35 mm de espessura, fundidos com um vão no centro, como mostra a figura 2.



Figura 2: Vista Corpos de prova de ferro fundido vermicular

Para cada material da peça, o corpo de prova foi fixado na máquina, furado com as brocas nos diâmetros pré-determinados em função do sobremetal, e em seguida alargados. Cada ensaio e suas duas repetições foram feitos seguindo o esquema mostrado na figura 3. Após a usinagem completa de alargamento o corpo de prova foi serrado nas dimensões adequadas devido ao tamanho limitado do equipamento para medição dos desvios de forma e parâmetros de acabamento.

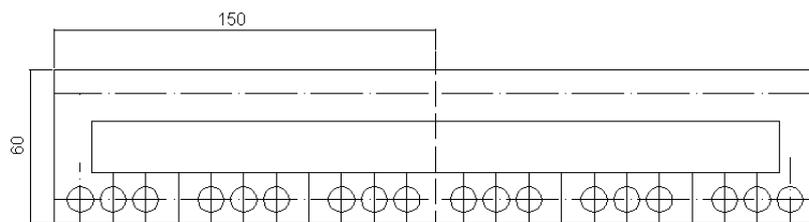


Figura 3: Esquema de furação dos corpos de prova

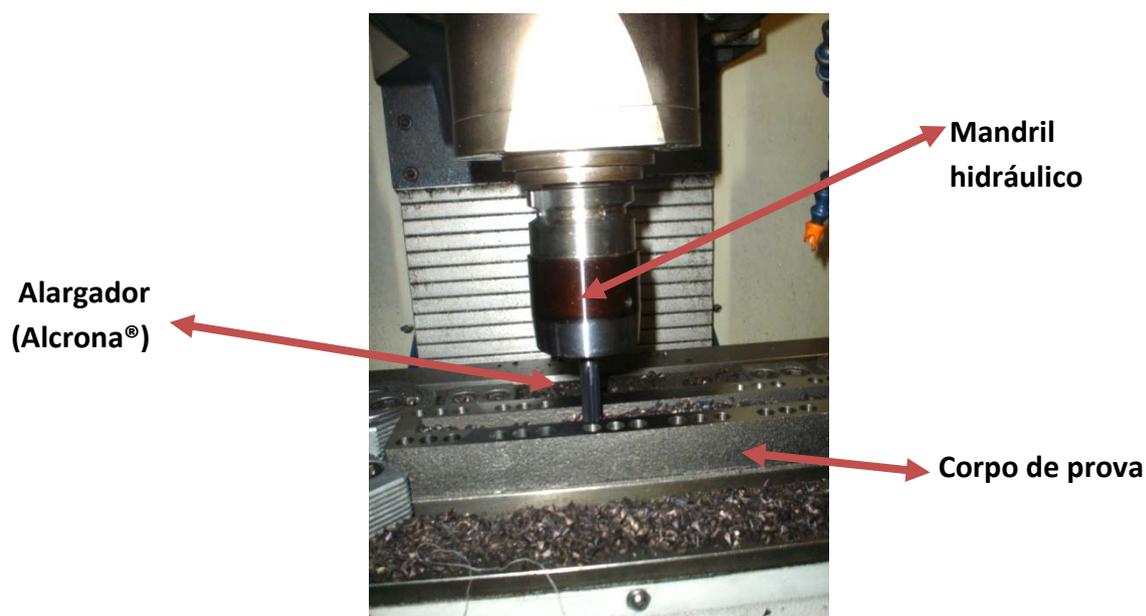


Figura 4: Montagem de corpo de prova e mandril com ferramenta prontos para a usinagem

Para cada furo foi medida a circularidade, a cilindridade e a rugosidade na parede do mesmo. A circularidade e a cilindridade foram medidas em um circularímetro, fabricado pela Taylor Hobson, modelo Talyrond 131, disponível no Laboratório de Metrologia da FEMEC/UFU. A precisão deste equipamento é de  $0,03 \mu\text{m}$  e sua capacidade máxima de medição é de 370 mm e 225 mm para o diâmetro e altura, respectivamente. Este equipamento está mostrado na figura 5.



Figura 5: Circularímetro Talyrond 131 – Taylor Hobson

A circularidade foi medida em três posições ao longo do furo alargado: 3 mm, 7,5 mm e 12 mm de profundidade, como pode ser visto na figura 6. Em seguida realizou-se medição dos desvios de cilindricidade de cada furo. Exemplos de gráficos com valores deste desvio são mostrados na Figura 7

A rugosidade da parede dos furos foi medida utilizando-se um rugosímetro portátil Surtronic 3+, modelo 112/1590, fabricado pela Taylor Hobson. Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5  $\mu\text{m}$ , resolução de 0,01  $\mu\text{m}$  e trabalha com carga de 150 a 300 mg. O rugosímetro utilizado pode ser visto na figura 8. Foram medidos os parâmetros Ra, Rz e Rt, utilizando um *cut-off* de 0,8 mm.

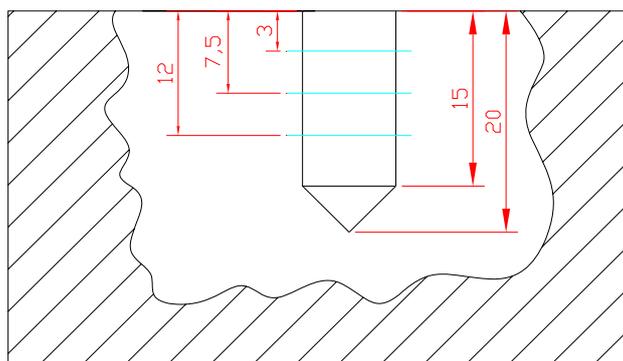


Figura 6: Planos de medição da circularidade

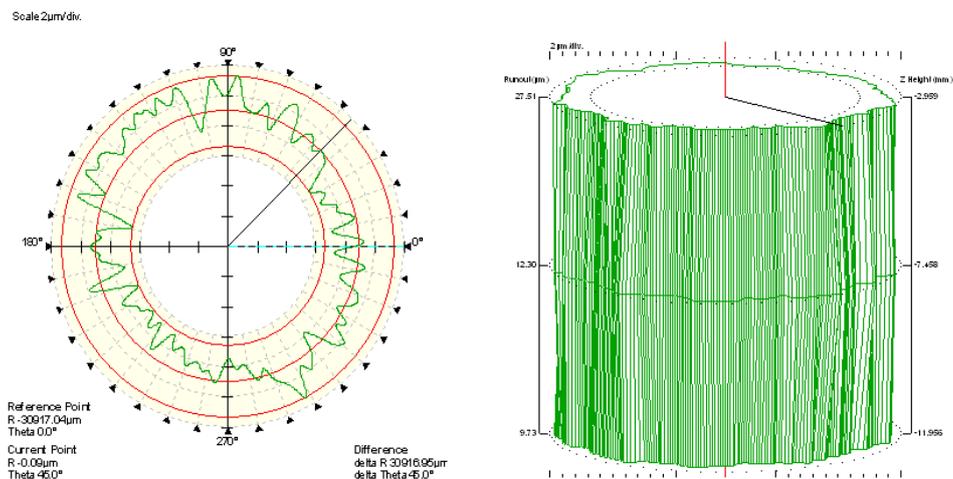


Figura 7: Exemplo de gráfico produzido pelo software do Circularmetro após medição de desvio de circularidade e cilindridade de um furo usinado.



Figura 8: Rugosímetro Surtronic 3+ da Taylor Hobson

Na análise de todos os parâmetros de qualidade (variáveis de saída) foi utilizada a análise de variância (ANOVA) com índice de confiabilidade de 95%. Os quadros de ANOVA foram gerados utilizando o software Statística 7.0.

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos foram analisados por gráficos desenvolvidos no Excel e por análise de Variância (ANOVA) a partir do Statistica.

#### 3.1-Primeira Etapa – Comparação dos Sistemas de Lubrificação/Refrigeração

##### 3.1.1-Erros de Forma – Circularidade e Cilindricidade

Os valores obtidos para os erros de circularidade e cilindridade nos testes da primeira etapa do alargamento do ferro fundido vermicular estão mostrados nas tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5: Erros de Circularidade

Testes	ERRO DE CIRCULARIDADE ( $\mu\text{m}$ )								
	Furos:								
	1			2			3		
	Planos de medição:								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>1</b>	37,1	126,	132,	29,4	111,	127,	26,4	114,	118,
<b>2</b>	23,4	15,2	29,9	13,3	15,3	13,9	13,0	17,6	28,6
<b>3</b>	107,	99,5	105,	109,	103,	107,	110,	109,	98,3
<b>4</b>	22,9	13,7	23,5	22,6	16,7	19,0	30,8	27,0	40,0
<b>5</b>	30,3	112,	112,	31,4	112,	116,	124,	124,	118,
<b>6</b>	9,43	12,9	12,5	11,5	11,5	10,1	11,6	6,63	11,4
<b>7</b>	114,	97,4	84,5	113,	113,	110,	110,	94,2	84,4
<b>8</b>	11,1	17,4	16,1	22,1	22,3	25,4	9,24	9,92	11,5
<b>9</b>	27,4	116,	125,	115,	115,	109,	118,	110,	118,
<b>10</b>	8,66	10,7	10,7	3,3	3,07	2,68	21,5	23,2	23,2
<b>11</b>	8,47	8,12	5,31	11,7	11,6	10,7	8,72	7,36	7,86
<b>12</b>	11,2	11,0	10,8	4,03	3,45	3,63	2,47	4,39	6,92
<b>13</b>	107,	99,5	94,0	103,	101,	100,	104,	94,0	86,8
<b>14</b>	3,75	3,61	3,42	3,55	3,32	3,53	3,2	3,36	3,36
<b>15</b>	11,3	5,45	7,18	8,1	10,0	9,36	9,53	9,21	8,77
<b>16</b>	6,06	5,9	6,05	6,35	5,78	5,82	21,2	12,2	19,0
<b>17</b>	6,07	5,22	6,15	4,48	4,56	4,11	3,9	3,82	3,66
<b>18</b>	5,34	8,49	8,8	7,63	8,79	10,2	3,22	2,79	10,2
<b>19</b>	6,11	6,69	6,52	6,94	6,11	6,9	5,02	4,92	6,02
<b>20</b>	4,14	4,17	4,78	6,72	6,85	6,11	17,7	3,04	15,3
<b>21</b>	29,1	27,4	28,7	6,24	6,25	6,19	6,72	6,76	6,7
<b>22</b>	5,42	5,67	5,71	5,78	5,75	5,67	6,35	6,18	6,81
<b>23</b>	3,49	3,38	3,74	4,4	4,32	3,73	4,84	5,35	5,4
<b>24</b>	6,05	6,9	6,9	3,22	4,12	4,35	9,41	12,1	12,1

Tabela 6: Erros de Cilindricidade

Erro de Cilindricidade			
Testes	1	2	3
<b>1</b>	133,08	129,01	120,38
<b>2</b>	29,93	15,35	28,61
<b>3</b>	107,04	109,44	110,7
<b>4</b>	23,53	22,65	40,09
<b>5</b>	116,43	121,06	124,61
<b>6</b>	17,51	11,71	11,62
<b>7</b>	114,96	113,47	110,64
<b>8</b>	18,33	25,4	11,57
<b>9</b>	125,58	115,76	118,55
<b>10</b>	10,72	3,35	23,29
<b>11</b>	8,47	11,83	8,22
<b>12</b>	11,26	4,03	6,92
<b>13</b>	107,59	103,89	104,76
<b>14</b>	1,77	3,55	3,36
<b>15</b>	11,49	10,08	9,53
<b>16</b>	6,06	6,35	21,28
<b>17</b>	6,17	4,57	3,9
<b>18</b>	8,8	10,34	10,34
<b>19</b>	6,86	6,96	6,19
<b>20</b>	4,81	6,86	17,72
<b>21</b>	29,23	6,25	6,83
<b>22</b>	5,71	5,79	6,84
<b>23</b>	4,08	4,54	5,49
<b>24</b>	6,9	4,35	12,13

De acordo com a análise de variância, é possível afirmar com 95% de confiabilidade que os parâmetros que influenciaram significativamente os erros geométricos foram: a guia, o sobremetal, o sistema de lubrificação/refrigeração e a interação dos dois últimos.

A figura 9 mostra a tendência da variação dos erros em função do parâmetro sobremetal.

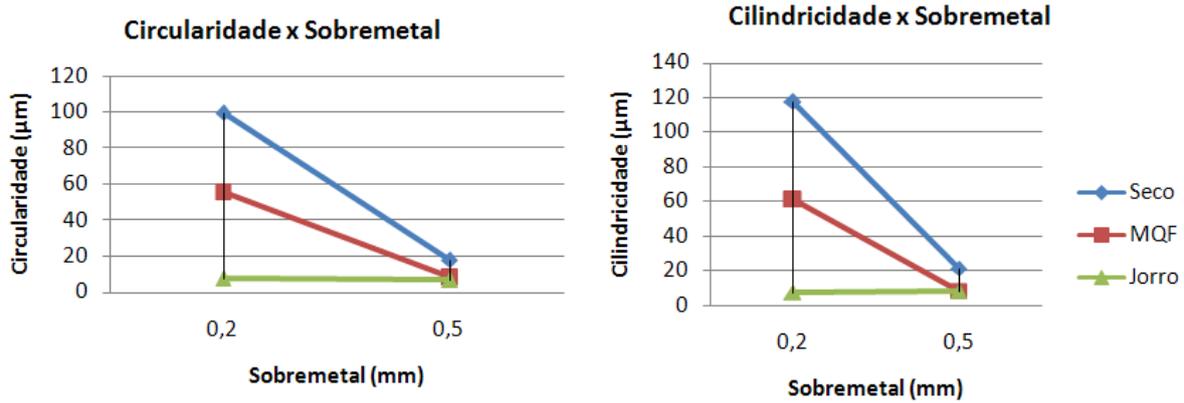


Figura 9: Circularidade/Cilindricidade x Sobremetal

Pode-se observar que os erros de circularidade e cilindridade tendem a ser menores quanto maior for o sobremetal, independentemente do sistema de lubrificação/refrigeração. Entre as possíveis justificativas para estes resultados, pode-se esperar que o maior sobremetal proporcionou um corte mais efetivo, podendo o menor sobremetal de 0,2 mm ser suficientemente pequeno para proporcionar uma retirada de cavaco mais contínua e efetiva, levando a maior erro de forma.

Os melhores resultados para os erros geométricos obtidos foram com os maiores valores de guia cilíndrica. Neste caso a maior guia cilíndrica promoveu um melhor trabalho de alisamento e ajuste dimensional da parede do furo. Mas houve uma exceção no alargamento realizado à Seco, em que a maior Guia resultou em maior erro de circularidade. O que pode ter acontecido é que a maior guia promoveu um maior atrito com a parede do furo, aumentando conseqüentemente a temperatura, e alterando assim o erro de circularidade do furo.

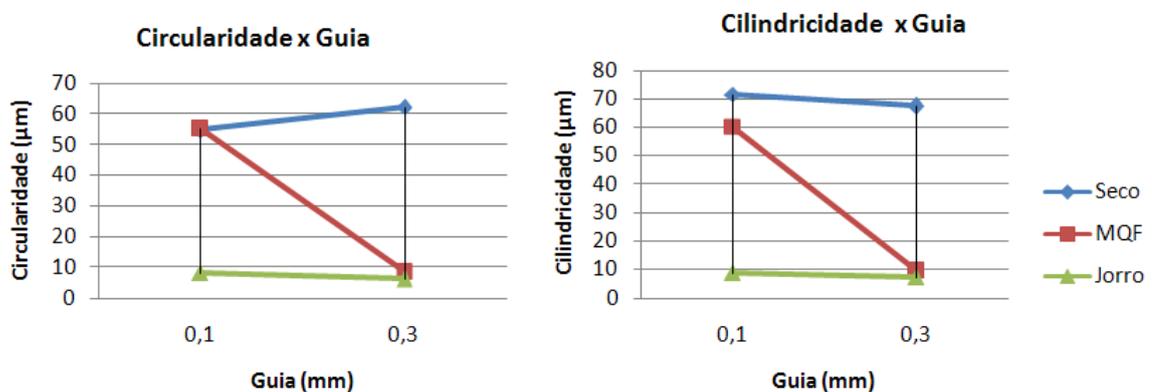


Figura 10: Circularidade/Cilindricidade x Guia

O avanço que não se mostrou significativo nos erros geométricos apresenta uma tendência conforme a figura 11. Quanto maior o avanço os erros tendem a ser menores. Isso ocorre, pois o menor avanço utilizado implica um avanço por dente muito pequeno, a ponto de ser inferior ao raio de aresta, tornando o corte com ângulo de saída muito negativo, prejudicando a qualidade do furo.

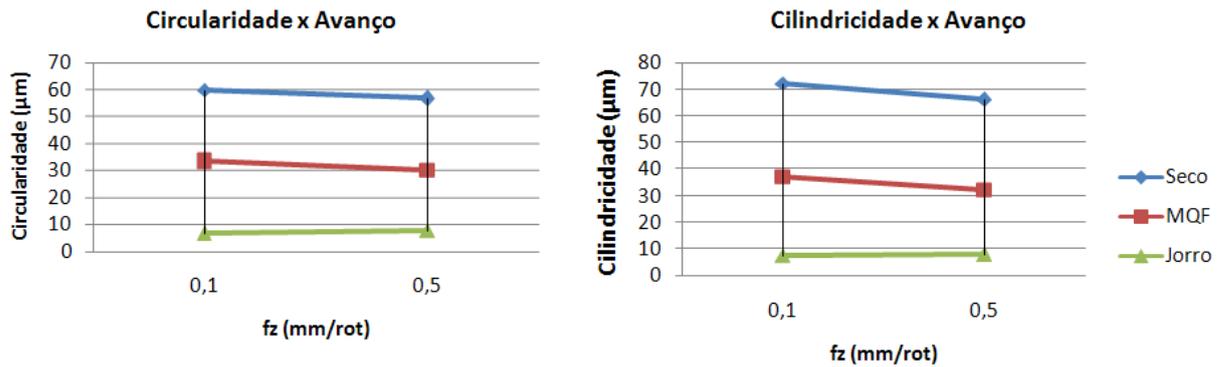


Figura 11: Circularidade/Cilindricidade x Avanço

Uma análise mais geral pode ser feita a partir das figuras 12 e 13. Os melhores resultados obtidos tanto para circularidade quanto para cilindridade foram ao alargamento feito com jorro com maiores sobremetal, guia e avanço, e também, os realizados com MQF com maior guia, avanço e sobremetal.

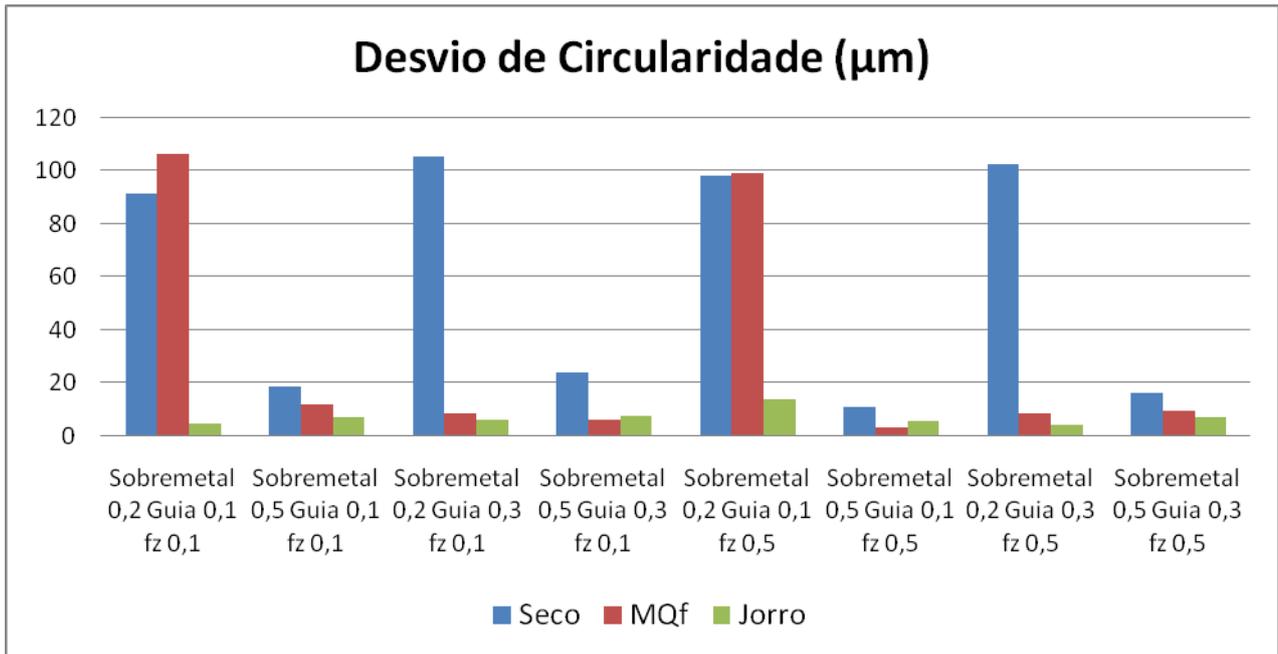


Figura 12 – Desvio de Circularidade x Sistema de Lubrificação/Refrigeração

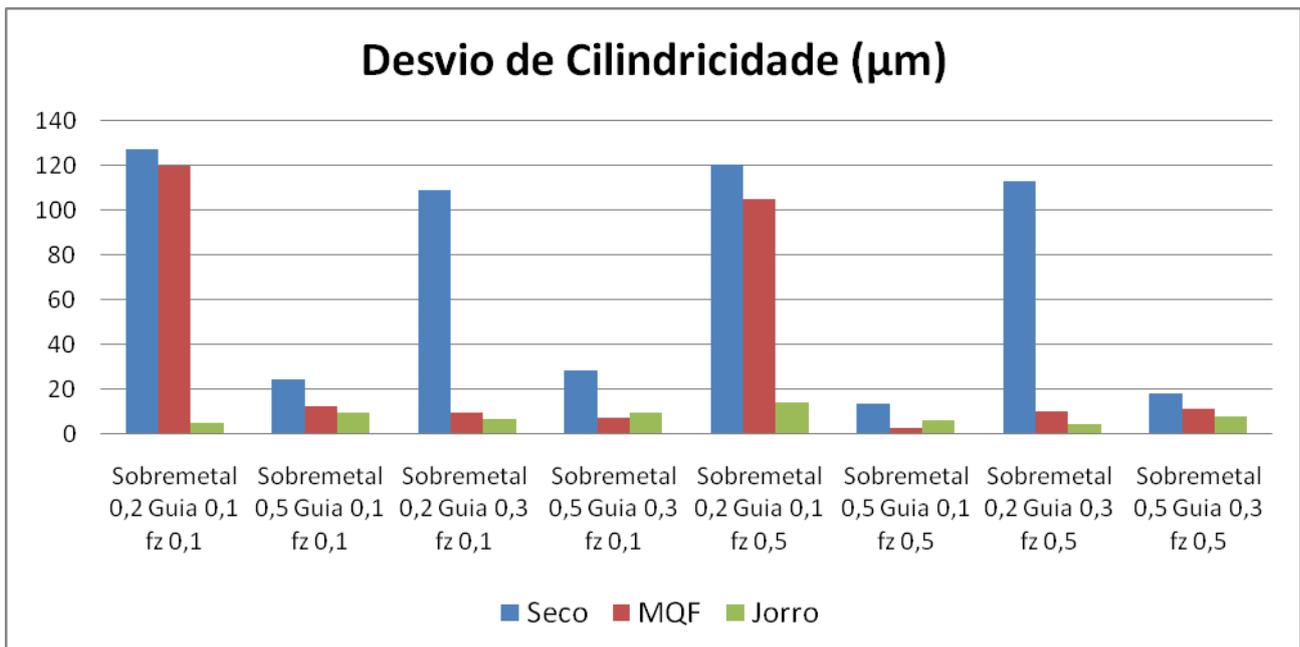


Figura 13 – Desvio de Cilindricidade x Sistema de Lubrificação/Refrigeração

A tabela 7 mostra o efeito numérico e percentual do sistema de lubrificação/refrigeração nos valores médios de circularidade e cilindridade. Na transição do alargamento realizado à Seco para o realizado à Jorro, os erros de circularidade e cilindridade diminuem mais de 150%. Neste caso o fluido de corte melhorou a qualidade

superficial, pois serviu como lubrificante diminuindo as forças de usinagem e minimizando os erros geométricos.

Tabela 7: Efeito do Sist. de Lub./Ref. nos Erros Geométricos Médios

	Erro Geométrico Médio ( $\mu\text{m}$ )		Efeito no Erro Geométrico ( $\mu\text{m}$ )	
	Cilindricidade	Circularidade	Cilindricidade	Circularidade
<b>Seco</b> → <b>MQF</b>	52,1835	45,2036	-34,5596 (↓66%)	-26,6482 (↓59%)
<b>Seco</b> → <b>Jorro</b>	38,7246	32,8268	-61,4775 (↓159%)	-51,4019 (↓157%)
<b>MQF</b> → <b>Jorro</b>	21,4448	19,5026	-26,9179 (↓125%)	-24,7536 (↓127%)

### 3.1.2 – Rugosidades Ra, Rz e Rt

Os valores obtidos para a rugosidade na primeira etapa de testes são mostrados na tabela 8.

Tabela 8: Rugosidades

Testes	Rugosidades Ra e Rz		
	Ra	Rz	Rt
<b>1</b>	0,52	3,12	4,99
<b>2</b>	1,14	5,64	10,06
<b>3</b>	0,60	3,61	5,99
<b>4</b>	1,58	7,98	13,23
<b>5</b>	1,43	8,65	14,59
<b>6</b>	1,08	6,11	10,79
<b>7</b>	0,79	5,11	9,81
<b>8</b>	2,60	13,25	22,41
<b>9</b>	1,02	5,77	8,34
<b>10</b>	1,68	8,58	11,85
<b>11</b>	1,75	9,38	13,22
<b>12</b>	2,47	12,10	16,20
<b>13</b>	1,06	6,29	8,86
<b>14</b>	1,48	8,07	12,71
<b>15</b>	1,93	10,22	14,85
<b>16</b>	2,04	10,39	14,33
<b>17</b>	0,72	4,80	7,91
<b>18</b>	0,78	4,66	7,46
<b>19</b>	1,55	8,98	13,91
<b>20</b>	2,04	10,27	14,65
<b>21</b>	1,00	6,10	12,00
<b>22</b>	1,15	7,10	10,80
<b>23</b>	1,58	8,92	12,54
<b>24</b>	2,01	10,03	15,31

Através da análise de variância dos resultados obtidos, apenas os parâmetros sobremetal e guia cilíndrica apresentaram influência significativa na rugosidade. A seguir são mostradas as tendências de variação da rugosidade em função destes parâmetros.

O menor valor de sobremetal apresentou menores valores de rugosidade. Isso ocorre porque o maior sobremetal implica que a ferramenta precisa retirar mais material, aumentando as forças de usinagem, conseqüentemente as deflexões, além disso, as alturas das ondulações também são aumentadas.

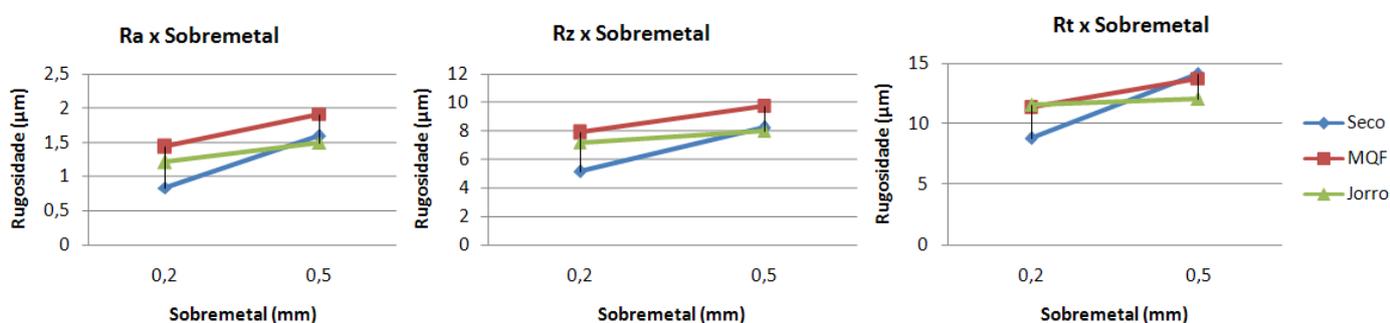


Figura 14: Rugosidade Ra, Rz e Rt x Sobremetal

Os melhores resultados foram obtidos com o menor valor da guia. Isso ocorre, pois neste caso a maior guia implicou em um aumento no atrito com a parede do furo alterando assim a qualidade superficial.

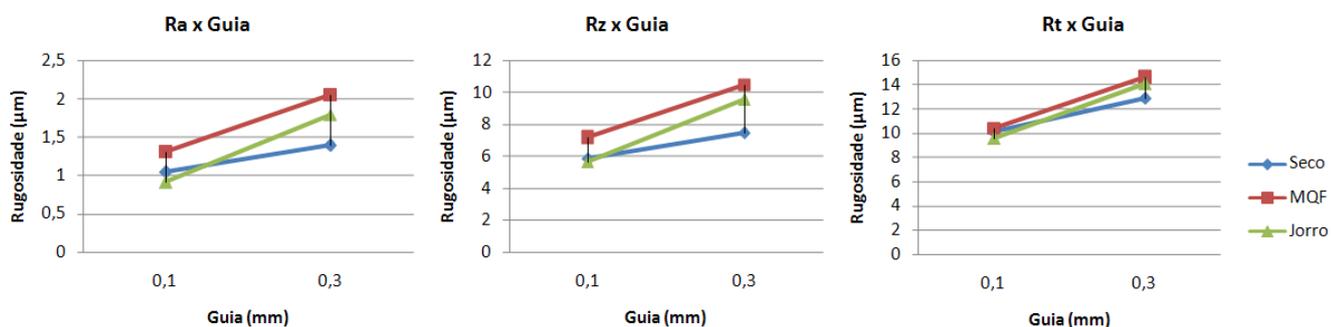


Figura 15: Rugosidade Ra,Rz e Rt x Guia

O avanço não foi um parâmetro que influenciou significativamente a rugosidade dos furos alargados. A figura 16 mostra uma tendência da variação da rugosidade em função dos valores de avanço utilizados. Os melhores resultados para a rugosidade foram com o menor avanço no alargamento realizado à Seco. A altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar com o avanço.

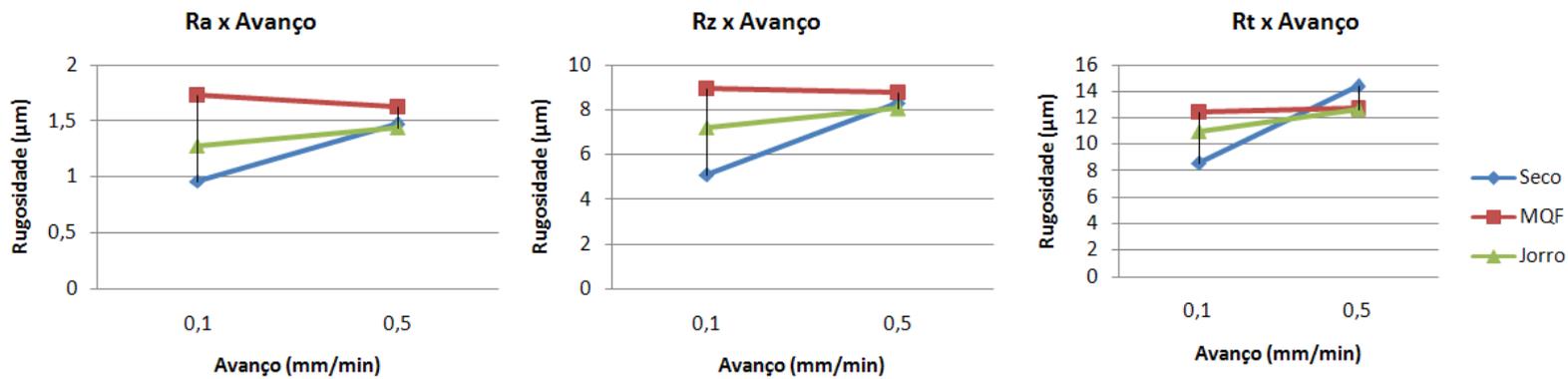


Figura 16: Rugosidade Ra,Rz e Rt x Avanço

Uma análise mais geral para a rugosidade pode ser feita a partir da figura 17. Os melhores resultados obtidos para a rugosidade foram no alargamento à Seco com os menores valores de sobremetal, guia e avanço.

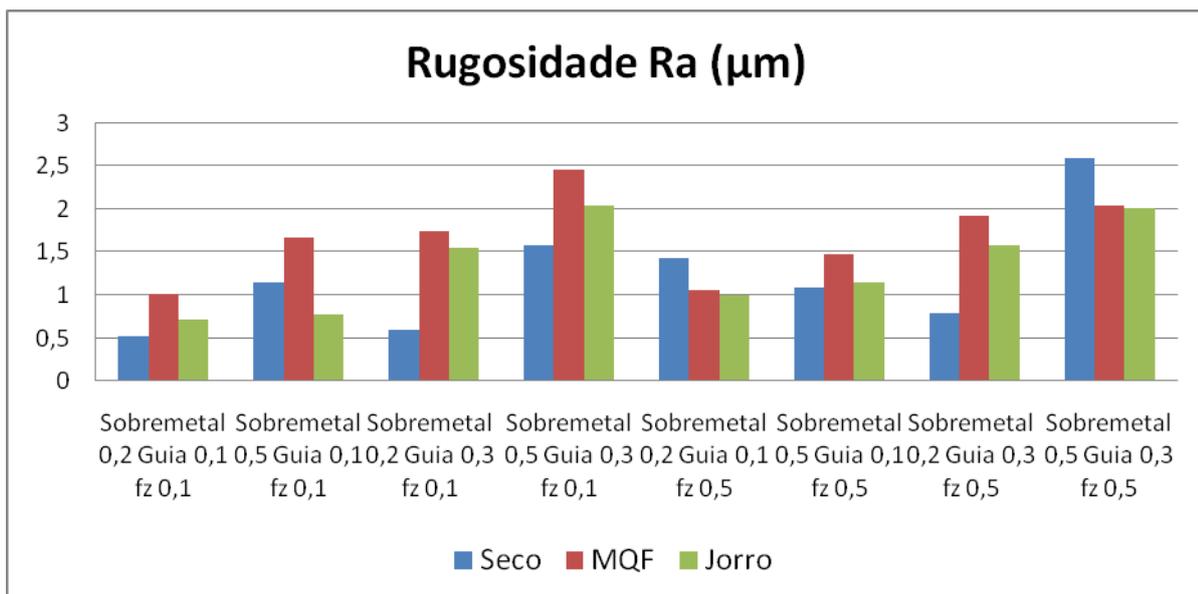


Figura 17: Rugosidade Ra x Sistema de Lubrificação/Refrigeração

A tabela 9 mostra o efeito numérico e percentual do sistema de lubrificação/refrigeração na rugosidade. O alargamento à Seco foi o que resultou em melhor acabamento da superfície. Neste caso o fluido de corte pode ter atuado como refrigerante, aumentando a força de usinagem e aumentando assim a rugosidade na peça.

Tabela 9: Efeito do Sist. de Lub./Ref. nos valores médios de Rugosidade

	Rugosidade Média ( $\mu\text{m}$ )			Efeito na Rugosidade Média ( $\mu\text{m}$ )		
	Ra	Rz	Rt	Ra	Rz	Rt
<b>Seco</b> → <b>MQF</b>	1,448958	7,76729	12,01438	0,459583 (↑32%)	2,16542 (↑28%)	1,06292 (↑9%)
<b>Seco</b> → <b>Jorro</b>	1,287083	7,14604	11,65313	0,135833 (↑10%)	0,92292 (↑13%)	0,34042 (↑3%)
<b>MQF</b> → <b>Jorro</b>	1,516875	8,22875	12,18458	-0,323750 (↓21%)	-1,24250 (↓15%)	-0,72250 (↓6%)

### 3.2- Segunda Etapa – Comparação dos Tempos de Parada e Avanços da Retração

#### 3.2.1- Erros de Forma – Circularidade e Cilindricidade

Os valores obtidos para os erros de circularidade e cilindridade nos testes da segunda etapa do alargamento do ferro fundido vermicular estão mostrados nas tabelas 10 e 11 respectivamente.

Tabela 10: Erros de Circularidade

Testes	ERRO DE CIRCULARIDADE ( $\mu\text{m}$ )								
	Furos:								
	1			2			3		
	Planos de medição:								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>1</b>	2,57	2,69	1,91	7,31	3,81	4,69	3,54	3,99	2,71
<b>2</b>	6,44	4,78	8,41	7,87	7,1	14,2	8,07	6,63	10,7
<b>3</b>	21,5	21,5	21,5	19,3	19,4	14,4	25,0	27,6	26,1
<b>4</b>	21,3	18,5	28,1	16,4	16,0	17,5	36,5	19,3	38,2
<b>5</b>	18,6	22,0	23,8	22,0	26,2	27,2	8,47	7,85	9,88
<b>6</b>	37,9	54,2	54,6	20,5	16,7	20,2	33,1	31,7	33,5
<b>7</b>	17,3	25,4	25,4	14,9	16,1	21,9	19,3	20,4	24,7
<b>8</b>	15,7	14,0	18,4	27,5	22,5	40,1	22,7	20,1	19,8

Tabela 11: Erros de Cilindricidade

Erro de Cilindricidade			
Testes	1	2	3
<b>1</b>	4,88	2,92	5,6
<b>2</b>	8,41	14,24	11,25
<b>3</b>	21,59	19,46	27,68
<b>4</b>	28,1	17,58	38,26
<b>5</b>	24,18	27,25	9,88
<b>6</b>	54,68	20,62	33,57
<b>7</b>	25,43	21,9	24,7
<b>8</b>	18,46	40,19	22,75

A partir da Análise de Variância observa-se que nenhum dos parâmetros influenciou significativamente os erros de circularidade e cilindridade.

Apesar de não terem sido significativos, os parâmetros fazem os erros variarem segundo uma tendência conforme mostrado nos gráficos da figura 18.

Os resultados mostram que quanto menor for o tempo de permanência da ferramenta na profundidade final do furo ao realizar o alargamento, menores serão os erros geométricos.

Como era de se esperar, se o eixo ao fazer o alargamento permanece por mais tempo girando para depois sair, ele provoca por mais tempo uma vibração ou batimento que influencia na qualidade final do furo.

Quanto maior for o avanço de retração, menores serão os erros geométricos, pois quanto mais rápido o eixo retorna, menos ele provoca vibração e batimento, diminuindo os erros geométricos.

O eixo árvore quando realiza o movimento de retração girando apresenta melhores resultados de erros de circularidade e cilindridade do que quando ela retrai com o eixo parado. Isso ocorre, possivelmente, porque o giro da ferramenta mantém o contato ao longo de toda a circunferência, enquanto que parado, as arestas cortantes da ferramenta podem riscar a peça, comprometendo a forma do furo.

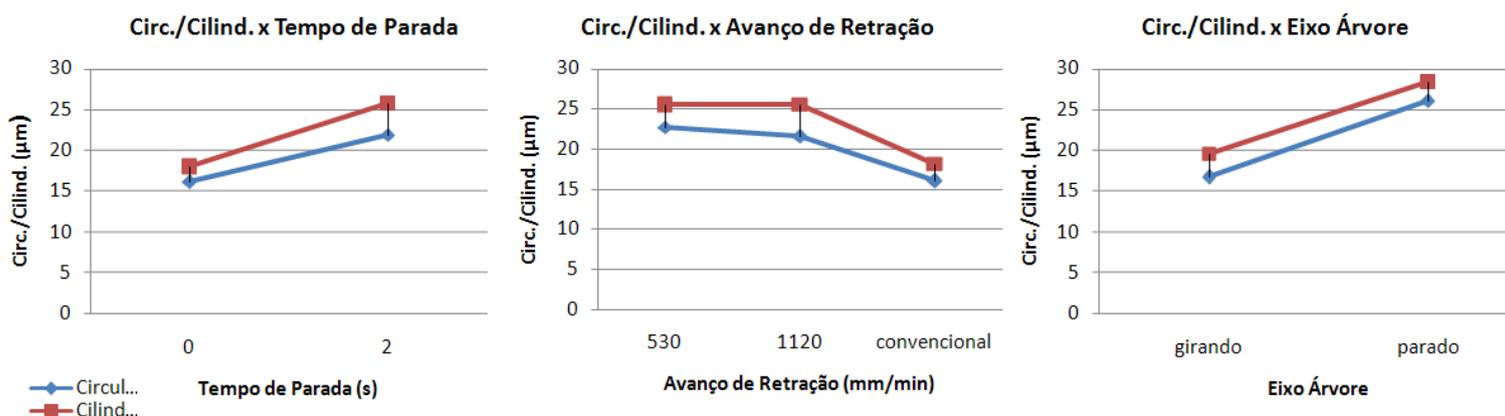


Figura 18: Circ./Cilind. X Tempo de Parada, Avanço de Retração e Eixo Árvore

### 3.2.2-Rugosidades Ra, Rz e Rt

Os resultados obtidos para as rugosidades na segunda etapa são mostrados na tabela 12.

Tabela 12: Rugosidades Ra, Rz e Rt

Testes	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
1	0,94	5,286667	7,626667
2	1,03	5,386667	9,166667
3	1,076667	5,75	9,003333
4	0,973333	5,656667	9,953333
5	1,433333	8,653333	14,58667
6	0,883333	8,653333	14,58667
7	1,023333	5,75	8,906667
8	1,003333	5,583333	8,346667

As análises de variância e os efeitos das variáveis evidenciam que nenhum dos parâmetros influenciou significativamente as rugosidades Ra, Rz e Rt.

Mesmo não sendo significativas, as variáveis apresentam uma tendência segundo os gráficos da figura 19.

A rugosidade tende a diminuir quando o tempo de parada do eixo é 2 segundos, pois esse tempo de parada significa que o alargador fica mais tempo alisando a parede do furo e conseqüentemente melhora o acabamento superficial.

Quando o eixo árvore realiza a retração girando, as facas do alargador tendem a alisar a superfície melhorando a qualidade da parede do furo. Em contrapartida, com o eixo parado, as facas do alargador riscam a superfície do furo na retração, piorando a qualidade superficial.

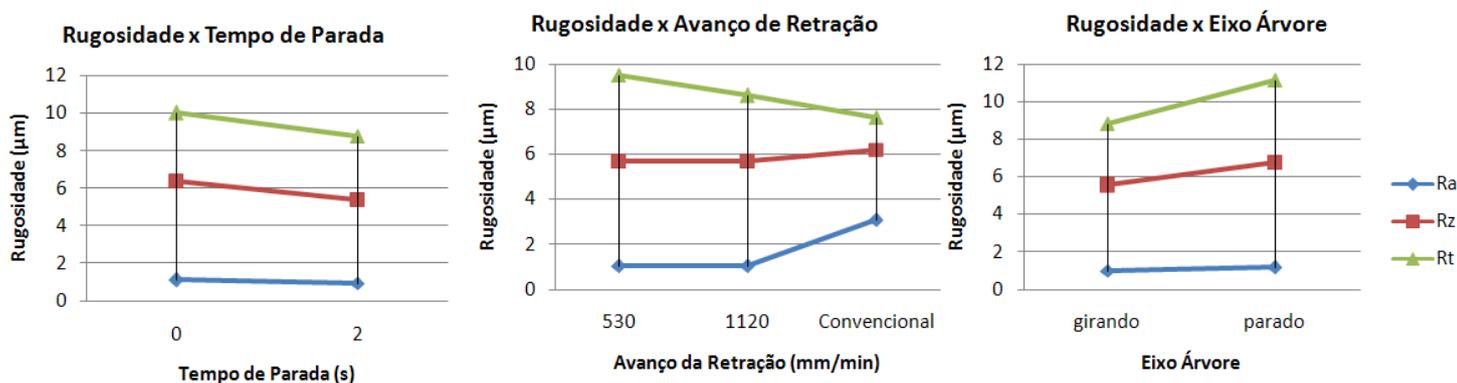


Figura 19: Rugosidade x Tempo de Parada, Avanço de Retração e Eixo Árvore

#### 4 – CONCLUSÕES

Os resultados obtidos ao final deste trabalho nos leva a conclusões importantes a respeito das variáveis utilizadas no alargamento do ferro fundido vermicular. As influências das variáveis mais relevantes são mostradas abaixo:

- O nível maior de sobremetal (0,5 mm no diâmetro) obteve melhores resultados para os erros macro-geométricos (circularidade e cilindridade), já para os desvios micro-geométricos (rugosidade) os melhores resultados foram obtidos com menor sobremetal (0,2 mm no diâmetro).
- As guias cilíndricas menores (0,1 mm) proporcionaram melhores resultados de rugosidade, isso ocorre devido ao fato de gerarem menor atrito com a parede do furo. Já com relação à circularidade e cilindridade guias cilíndricas maiores (0,3 mm) implicaram em melhores resultados pelo fato de promover um melhor trabalho de alisamento da superfície.
- O avanço maior, de (0,5 mm/rot), no geral produziu furos com melhores parâmetros de qualidade em relação à circularidade e cilindridade, o que aconteceu por causa do menor tempo de corte e menor ação alisadora das guias cilíndricas. Já o menor avanço

(0,1 mm/rot) promoveu melhores resultados para a rugosidade, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar com o avanço.

- O sistema de lubrificação/refrigeração influenciou nos resultados da seguinte forma. Para os erros de circularidade e cilindridade o alargamento realizado com jorro proporcionou melhores resultados. Já com relação à rugosidade os resultados mais satisfatórios foram obtidos com o alargamento realizado à seco.

A análise dos resultados obtidos no trabalho leva a concluir que os planejamentos experimentais e as ferramentas estatísticas são técnicas que facilitam bastante a vida do cientista, diminuindo o número de testes a serem realizados e aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos.

## 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINHO, O.L., RODRIGUES, A.C.S. E LIRANI, J., 1977, “Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões”, São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 312 p.
- ASM, 1996, “Speciality handbook: cast irons”. Estados Unidos: ASM International, p. 33-267.
- BARROS NETO, B, SCARMINIO, I.S. E BRUNS, R.E., 1995, “Planejamento e Otimização de Experimentos”, Editora da Unicamp, 2a. Edição, Campinas-SP, 229 p.
- BEZERRA, A.A., 1998, “Influência dos principais parâmetros no processo de alargamento de uma liga de alumínio-sílicio”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 139 p.
- CALADO, V., MONTGOMERY, D. C., 2003, “Planejamento de Experimentos Usando o Statistica”, Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 260p.
- COSTA, E.S., 2004, “Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte – MQF”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 311 p.
- DA SILVA, R.B., 2001, “Alargamento Cônico do Ferro Fundido Nodular GGG40”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Fevereiro de 2001.

- DE ANDRADE, C.L.F, 2005, “Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-duro com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, UFSC, 148 p.
- DE BENEDICTS, K., 1997, “A Short Course in Cast Iron Turning”, Manufacturing Engineering, vol. 119, n.3, pp. 48-54.
- Doré, C., Bagetti, J. H., Boehs, L., Geusser, W. L. , “Avaliação do desempenho de ferramentas de cerâmica  $Al_2O_3 + Y_2O_3 + NbC$  na usinagem de ferro fundido vermicular”, COBEF (Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação), Estância de São Pedro – SP, 15-18 de abril de 2007.
- GABOR, H., 1982, “Como atuam os alargadores”, Revista Máquinas e Metais, MM Editora Ltda., Ano XVIII, n. 205, Setembro 1982, pp. 16-21.
- HEISEL, U., LUTZ, M., SPATH, D. WASSMER, R.E WALTER, U, 1998, “A Técnica da Quantidade Mínima de Fluidos e sua Aplicação nos Processos de Corte”, Máquinas e Metais, Ed. Aranda, fevereiro, pp. 22-38.
- HURTH INFER - Indústria de Máquinas e Ferramentas Ltda., 1998, “Processo de furação e alargamento”, apostila, 1a. edição, setembro 1998, Sorocaba-SP, 34 p.
- IL'IN, V.M., 1975, “Cutting Propertiers of Solid Cemented-Carbide Reamers”, Russian Engineering Journal, vol. 55, n.4, pp. 48-49.
- KALHÖFER, E., 1997, “Dry machining – Principles and Applications”, 2º Seminário Internacional de Alta Tecnologia, UNIMEP, Santa Bárbara D'Oeste –SP.
- KLOCKE, F. AND EISENBLÄTTER, G., 1997, “Presented at the Opening Session Dry Cutting”, Annals of the Cirp, Vol. 46 (2), pp. 519-526.
- KÖNIG, W., 1981, Tecnologia da Fabricação – Tornear, Fresar e Furar. Volume 1, Universidade Técnica de Aachen, Alemanha, 419 p., Tradução de Weingaertner, W.L., UFSC.
- KRESS, D., 1987, “CNC – Tooling for finish machining high precision bores”, Carbide and Tool Journal, vol. 19, n. 5, pp. 10-13.
- KUBEL, E., 1998, “Coatings Crank up Tool Performance”, Manufacturing Engineering, janeiro, pp. 40-46.

- LINDBERG, R.A., 1990, "Processes and materials of manufacture – Hole making and related operations", fourth edition, Editora Prentice Hall International, Englewood Cliffs, pp. 264-301.
- MACHADO, A.R.E DA SILVA M. B., 2004 "Usinagem dos Metais", Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, 8º versão, agosto, UFU, 257 p.
- MACHADO, A.R. E DINIZ A.D., 2000, "Corte a Seco, com Mínima Quantidade de Fluido e com Fluido em Abundância: Usos, Aplicações, Vantagens e Desvantagens", In: Congresso Usinagem 2000, São Paulo-SP.
- MACHADO, A.R. AND WALLBANK, J., 1997, "The effect of extremely low lubricant volumes in machining", *Wear*, 210, pp. 76-82.
- MARQUARD, R., HELFRIED, S. E MCDONALD, M., 1988, "Crank it up: New materials create new possibilities". *Engine technology international*, v. 2, p.58-60.
- MARI, D. & GONSETH, D.R., 1993, "A new look at carbide tool life", *Wear*, vol. 165, n. 1, ISSN 0043-1648, pp. 9-17.
- METALS HANDBOOK, 1989, "Machining", Ninth Edition, ASM International, vol.16.
- Mocellin, F, 2002, "Estudo da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, 94 p.
- MONTGOMERY, D. C., 2001, "Design and Analysis of Experiments", Ed. John Wiley, New York, 5th Edition
- NBR ISO 4287, 2002, Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2002.
- OHGO, K.; SATOH, A.; MIZUNO, T. & ITOH, T., 1979, "Relation between cutting conditions and precision in the reaming of gray iron castings", *Wear*, vol. 52, n. 1, pp. 79-88.
- POLLACK, H.W., 1988, "Tool Design – Geometric Control", Ed. Prentice Hall International, 2º Ed., Englewood Cliffs, pp. 404-408.

- ROSA, Luiz Carlos, 2005, Acabamento de Superfícies – Rugosidade Superficial, OMA – Oficina Mecânica para Automação, Unesp, Sorocaba.
- ROSAS, N., 1983, “Tolerâncias geométricas”, Apostila de treinamento de empregados da Embraer, 82 p.
- SANTOS, A.B.S ET AL., 1998, “Ferro Fundido Vermicular - Obtenção, Microestruturas e Propriedades Mecânicas”. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-SP, pp 1-4.
- SAHM, D. AND SCHNEIDER, 1996, “A Produção sem Refrigeração é Interessante e Deve ser mais Conhecida”, Máquinas e Metais, Editora Aranda, agosto, pp. 38-55.
- SHUNMUGAM, M.S. & SOMASUNDARAM, G., 1990, “Investigation into reaming processes using a frequency decomposition technique”, International Journal Prod. Res., vol. 28, n. 11, pp. 2065-2074.
- SINTERCAST, 2001, “Compacted graphite iron. Catálogo de produtos.” SinterCast S.A, 2001.
- STEMMER, C.E., 1995, “Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos”, 2ª. edição, Editora da UFSC, Florianópolis-SC, pp. 33-43.
- TEETER, F.J., 1999, “Coating takes place of coolant”, American Machinist, pp. 50-52.
- THOLL, M., MAGATA, A. AND DAWSON, S., 1996, “Practical Experience with Passenger Car Engine Blocks Produced in High Quality Compacted Graphite Iron”. In: International Congress & Exposition, Detroit, 1996. Anais.
- TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK, 1983, “Machining”, 4. Ed., v.1, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, pp 10.1-10.76.
- WEINERT, K.; ADAMS, F.; BIERMANN, D. & THAMKE, F., 1998, “Alargadores de corte único: corte mais eficiente, além de vantagens econômicas”, Máquinas e Metais, Aranda Editora, Ano XXXIV, n. 384, Janeiro 1988, pp. 38-57.
- XAVIER, F. A., 2003, “Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 146 pp.

ZENG, Z., 1996, "Influence of cutting depth on resolving power of cutting fluid efficiency in reaming test", ICPCG - Inst. Conf. on the Progress of cutting grinding, Osaka, Japão, ISPE, pp. 296-300.