

MINISTERIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO AGLUTINANTE  
SOBRE O PROCESSO DE ACABAMENTO MAGNÉTICO-ABRASIVO CILÍNDRICO  
EXTERNO

por

Heraldo José de Amorim

Tese para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, outubro de 2009

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO AGLUTINANTE  
SOBRE O PROCESSO DE ACABAMENTO MAGNÉTICO-ABRASIVO CILÍNDRICO  
EXTERNO

por

Heraldo José de Amorim  
Mestre em Engenharia Mecânica

Tese submetida ao corpo Docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de

Doutor em Engenharia

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Flávio José Lorini

Comissão de avaliação:

Prof. Dr. Alexandre Dias da Silva, DEM / UFSM

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, DELET / UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazaferro, DEMEC/UFRGS

Horácio Antônio Vielmo, Dr. Eng.  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 16 de outubro de 2009

*Never give in, never give in, never, never, never, never—in nothing, great or small, large or petty—never give in except to convictions of honor and good sense.*

Winston Churchill

Em memória de Heraldo José Tavares de Amorim  
(o melhor engenheiro do mundo), que me ensinou  
a importância de não desistir.

Dedico esta tese à minha esposa, (Dra.) Anelise  
Beneduzi da Silveira, por todo amor e paciência.

## AGRADECIMENTOS

Para agradecer adequadamente a todos os que merecem, seria preciso mais do que o espaço ocupado por esta tese inteira. Desse modo, divido estes agradecimentos entre aqueles que contribuíram nas partes pessoal e acadêmica em separado, ainda que vários tenham o direito de serem citados em ambas as partes do texto, e peço desculpas, antecipadamente, aos que forem injustamente esquecidos.

No âmbito pessoal, agradeço à minha família por me tornar quem sou, e à minha esposa, (Dra.) Anelise Beneduzi da Silveira, por me aturar do jeito que minha família me fez. Em minha família, agradeço em especial à minha mãe e à irmã, engenheira mecânica e CSI Greice Manuela de Amorim, esta última pelo apoio oferecido na execução de ensaios.

Aos Gordinhos de Lambreta, obrigado pela parceria e pela descontração que surge sempre que nos reunimos. Graças a vocês, tenho perdido um pouco de audição e stress a cada semana. Rock and roll!!

No ambiente acadêmico, muitos foram os que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho, ainda que nem todos tenham se dado conta disso. Estas contribuições foram feitas na forma de suporte financeiro, logístico, no preparo de corpos de prova, empréstimo de material e equipamentos ou mesmo na forma de discussões que, de algum modo, me auxiliaram durante o processo de pesquisa.

Em primeiro lugar, agradeço ao professor Flávio Lorini pela orientação, atenção e paciência. Aos demais professores do GPFAI, em especial a José E. Mazzaferro meus sinceros agradecimentos. Nossas discussões ajudaram bastante devido ao seu “olho clínico” e senso de objetividade. Ao futuro doutor Aldoni Gabriel Wiedenhoft, muito obrigado pela ajuda na preparação de corpos de prova e peças e pela troca de idéias, que ajudou bastante no desenvolvimento deste trabalho.

Na defesa, mencionei que diferentes laboratórios e instituições haviam colaborado com esta tese, o que significa que eu “peguei muita coisa emprestada de muita gente”. Pela gentileza em ceder equipamentos e conhecimento, agradeço aos professores Rafael Teixeira Rodrigues (e aos demais integrantes do LTM), Herbert Martins Gomes (LMM), Arnaldo Ruben Gonzalez (Laboratório de Controle Dimensional), Paulo Smith Schneider (GESTE), Pedro Barbosa Mello (Laboratório de Motores), Roberto Petry Hömrich (LMEAE), Eduardo Perondi (LAMECC), Wilson Kindlein Jr. e Luis Henrique Alves Cândido (LDSM), ao futuro doutor Hector Anocibar,

aos técnicos João Batista da Rosa e Lara Gomes e ao engenheiro Flávio Luís César de Lima. Agradeço ainda ao engenheiro João André Santos Duarte por possibilitar a obtenção de amostras de lubrificantes, e à empresa Aços Favorit, nas pessoas de Gelson Jung e Betina Fritsch pela doação de material para a elaboração de corpos de prova.

Alguns colegas foram de fundamental importância na execução de alguns testes, ou na elaboração de partes determinadas do trabalho. Entre eles, André Cervieri (Inmetro-RS), Fabiano Wildner (Laboratório de Motores), Felipe Leal (LACER), Mário Sobczyk (LAMECC) e Pato (conhecido por alguns como Carlos Thomas).

No meio acadêmico aprendi que uma característica importante de um bom orientador é saber selecionar bons orientados. Certamente, não me refiro à escolha do Professor Lorini, mas sim à minha própria experiência como orientador. Em meu caso, além dos bons resultados obtidos por todos, dois alunos de graduação auxiliaram consideravelmente o desenvolvimento desta tese. São eles os engenheiros Cristof(er) Leonhart, meu primeiro orientado em trabalho de conclusão, e Matheus Sessim Gomes, cujo trabalho tive o prazer de co-orientar. Deles dependeu, em grande parte, o desenvolvimento do aparato experimental utilizado neste trabalho.

Ao eterno grupo do Laboratório de Usinagem, obrigado pela amizade e pela participação no desenvolvimento da infraestrutura utilizada neste doutorado: Cristofer, Saraiva, Ticapel, Henrique, Schmitt, os mais recentes Eduardo, Gustavo, Fernando, Lucas e Iago (em memória), além do professor Augusto Kunrath.

Ao Paulo Kutter, do Promec, meus agradecimentos por tudo, e minhas sinceras desculpas pelos atrasos na entrega de documentos.

Se não fossem os conselhos dados pela banca durante o exame de qualificação, talvez este doutorado ainda estivesse em gestação. Por isso, agradeço aos professores Alexandre Dias da Silva (UFSM), Roberto Homrich e José Mazaferro pelo direcionamento dado ao trabalho, e por sua disponibilidade em participar da banca.

Ao CNPQ e à CAPES, agradeço pelo custeio oferecido através de bolsas de mestrado e doutorado, que me permitiram dedicação total aos estudos.

Por fim, mas não por último, agradeço ao povo brasileiro por ter, através do pagamento de seus impostos, custeado meus estudos desde o início da graduação. Espero, um dia, poder retornar o favor.

## RESUMO

Este trabalho consiste no estudo da influência das propriedades do elemento aglutinante adicionado ao pó magnético-abrasivo de fraca ligação sobre as variáveis de resposta do processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo. Nestas condições, a adesão entre as partículas magnéticas e abrasivas é efetuada através da adição deste elemento aglutinante, em geral um óleo mineral. Com o objetivo de evitar a presença de aditivos, neste estudo foram utilizados óleos básicos, reduzindo assim as variáveis de processo às propriedades dos elementos aglutinantes e aos parâmetros de processo estudados. O procedimento experimental adotado envolveu a caracterização das propriedades tribológicas dos óleos básicos, em especial viscosidade cinemática, índice de viscosidade e tensão superficial. Cinco óleos diferentes foram avaliados, todos de base parafínica: *spindle* (PSP09), neutro leve (PNL30), neutro médio (PNM55), neutro pesado (PNP95) e *bright stock* (PBS33), em ordem crescente de viscosidade cinemática. Com o objetivo de determinar a influência de parâmetros de processo convencionais sobre as propriedades estudadas, foram também avaliados os efeitos da velocidade de corte (através da rotação imposta à peça) e tempo de usinagem sobre o resultado do processo. O uso de ferramentas de projeto de experimentos, em especial projeto fatorial cruzado, permitiu melhor aproveitamento dos resultados obtidos, analisados de forma estatística. Os resultados obtidos mostraram influência significativa para todos os parâmetros testados, e para a maior parte das interações entre eles, indicando a sensibilidade do acabamento magnético-abrasivo à variação destes parâmetros. As variáveis de resposta se mostraram especialmente sensíveis a variações no tipo e proporção de óleo básico adicionado ao pó magnético-abrasivo.

Palavras chave: acabamento magnético-abrasivo; pó magnético-abrasivo; acabamento superficial; viscosidade cinemática.

## **ABSTRACT**

“Study of the influence of the binding-element characteristics over external cylindrical magnetic-abrasive finishing process”

This work consists in studying the tribological characteristics of loosely bounded magnetic-abrasive powder over the results of external cylindrical magnetic abrasive finishing process. In these conditions, adhesion between magnetic and abrasive particles is provided by addition of a binding element, usually a mineral oil-based lubricant. Since commercial products contain additives, only basic oils were employed, so that process variables were reduced to the properties of the oils and the studied process parameters. The experimental procedure involved characterization of tribological characteristics of the basic oils, especially kinematic viscosity, viscosity index and surface tension. Five different oils were used as binders, all of them of paraffinic base: spindle (PSP09), neutral light (PNL30), neutral medium (PNM55), neutral heavy (PNP95) and bright stock (PBS33), in crescent order of kinematic viscosity. In order to verify the influence of common process parameters over the studied properties, it was evaluated the effect of other studied process parameters, such as cutting speed (evaluated through rotation speed of the workpiece) and processing time. Optimization of results was obtained through the use of design of experiments tools, particularly the technique of crossed factorial experiments, whose results were analyzed statistically. Results showed significant influence for all tested parameters and most of the interactions among them, which indicates the sensibility of magnetic abrasive finishing to their variation. Response variables were shown to be especially sensible to variations on type and proportion of lubricant added to magnetic-abrasive powder.

Keywords: magnetic abrasive finishing; magnetic abrasive powder; surface finishing; kinematic viscosity.

# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	Processos abrasivos de usinagem .....	4
2.2	Acabamento superficial .....	7
2.2.1	Circuitos magnéticos .....	9
2.3	Propriedades dos Óleos Minerais .....	11
2.3.1	Viscosidade .....	12
2.3.2	Óleos não-newtonianos .....	16
2.4	Tensão Superficial .....	17
2.5	Adesão mediada por fluido.....	19
2.6	Processo de Acabamento Magnético Abrasivo .....	24
2.6.1	Pó Magnético Abrasivo .....	26
2.6.2	Acabamento Magnético Abrasivo Cilíndrico.....	28
2.6.3	Acabamento Magnético Abrasivo Plano .....	30
<b>3.</b>	<b>ESTUDOS RELEVANTES NA ÁREA .....</b>	<b>33</b>
3.1	Estudos sobre o acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo.....	33
3.2	Equipamentos desenvolvidos .....	46
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>51</b>
4.1	Equipamento desenvolvido .....	51
4.1.1	Eletroímã .....	51
4.1.2	Equipamento utilizado.....	52
4.1.3	Determinação da curva de magnetização do eletroímã.....	54
4.2	Procedimento experimental .....	55
4.2.1	Elementos aglutinantes testados .....	56
4.2.1.1	Determinação da viscosidade cinemática dos óleos lubrificantes.....	57
4.2.1.2	Avaliação da tensão superficial dos óleos lubrificantes.....	58
4.2.2	Avaliação da influência do tipo e quantidade de elemento lubrificante.....	59
4.2.3	Projeto de experimentos .....	62
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>64</b>
5.1	Resultados obtidos com o uso de PMA a níveis fixos (Experimento 1).....	64

5.2	Resultados obtidos para diferentes quantidades de óleo básico (Experimento 2).....	72
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>86</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>
	<b>PUBLICAÇÕES GERADAS POR ESTE TRABALHO .....</b>	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE A – TESTES PRELIMINARES.....</b>	<b>91</b>
A.1	Procedimento Experimental .....	91
A.1.1	Definição do elemento abrasivo .....	92
A.1.2	Definição do elemento aglutinante.....	92
A.1.3	Testes para definição da quantidade de elemento aglutinante .....	94
A.1.4	Tempo de parada e renovação do pó magnético-abrasivo.....	94
A.2	Resultados e discussão .....	95
A.2.1	Resultados Experimentais - Material Abrasivo.....	95
A.2.2	Resultados Experimentais - Elemento Lubrificante.....	98
A.2.3	Intervalo de renovação do pó magnético-abrasivo.....	103
A.3	Conclusões parciais .....	105
A.4	Referências bibliográficas .....	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Retificação plana tangencial (a) e frontal (b).....	5
Figura 2.2 – Retificação cilíndrica externa (a) e interna (b). .....	5
Figura 2.3 – Imagem e representação de superfície brunida.....	6
Figura 2.4 – Ilustração dos processos de brunimento (a) interno e (b) externo. ....	7
Figura 2.5 – Determinação da rugosidade média $Ra$ . ....	8
Figura 2.6 – Perfil de rugosidade e diferentes parâmetros de rugosidade.....	8
Figura 2.7 – Acabamento superficial obtido com diferentes processos de usinagem.....	9
Figura 2.8 – Circuito magnético simples. ....	9
Figura 2.9 – Circuito magnético com entreferro. ....	10
Figura 2.10 – Circuito elétrico análogo à Figura 2.9. ....	11
Figura 2.11 – Determinação da viscosidade de um fluido. ....	12
Figura 2.12 – Viscosidade cinemática em função da temperatura para diferentes óleos.....	14
Figura 2.13 – Índice de viscosidade de óleos automotivos simples e multiviscosos. ....	15
Figura 2.14 – Relação entre força e taxa de cisalhamento para fluidos newtonianos e não-newtonianos.....	16
Figura 2.15 – Comportamento pseudoplástico de óleos lubrificantes. ....	16
Figura 2.16 – Comportamento tixotrópico de óleos lubrificantes.....	17
Figura 2.17 – Formação de meniscos em reservatórios para interfaces sólido-líquido de elevada (a) e baixa tensão interfacial (b).....	18
Figura 2.18 – Ângulo de contato para fluido: (a) perfeitamente molhante; (b) predominantemente molhante; (c) predominantemente não-molhante e (d) não-molhante. ....	18
Figura 2.19 – Determinação teórica da tensão superficial de um fluido.....	19
Figura 2.20 – Formação de meniscos nas zonas de interface sólido-sólido.....	19
Figura 2.21 – Relação entre força e tempo na separação de duas superfícies unidas por meniscos. ....	20
Figura 2.22 – Esfera em contato com superfície plana e menisco. ....	20
Figura 2.23 – Esfera próxima a uma superfície plana (a) e próxima a uma superfície plana coberta por um filme contínuo (b). Fonte: Bhushan, 2002. ....	21
Figura 2.24 – Adesão mediada por fluido entre uma superfície lisa e outra contendo asperidades para regimes de lubrificação de pouco líquido (a) e imerso (b). ....	23

Figura 2.25 – Influência da relação entre espessura do filme fluido e rugosidade sobre as forças de fricção. ....	24
Figura 2.26 – Classificação dos processos de Acabamento Magnético Abrasivo. ....	25
Figura 2.27 – Partículas de pó magnético abrasivo de forte ligação. ....	26
Figura 2.28 – Classificação das partículas do pó magnético-abrasivo de forte ligação. ....	28
Figura 2.29 – Acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo. ....	28
Figura 2.30 – Acabamento magnético-abrasivo cilíndrico interno em tubo não-ferromagnético. ....	30
Figura 2.31 – Processo de acabamento magnético-abrasivo frontal. ....	31
Figura 2.32 – Dispositivo para acabamento magnético-abrasivo frontal com circuito aberto. ....	32
Figura 2.33 – Processo de acabamento magnético-abrasivo frontal com circuito fechado. ....	32
Figura 3.1 – Influência dos parâmetros de vibração no acabamento superficial. ....	34
Figura 3.2 – Influência da vibração no acabamento magnético-abrasivo. ....	34
Figura 3.3 – Efeito da adição de diferentes elementos aglutinantes no acabamento magnético-abrasivo. ....	36
Figura 3.4 – Efeito do tempo de usinagem sobre o acabamento superficial e remoção de material obtidos com a adição de diferentes quantidades de óleo ao PMA. ....	37
Figura 3.5 – Efeito da quantidade de óleo adicionado ao PMA sobre o acabamento superficial e a remoção de material obtidos após 2 min. ....	37
Figura 3.6 – Relação entre a densidade de fluxo magnético aplicada e a pressão exercida pelo PMA com diferentes elementos aglutinantes. ....	38
Figura 3.7 – Rugosidade e remoção de material em função do tempo com e sem pó abrasivo. ....	40
Figura 3.8 – Rolamento do pó magnético abrasivo. ....	41
Figura 3.9 – Aparatos experimentais. ....	42
Figura 3.10 – Esforços envolvidos no corte (a); ângulo de corte entre picos e vales (b). ....	44
Figura 3.11 – Diagrama esquemático do dispositivo desenvolvido por Jain et al., 2001 (a); dispositivo instalado em um torno mecânico (b). ....	47
Figura 3.12 – Aparato experimental desenvolvido por Chang, 2002. ....	47
Figura 3.13 – Aparato experimental para o acabamento magnético-abrasivo eletrolítico. ....	48
Figura 3.14 – Aparato experimental Desenvolvido por Shinmura et al., 1984. ....	49
Figura 3.15 – Aparato experimental constituído por ímãs permanentes (Shinmura et al., 1989). ....	49
Figura 4.1 – Dimensões do núcleo de ferro. ....	51
Figura 4.2 – Eletroímã desenvolvido (a); circuito elétrico análogo (b). ....	52

Figura 4.3 – Dispositivo para realização do acabamento magnético abrasivo.....	53
Figura 4.4 – Aparato experimental para a determinação da curva de magnetização do eletroímã.....	54
Figura 4.5 – Curvas de magnetização e desmagnetização do eletroímã.....	55
Figura 4.6 – Resultados obtidos para diferentes óleos lubrificantes em função da rotação.....	56
Figura 4.7 – Representação de um viscosímetro de efluxo.....	57
Figura 4.8 – Curvas de viscosidade cinemática em função da temperatura para os óleos avaliados.....	58
Figura 4.9 – Tensão superficial em função da temperatura para os óleos avaliados.....	59
Figura 4.10 – Corpo de prova utilizado.....	60
Figura 5.1 – Rugosidade em função do óleo básico adicionado ao PMA (Experimento 1).....	64
Figura 5.2 – Rugosidade em função do óleo básico e do tempo de processamento.....	65
Figura 5.3 – Rugosidade em função do óleo e rotação da peça para o Experimento 1.....	66
Figura 5.4 – Rugosidade em função da rotação e do tempo de usinagem.....	67
Figura 5.5 – Rugosidade em função do tempo. (a) 400 RPM e (b) 800 RPM.....	68
Figura 5.6 – Remoção de material observada com diferentes óleos básicos em função do tempo de processamento nas rotações (a) 400 RPM e (b) 800 RPM.....	69
Figura 5.7 – Temperaturas na superfície de peças durante os testes realizados.....	71
Figura 5.8 – Resultados combinados de rugosidade e remoção de material (400 RPM).....	71
Figura 5.9 – Resultados combinados de rugosidade e remoção de material (800 RPM).....	72
Figura 5.10 – Rugosidade em função do óleo básico adicionado ao PMA (Experimento 2).....	73
Figura 5.11 – Rugosidade em função do óleo básico e da proporção do PMA.....	73
Figura 5.12 – Rugosidade em função do óleo básico e da rotação da peça (Experimento 2).....	74
Figura 5.13 – Relação entre rotação e proporção do PMA.....	75
Figura 5.14 – Rugosidade em função da proporção do PMA. (a) 400 RPM e (b) 800 RPM.....	76
Figura 5.15 – Remoção de material vs proporção do PMA (a) 400 RPM e (b) 800 RPM.....	77
Figura 5.16 – Temperatura na superfície de peças nos testes com 8% de óleo básico.....	78
Figura 5.17 – Temperatura na superfície de peças nos testes com 16% de óleo básico.....	78
Figura 5.18 – Corpo de prova após usinagem com 16% de óleo PBS33, a 800 RPM.....	79
Figura 5.19 – Resultados combinados de rugosidade e remoção de material (400 RPM).....	80
Figura 5.20 – Resultados combinados de rugosidade e remoção de material (800 RPM).....	81
Figura A.1 – Resultados em função do tempo para diferentes abrasivos.....	96
Figura A.2 – Resultados em função da granulometria para diferentes abrasivos.....	97

Figura A.3 – Resultados em função do tempo para diferentes granulometrias.....	97
Figura A.4 – Resultados em função do tempo para diferentes abrasivos. ....	98
Figura A.5 – Rugosidade obtida com diferentes elementos aglutinantes a diferentes rotações.....	99
Figura A.6 – Comparação múltipla de médias para diferentes rotações.....	100
Figura A.7 – Resultados obtidos para os óleos lubrificantes em função da rotação. ....	101
Figura A.8 – Resultados obtidos para os óleos lubrificantes em função da rotação. ....	102
Figura A.9 – Resultados obtidos em função da proporção de óleo lubrificante. ....	103
Figura A.10 – Efeito do intervalo de renovação de PMA sobre o acabamento superficial. ....	104
Figura A.11 – Rugosidade ao longo do tempo de renovação de PMA. ....	105

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – classificação de óleos automotivos segundo a SAE.....	15
Tabela 3.1 – Parâmetros de processo fixos usados por Shinmura et al., 1984.....	33
Tabela 3.2 – Parâmetros de processo. ....	50
Tabela 4.1 – Características do eletroímã desenvolvido.....	52
Tabela 4.2 – Características dos eletroímãs usados. ....	53
Tabela 4.3 – Condições de utilização do eletroímã.....	54
Tabela 4.4 – Resultados preliminares de rugosidade em função do óleo lubrificante e rotação. ....	56
Tabela 4.5 – Óleos lubrificantes avaliados experimentalmente.....	56
Tabela 4.6 – Viscosidade e índice de viscosidade dos óleos lubrificantes avaliados. ....	58
Tabela 4.7 – Tensão superficial dos óleos lubrificantes avaliados em função da temperatura.....	59
Tabela 4.8 – Composição química, em percentagem de massa, do aço ABNT 1045.....	61
Tabela 4.9 – Parâmetros de processo adotados no procedimento experimental. ....	61
Tabela 4.10 – Características do pó magnético-abrasivo.....	61
Tabela 4.11 – Matriz experimental. ....	63
Tabela 5.1 – Análise de variância dos testes de elemento lubrificante.....	68
Tabela 5.2 – Análise de variância para o Experimento 2.....	81
Tabela A.1 – Materiais abrasivos testados. ....	92
Tabela A.2 – Parâmetros de processo. ....	92
Tabela A.3 – Parâmetros para testes de definição do elemento aglutinante. ....	93
Tabela A.4 – Elementos aglutinantes testados.....	93
Tabela A.5 – Características dos óleos lubrificantes testados.....	93
Tabela A.6 – Proporção, em massa, dos diferentes componentes do PMA.....	94
Tabela A.7 – Características do pó magnético abrasivo. ....	95
Tabela A.8 – Análise de variância dos testes de abrasivo.....	96
Tabela A.9 – Análise de variância dos testes para definição do elemento aglutinante.....	98
Tabela A.10 – Análise de variância dos testes de quantidade de elemento lubrificante.....	102
Tabela A.11 – Análise de variância dos testes de reposição de PMA. ....	104

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
EMF	Escova magnética flexível
GPFAI	Grupo de Projeto, Fabricação e Automação
PA	Partícula abrasiva
PM	Partícula magnética
PMA	Pó magnético-abrasivo
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de contato	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>ar</sub>	Seção reta do entreferro	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>e</sub>	Área da seção reta do entreferro	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>M</sub>	Seção reta do magneto	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>n</sub>	Área da seção reta do núcleo	[mm <sup>2</sup> ]
da	Elemento diferencial de área	[m <sup>2</sup> ]
dl	Elemento diferencial de comprimento	[mm]
B	Densidade de fluxo magnético	[T]
d <sub>ma</sub>	Diâmetro médio das partículas magnético-abrasivas	[mm]
F	Força de cisalhamento entre duas superfícies	[N]
F <sub>mm</sub>	Força magnetomotriz	[A]
F <sub>Ad</sub>	Força adesiva	[N]
F <sub>c</sub>	Força de corte	[N]
F <sub>L</sub>	Força de Laplace	[N]
F <sub>m</sub>	Força de menisco	[N]
F <sub>n</sub>	Força normal	[N]
F <sub>t</sub>	Força tangencial	[N]
F <sub>mag</sub>	Força magnética sobre a partícula	[N]
F <sub>n</sub>	Força normal	[N]
F <sub>T</sub>	Componente normal da força de menisco	[N]
F <sub>V</sub>	Força viscosa	[N]
F <sub>V⊥</sub>	Força viscosa perpendicular à superfície em contato	[N]
h	Espessura da camada de fluido	[m]
H	Constante usada na determinação do índice de viscosidade	[cSt]
H	Intensidade do campo magnético	[A/m]
H <sub>w</sub>	Dureza do material da peça	[N/mm <sup>2</sup> ]
H <sub>a</sub>	Intensidade do campo magnético no entreferro	[A/m]
h <sub>m</sub>	Menor distância entre uma esfera e um plano	[mm]
H <sub>mt</sub>	Dureza do material em trabalho	[N/mm <sup>2</sup> ]
h	Altura média das irregularidades de uma superfície	[mm]
I <sub>V</sub>	Impulso viscoso crítico	[N.s]
IV	Índice de viscosidade	[adimensional]
i	Corrente aplicada ao eletroimã	[A]
J	Densidade de corrente	[A/mm <sup>2</sup> ]

K	Constante experimental	
k	Rigidez	[N/m]
$K_{maf}$	Constante de proporcionalidade usada por Jain et al., 2006.	
$K_2$	Constante usada por Jain et al., 2006	
$K_3$	Constante usada por Jain et al., 2006	
$l_m$	Percurso de medição	[mm]
$l_n$	Caminho médio percorrido pelo fluxo magnético no núcleo do eletroímã	[mm]
$l_M$	Comprimento do magneto	[mm]
L	Constante usada na determinação do índice de viscosidade	[cSt]
$L_w$	Comprimento da peça submetida ao acabamento magnético-abrasivo	[mm]
n	Número de arestas de uma partícula magnético-abrasiva agindo simultaneamente	
N	Número de partículas magnéticas em contato com a superfície	
N	Número total de espiras em uma bobina	
P	Pressão	[Pa]
R	Raio	[mm]
R	Relutância magnética	[H <sup>-1</sup> ]
$R_e$	Relutância magnética no entreferro	[H <sup>-1</sup> ]
$R_n$	Relutância magnética no núcleo	[H <sup>-1</sup> ]
$R_n$	Força normal	[N]
$R_t$	Resistência ao corte	[N]
$\vec{r}$	Vetor raio	[m]
T	Temperatura	[K, °C]
$t_f$	Tempo de acabamento	[s]
t	Tempo de processamento	[s]
$t_m$	Tempo necessário para vencer a força de menisco	[s]
$t_s$	Tempo necessário para a separação de duas superfícies	[s]
U	Viscosidade de um óleo a 40°C	[cSt]
u	Taxa de deslocamento entre duas superfícies	[m/s]
u/h	Taxa de cisalhamento	[s <sup>-1</sup> ]
V	Volume da partícula ferromagnética	[mm <sup>3</sup> ]
v	Velocidade relativa das PMAs	[m/s]
$v_{ma}$	Velocidade relativa entre a peça e a escova magnética flexível	[m/s]
W	Trabalho	[N.m]
w	Razão, em volume, de aço em uma partícula magnético-abrasiva de forte ligação	
$w_f$	Proporção de material ferromagnético presente no pó magnético-abrasivo	
$\alpha$	Ângulo de corte de um grão abrasivo	[°]

$\alpha$	Constante experimental	[adimensional]
$\beta$	Constante experimental	[adimensional]
$\tau$	Tensão de cisalhamento	[Pa]
$\chi_m$	Suscetibilidade magnética da partícula ferromagnética	[N/A <sup>2</sup> ]
$\delta_{crit}$	Penetração máxima da aresta cortante de ângulo $2\theta$	[mm]
$\Delta f$	Força aplicada por uma aresta cortante	[N]
$\Delta p(t)$	Erro de circularidade	[mm]
$\Delta \omega$	Erro de circularidade inicial	[mm]
$\phi$	Fluxo magnético	[Wb]
$\phi(t)$	Erro de forma normalizado	[adimensional]
$\gamma$	Tensão superficial de um fluido	[mN/m]
$\gamma_{SL}$	Energia superficial livre do sólido no líquido	[J]
$\lambda$	Comprimento de onda das irregularidades	[mm]
$\eta$	Viscosidade dinâmica	[Pa.s; cP]
$\nu$	Viscosidade cinemática	[m <sup>2</sup> /s; cSt]
$\mu_{at}$	Coefficiente de atrito	
$\mu$	Permeabilidade magnética de um material	[N/A <sup>2</sup> ]
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vácuo	[N/A <sup>2</sup> ]
$\mu_m$	Permeabilidade relativa da partícula ferromagnética do PMA	[adimensional]
$\mu_r$	Permeabilidade relativa de um material em relação a $\mu_0$	[adimensional]
$\mu_{rf}$	Permeabilidade magnética relativa da porção ferromagnética do	[adimensional]
$\mu_{em}$	Permeabilidade magnética relativa do núcleo do eletroímã	[adimensional]
$\rho$	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\theta_\beta$	Metade do ângulo de cunha das arestas abrasivas	[°]
$\theta$	Ângulo entre o vetor $\vec{r}$ e a direção tangencial ao comprimento dl	[°]
$\theta_1, \theta_2$	Ângulos de contato entre sólidos e líquidos	[°]

## 1. INTRODUÇÃO

A fabricação de componentes mecânicos com elevado grau de acabamento superficial é uma atividade com alto custo envolvido. Isto ocorre porque, para obter superfícies de elevada qualidade, é necessário recorrer a técnicas manuais, tais como lixamento e polimento, ou a máquinas operatrizes de custo elevado, como no caso da retificação e do brunimento. Também a baixa produtividade associada a estes processos de fabricação contribui para o aumento dos custos envolvidos. Desse modo, os processos tradicionais para obtenção de acabamento superficial tornam-se caros, lentos ou pouco confiáveis, em especial quando dependem de habilidades manuais.

O processo de acabamento magnético-abrasivo é uma alternativa em estudo aos processos convencionais de acabamento. Fazendo uso de um campo magnético suficientemente robusto, e com uma ferramenta cuja forma é moldada pela própria peça em usinagem, este processo de fabricação pode ser aplicado com o objetivo de conferir tolerâncias geométricas em faixas estreitas, remoção de rebarbas de retificação e acabamentos superficiais de elevada qualidade, com baixa remoção de material. Segundo Kremen et al., 1994, o acabamento magnético-abrasivo é mais eficiente, e produz acabamentos superficiais melhores que processos tradicionais de usinagem, como polimento, lixamento, superacabamento e brunimento. Entre suas vantagens estão relativa facilidade no controle dos parâmetros e o fato de a ferramenta ser auto-adaptável e auto-afiante, não requerendo dressagem ou compensação [Chang et al., 2002].

Diferentes aplicações vêm sendo dadas ao processo de acabamento magnético abrasivo. Estudos realizados envolvem sua aplicação na remoção de micro-rebarbas de furação [Ko et al., 2006], na afiação de lâminas de bisturi em aço cirúrgico [Altareva et al., 1992], e no acabamento de superfícies internas de tubos de formas complexas em materiais não-ferromagnéticos [Yamaguchi et al., 2001] e cerâmicos [Yamaguchi e Shinmura, 2003]. Recentemente Stepanova et al., 2005, utilizaram com sucesso o acabamento magnético-abrasivo em componentes fabricados em liga carbetto de tungstênio-cobalto (WC-Co), antes de os submeterem à deposição de um filme de TiC (carbetto de titânio), eliminando uma fase frágil indesejável (fase  $\eta$ ,  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ ). Stepanova e Uvarova, 2002, observaram melhora substancial na resistência ao desgaste de insertos cujos revestimentos foram aplicados após o acabamento magnético-abrasivo.

Estes e outros estudos encontrados na literatura mostram, no entanto, forte discrepância entre resultados obtidos em diferentes centros de pesquisa. Uma primeira análise traz à tona dois pontos de discussão. Primeiramente, considerando-se que cada pesquisador lança mão de equipamentos não comerciais, muitas vezes dispositivos de fabricação própria ou adaptados para a realização do processo, e que os parâmetros adequados podem ser dependentes destes equipamentos, faz-se necessário um estudo suficientemente amplo, a fim de avaliar os resultados obtidos para diferentes condições de aplicação do acabamento magnético abrasivo para um mesmo ferramental. Isso se torna mais importante ao considerar que, devido à interdisciplinaridade, à grande quantidade de variáveis envolvidas e à ocorrência de imprecisões comuns a qualquer processo de fabricação, as conclusões obtidas na literatura baseiam-se, por vezes, no pragmatismo dos autores, gerando hipóteses e conclusões aparentemente contraditórias, ou válidas apenas dentro das condições em que foram determinadas.

Por outro lado, o interesse dos pesquisadores da área parece se concentrar sobre aplicações extremamente específicas ou sobre o efeito dos parâmetros de processo mais tradicionais, gerando resultados redundantes ou controversos, e negligenciando, por sua vez, questões consideradas de pouca influência sobre o processo.

No caso do acabamento magnético-abrasivo utilizando pó magnético-abrasivo de fraca ligação, algumas características pouco estudadas se referem às propriedades e quantidades do elemento utilizado como aglutinante, em geral um óleo lubrificante comercial, adicionado à mistura de elementos magnéticos e abrasivos. Considerando-se que as características tribológicas deste elemento atuam diretamente sobre a adesão entre partículas magnéticas e abrasivas, essencial para a execução do processo, há necessidade de estudos mais aprofundados no que concerne às propriedades tribológicas do elemento aglutinante e sua concentração no pó magnético-abrasivo, assunto pouco tratado na literatura.

Desse modo, o objetivo deste trabalho é a realização de um estudo investigativo a respeito da influência das características tribológicas do elemento aglutinante adicionado ao pó magnético-abrasivo sobre as variáveis de resposta do processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo, a saber, acabamento superficial e remoção de material. Para tanto, lança-se mão de ferramentas de projeto de experimentos, aliadas a um controle estatístico dos resultados experimentais, para diferentes condições operacionais. Uma vez que o elemento aglutinante adicionado, bem como sua proporção em massa em relação à quantidade de material ferromagnético e abrasivo do pó magnético-abrasivo, atua sobre a adesão e o

deslizamento relativo entre estes diferentes elementos, as propriedades avaliadas são as mais relacionadas com os esforços necessários, consistindo na viscosidade cinemática e tensão superficial, definidas de acordo com o elemento aglutinante, e a quantidade adicionada ao pó magnético-abrasivo.

A metodologia de trabalho adotada consistiu em um estudo do processo, incluindo desde o projeto e fabricação do dispositivo até a realização dos testes para determinação da influência de parâmetros específicos sobre este.

Com o objetivo de gerar uma base de conhecimento sobre o processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo foi desenvolvido, em uma etapa inicial, um estudo preliminar teórico e experimental, envolvendo os principais parâmetros de processo. Através desses estudos, foram determinados níveis adequados desses parâmetros, bem como efeitos de interação entre os mesmos.

A avaliação da influência das características do elemento aglutinante adicionado ao pó magnético-abrasivo, alicerçada nos resultados obtidos nos estudos preliminares, buscou avaliar, em especial, o efeito da viscosidade deste elemento e sua concentração. Com o objetivo de restringir os fatores de influência às características cujo efeito se desejou avaliar, todos os testes, com exceção daqueles que fazem parte dos estudos preliminares, foram realizados com óleos básicos, que são produtos refinados de petróleo sem aditivos. Buscando evitar a obtenção de um conhecimento isolado, foram realizados experimentos fatoriais envolvendo outros parâmetros de processo, nos quais puderam ser verificadas possíveis interações entre estes e as características relacionadas às propriedades e concentração do elemento aglutinante.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica, abordando aspectos importantes à compreensão do tema abordado. Estes aspectos incluem conhecimentos relativos ao processo de acabamento magnético-abrasivo e assuntos relacionados.

### 2.1 Processos abrasivos de usinagem

Os processos de fabricação por usinagem possuem três características que os diferenciam dos demais, em especial pelo fato de não serem todas encontradas em outros processos de fabricação. Estas características incluem a possibilidade de obtenção de formas geométricas complexas, com baixas tolerâncias e bom acabamento superficial. Apesar dessas vantagens se apresentarem, em maior ou menor grau, em todos os processos de usinagem, há aqueles que são, devido a características próprias, indicados para a obtenção de formas, dimensões ou acabamento superficial. Processos abrasivos de usinagem são aplicados, na indústria metal-mecânica, como operações de acabamento, com os objetivos de obter baixas tolerâncias geométricas e bons acabamentos superficiais, não atingidos diretamente por operações de desbaste.

Dentre os processos abrasivos de usinagem, os que mais se assemelham ao tema em estudo são os processos de retificação e brunimento, ambas operações de usinagem com ferramenta de geometria indefinida, cujo principal objetivo é conferir a peças previamente usinadas suas características finais de qualidade superficial e geométrica [Groover, 2006].

Os processos de retificação são amplamente utilizados na indústria. Suas características principais, segundo Diniz et al., 1999, são a possibilidade de obtenção de faixas estreitas de tolerância (IT4 a IT6, segundo a norma ISO 286-1), e baixas rugosidades (0,2 a 1,6  $\mu\text{m}$  Ra).

A retificação utiliza como ferramenta o rebolo, que consiste de partículas de um material abrasivo, em uma matriz constituída por um ligante, que fornece a estrutura e estabelece a forma da ferramenta. A seleção de um rebolo deve levar em consideração seus parâmetros, que consistem no material abrasivo, sua granulometria, material ligante, dureza e estrutura do rebolo. Os materiais abrasivos mais utilizados são óxido de alumínio, carboneto de silício, CBN (nitreto cúbico de boro) e diamante policristalino (PCD), sendo o primeiro o mais comum para a retificação de aços e ligas ferrosas. O uso de óxido de alumínio

sinterizado, comercializado sob os nomes comerciais *cubitron* e *seaded gel*, tem crescido devido a seu custo benefício competitivo, considerando-se seu melhor desempenho.

As variações do processo de retificação podem ser classificadas, de acordo com a geometria a receber acabamento, em plana e cilíndrica, com classificações adicionais em ambas, referentes a particularidades dos processos. A primeira pode ser de acordo com a orientação relativa do eixo de rotação da ferramenta e do plano de trabalho, tangencial (paralela) ou frontal (perpendicular), conforme ilustra a Figura 2.1 (fonte: Groover, 2006). A retificação cilíndrica pode ser classificada como interna ou externa, com a última podendo ser separada de acordo com a fixação da peça (entre pontas ou sem centro), e, na retificação cilíndrica externa entre pontas, com o movimento do rebolo (mergulho ou passagem). A diferença consiste na direção de avanço. Enquanto na retificação de passagem o avanço se dá paralelo ao eixo da peça, na variante de mergulho, este é ortogonal. A Figura 2.2 (fonte: Groover, 2006) ilustra os processos de retificação cilíndrica.

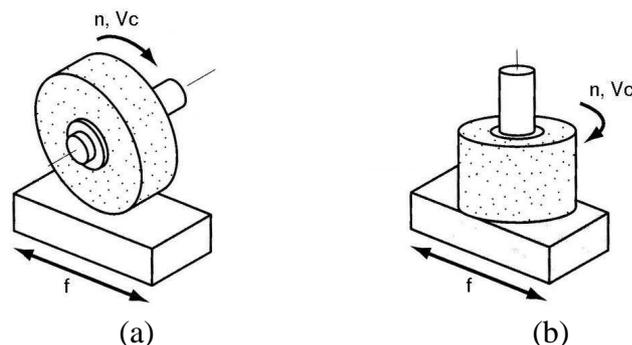


Figura 2.1 – Retificação plana tangencial (a) e frontal (b).

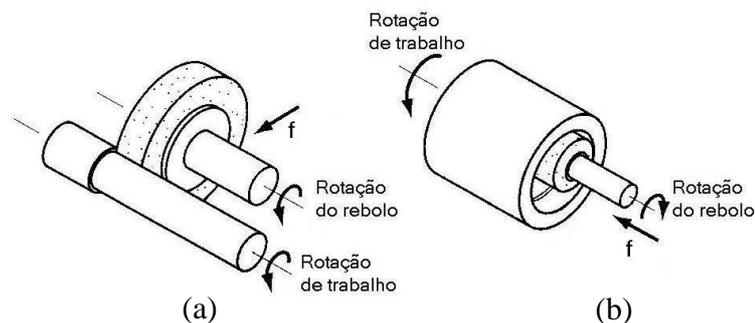


Figura 2.2 – Retificação cilíndrica externa (a) e interna (b).

O uso contínuo de um rebolo, assim como ocorre com ferramentas de usinagem em geral, causa a deterioração de suas características de corte e perda de dimensão e forma. O desgaste associado a um rebolo pode ser classificado em dois fenômenos, com contribuições de diferentes mecanismos de desgaste. O primeiro é o desgaste do rebolo, e diz respeito às

dimensões da ferramenta, e o segundo é a perda de afiação, decorrente do arredondamento das arestas dos grãos e entupimento dos poros do rebolo.

Quando o desgaste do rebolo excede os limites preestabelecidos, é necessário que seja reafiado. A operação para conferir ao rebolo forma, dimensão e capacidade de corte é a dressagem. Apesar de diferentes tipos de dressagem serem usados, o mais comum consiste na usinagem longitudinal do rebolo com uma ferramenta com ponta de diamante, num processo semelhante ao torneamento, no qual a ponta dressadora remove, a cada passe, uma pequena camada superficial do rebolo, conferindo dimensão, forma e agressividade necessária.

Assim como os processos de retificação, o brunimento é aplicado com o objetivo de conferir dimensões e acabamento superficial a componentes, trabalhando com peças de alto valor agregado. Suas principais aplicações são referentes ao acabamento interno de cilindros de motores de combustão interna, cilindros hidráulicos, mancais e componentes que necessitem de retenção de óleos, o que é permitido pelo relevo deixado nas superfícies por este processo, permitindo a obtenção de superfícies com acabamento superficial (rugosidade média  $Ra$ ) na faixa de 0,13  $\mu\text{m}$ . A Figura 2.3 [Groover, 2006] ilustra um padrão característico de superfície brunida.

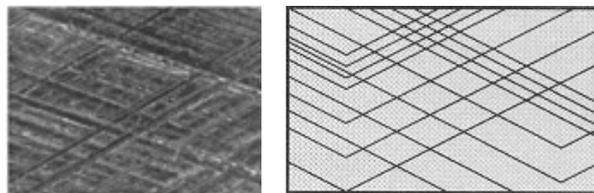


Figura 2.3 – Imagem e representação de superfície brunida.

No brunimento de uma superfície cilíndrica interna, a usinagem é realizada por barras, constituídas de material abrasivo semelhante a um rebolo de retificação, presas a uma ferramenta cilíndrica. As barras são chamadas pedras abrasivas, cuja quantidade depende do diâmetro do furo a receber o acabamento, sendo as mesmas fixadas à ferramenta que corresponde ao brunidor. Neste processo de fabricação, a peça gira lentamente, enquanto a ferramenta, montada em um eixo provido de duas juntas universais, é rotacionada a alta velocidade, sofrendo ainda a aplicação de movimentos alternativos, de baixa amplitude e elevadas frequências. Estes movimentos alternativos são responsáveis pelo padrão superficial cruzado, regulado de forma que uma dada região de uma pedra abrasiva não trace o mesmo caminho duas vezes.

O brunimento externo, também chamado superacabamento, pode ser aplicado no acabamento de superfícies cilíndricas e planas. A Figura 2.4 ilustra as principais variações do processo.

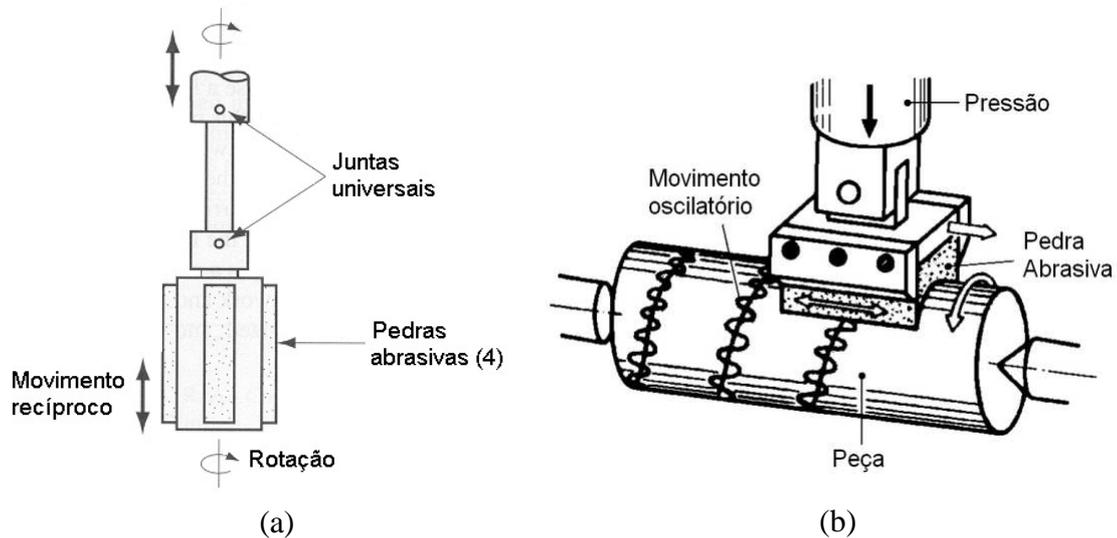


Figura 2.4 – Ilustração dos processos de brunimento (a) interno e (b) externo.

## 2.2 Acabamento superficial

Comumente especificado em projetos mecânicos, o acabamento superficial, representado principalmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou não, que tendem a formar um padrão ou textura característicos em uma superfície. Estas irregularidades estão presentes em todas as superfícies reais, independente de seu grau de perfeição, e identificam uma herança do método empregado na obtenção da superfície.

A importância do acabamento superficial de componentes mecânicos se justifica pelas suas relações com características como exatidão e tolerância, resistência à corrosão e fadiga, propriedades térmicas e de escoamento de fluidos e com a resposta da superfície à lubrificação. Diversos parâmetros são utilizados na avaliação da rugosidade, porém, os mais relevantes são a rugosidade média  $R_a$ , a rugosidade média  $R_z$ , a rugosidade máxima  $R_y$  e a rugosidade total  $R_t$ , sendo o primeiro o mais aplicado na indústria mecânica. O parâmetro rugosidade pode ser representado em  $\mu\text{m}$  ou  $\mu\text{in}$ , e consiste na média aritmética dos valores de afastamento do perfil de rugosidade da superfície analisada em relação à sua linha média (equação 1.1). Seu valor pode ser representado como um retângulo cuja área corresponde à

soma absoluta das áreas localizadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, com comprimento igual ao percurso linear de medição.

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (2.1)$$

Onde  $l_m$  é o percurso de medição e  $y$  o afastamento entre o perfil de rugosidade e a linha média (Figura 2.5).

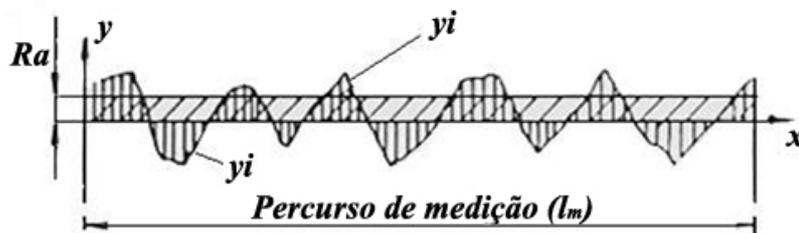


Figura 2.5 – Determinação da rugosidade média  $Ra$ .

Outros parâmetros de rugosidade importantes são a rugosidade máxima  $Ry$ , a rugosidade total  $Rt$  e a rugosidade média  $Rz$ . A Figura 2.6 mostra a determinação destes três parâmetros. A rugosidade máxima  $Ry$  corresponde ao maior valor parcial de rugosidade encontrado no percurso de medição  $l_m$ . A rugosidade total  $Rt$  é a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo, e a rugosidade média  $Rz$  é a média aritmética dos valores encontrados nos diferentes comprimentos de amostragem (equação 2.2).

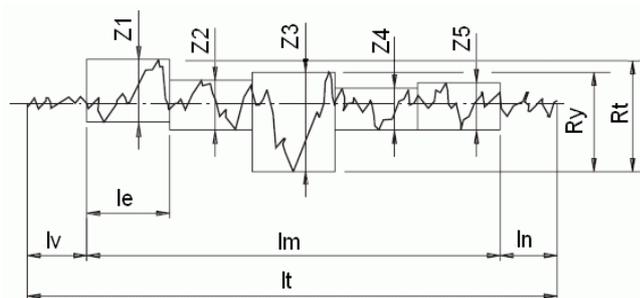


Figura 2.6 – Perfil de rugosidade e diferentes parâmetros de rugosidade.

$$Rz = \frac{Z1 + Z2 + Z3 + \dots + Zn}{n} \quad (2.2)$$

A rugosidade de uma superfície depende diretamente do processo de fabricação com o qual é obtida. A Figura 2.7 apresenta uma comparação entre o acabamento superficial obtido com os principais processos de usinagem e com processos abrasivos (adaptado de Ferraresi,

1970), incluindo acabamento magnético abrasivo cilíndrico [Chang et al, 2002, Jain et al., 2001, Kim e Choi, 1995].

Processo de usinagem	Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ )												
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,012
Torneamento	[Barra com hachuras de 50 a 0,2]												
Furação	[Barra com hachuras de 25 a 0,2]												
Retificação	[Barra com hachuras de 12,5 a 0,05]												
Brunimento	[Barra com hachuras de 3,2 a 0,025]												
Lapidação	[Barra com hachuras de 1,6 a 0,012]												
Superacabamento	[Barra com hachuras de 0,8 a 0,012]												
Polimento	[Barra com hachuras de 0,4 a 0,012]												
Acabamento magnético-abrasivo	[Barra com hachuras de 0,2 a 0,012]												

Aplicação comum  
 Aplicação menos comum

Figura 2.7 – Acabamento superficial obtido com diferentes processos de usinagem.

### 2.2.1 Circuitos magnéticos

Um circuito magnético simples pode ser descrito como uma bobina enrolada sobre um núcleo fechado, constituído de material ferromagnético, percorrida por uma corrente  $i$  (Figura 2.8, Fitzgerald et al., 1975). Esta gera um campo magnético de intensidade  $H$ , cujos valores, em quaisquer caminhos que incluam a passagem da corrente  $i$ , são independentes de estes atravessarem ou não o núcleo. Porém, uma vez que a permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ) destes materiais varia entre dois e seis mil, a densidade de fluxo magnético produzida por  $H$  é desprezível em todos os pontos externos ao núcleo, e constante neste.

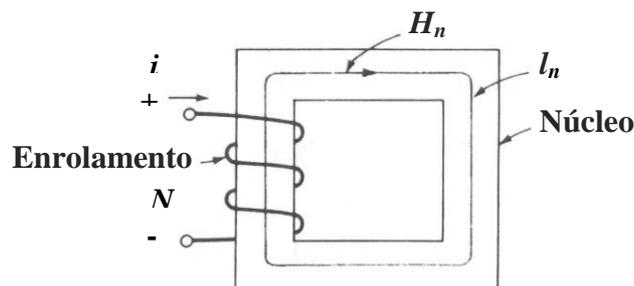


Figura 2.8 – Circuito magnético simples.

Considerando-se a curva amperiana como sendo o caminho médio ( $l_n$ ) percorrido pelo fluxo magnético no núcleo, a lei de Ampère permite a obtenção da intensidade do campo magnético e da indução magnética ( $H$  e  $B$ ) no interior do núcleo (equações 2.3 e 2.4), onde  $N$  é o número de espiras do enrolamento. O termo  $Ni$  define a *força magnetomotriz* ( $F_{mm}$ ).

$$H_n = \frac{Ni}{l_n} \quad (2.3)$$

$$B_n = \frac{\mu Ni}{l_n} \quad (2.4)$$

Exemplos de circuitos magnéticos construídos sobre núcleos fechados são transformadores. Dispositivos usados para conversão de energia que incorporam elementos móveis exigem entreferros nos núcleos, como o circuito da Figura 2.9 [Fitzgerald et al., 1975]. A lei de ampère aplicada a este caso pode ser escrita em termos de  $B$  e  $H$ , equações 2.5 e 2.6.

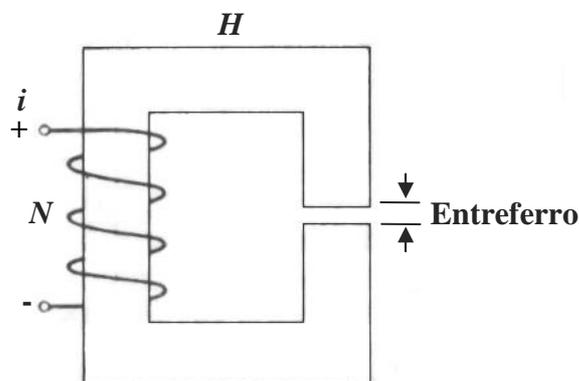


Figura 2.9 – Circuito magnético com entreferro.

$$Ni = H_n l_n + H_e l_e \quad (2.5)$$

$$Ni = \frac{B_n l_n}{\mu_n} + \frac{B_e l_e}{\mu_0} \quad (2.6)$$

Onde os índices  $n$  e  $e$  relacionam as grandezas ao núcleo e ao entreferro, respectivamente,  $\mu_n$  é a permeabilidade magnética do material do núcleo e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo. Substituindo  $B$  na equação 2.6 pelo fluxo magnético  $\phi$  (equação 2.7), contínuo ao longo do circuito magnético, obtém-se a equação 2.8, que pode ser expressa em função da relutância ( $R$ ) ou da permeância ( $P$ ) magnética (equação 2.9), resultando na equação 2.10.

$$\phi = B.A \quad (2.7)$$

$$N.i = \frac{\phi l_n}{A_n \mu_n} + \frac{\phi l_e}{A_e \mu_0} \quad (2.8)$$

$$R = \frac{1}{P} = \frac{l}{A \cdot \mu} \quad (2.9)$$

$$N.i = \phi(R_n + R_e) \quad (2.10)$$

A equação 2.10 pode ser reescrita em função do fluxo magnético  $\phi$  (equação 2.11), cujo termo  $(\mu_0 l_n A_e / \mu_n l_e A_n)$  em circuitos magnéticos típicos é muito menor que a unidade, fazendo com que o comportamento do circuito seja, na prática, determinado apenas pela relutância do entreferro.

$$\phi = \frac{N.i/R}{1 + \left( \frac{\mu_0 l_n A_e}{\mu_n l_e A_n} \right)} \quad (2.11)$$

O circuito magnético da Figura 2.9 pode ser representado através de seu circuito elétrico análogo (Figura 2.10), onde a força magnetomotriz faz o papel da força eletromotriz, e as relutâncias do núcleo ( $R_n$ ) e do entreferro ( $R_e$ ) são escritas na forma de resistências elétricas.

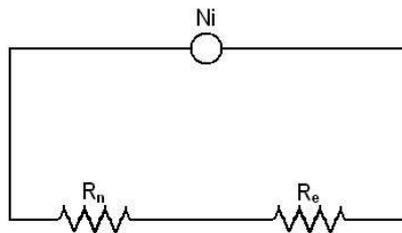


Figura 2.10 – Circuito elétrico análogo à Figura 2.9.

### 2.3 Propriedades dos Óleos Minerais

Óleos Minerais são basicamente hidrocarbonetos contendo centenas de diferentes estruturas, pesos moleculares e volatilidades, bem como quantidades menores, porém importantes, de derivados de hidrocarbonetos contendo um ou mais dos elementos enxofre, nitrogênio e oxigênio [Neale, 1995]. Estes elementos podem ser classificados, de acordo com sua composição, como de base parafínica, com quantidades significativas de ceras parafínicas e pouco ou nenhum material asfáltico, naftênica, com material asfáltico de frações menos

voláteis e pouca ou nenhuma parafina, ou mista. Dentre suas propriedades, as mais importantes na indústria metal-mecânica são aquelas relacionadas à viscosidade e tensão superficial.

### 2.3.1 Viscosidade

Considerada a propriedade mais importante dos óleos lubrificantes, a viscosidade é a resistência que determinado fluido aplica na direção oposta a seu escoamento. Diferentes fluidos possuem diferentes viscosidades que, por sua vez, são alteradas pela temperatura e pela taxa de cisalhamento.

A viscosidade pode ser apresentada de diferentes formas, como a viscosidade cinemática e a viscosidade dinâmica, além de sua variação em função da temperatura, expressa através do índice de viscosidade. Viscosidade dinâmica é o coeficiente que relaciona a força de cisalhamento necessária para gerar uma taxa de deslocamento  $u$  entre duas superfícies com área de contato  $A$ , separadas por uma camada de fluido com espessura  $h$  (Figura 2.11, Stachowiak e Batchelor, 2000). A equação 2.12 ilustra o cálculo da força de cisalhamento, onde  $\eta$  é a viscosidade dinâmica, e implica que maiores forças viscosas de cisalhamento estão associadas a maiores velocidades relativas e menores distâncias entre superfícies.

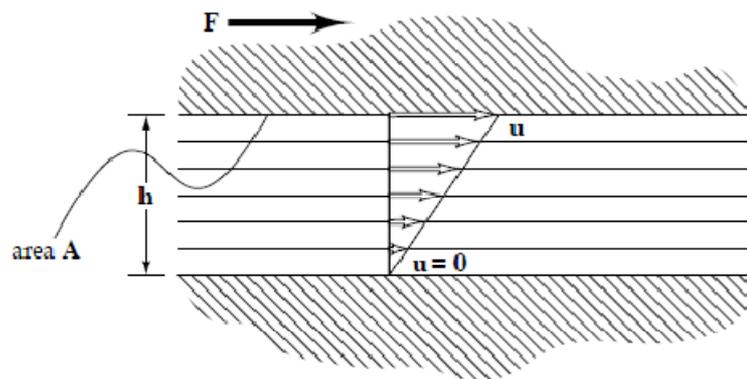


Figura 2.11 – Determinação da viscosidade de um fluido.

$$F = \frac{\eta \cdot A \cdot u}{h} \quad (2.12)$$

O simples rearranjo da equação 2.12 permite a obtenção da viscosidade dinâmica em função da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ), e da taxa de cisalhamento ( $u/h$ ):

$$\eta = \frac{\tau}{(u/h)} \text{ [Pa.s]} \quad (2.13)$$

A viscosidade cinemática de um fluido é definida como a razão entre a sua viscosidade dinâmica e sua densidade ( $\rho$ ):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (2.14)$$

Apesar de possuírem unidades SI, as unidades mais utilizadas para a representação das viscosidades dinâmica e cinemática são, respectivamente, o centipoise (cP, equivalente a  $10^{-3}$  Pa.s) e o centistoke (cSt, equivalente a  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s).

Dentre os fatores que podem alterar a viscosidade de um fluido se destacam a sua composição química, pressão e a temperatura. Em relação à última, certos elementos podem apresentar redução de 80% em sua viscosidade, com um aumento de temperatura de 25°C, tornando essencial o conhecimento das condições de utilização do lubrificante [Stachowiak e Batchelor, 2000].

O comportamento de um fluido em relação à temperatura pode ser calculado através de diferentes equações, sendo as mais utilizadas as de Walther (2.15) e Vogel (2.16).

$$(\nu + a) = b \cdot d^{1/T^c} \quad (2.15)$$

$$\eta = a \cdot e^{b/(T-c)} \quad (2.16)$$

Onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são constantes empíricas, e  $T$  a temperatura absoluta. Enquanto a equação 2.16 fornece o resultado mais exato, a equação de Walther é a base do sistema de classificação ASTM.

A Figura 2.12, adaptada de Stachowiak e Batchelor, 2000, mostra curvas típicas de viscosidade cinemática em função da temperatura. A classificação de um óleo em função da declividade das curvas é feita através do cálculo do índice de viscosidade  $IV$ , que consiste na comparação entre as viscosidades do fluido cujo  $IV$  se deseja saber e óleos que apresentam pouca ( $IV$  elevado) e muita ( $IV$  baixo) variação em função da temperatura.

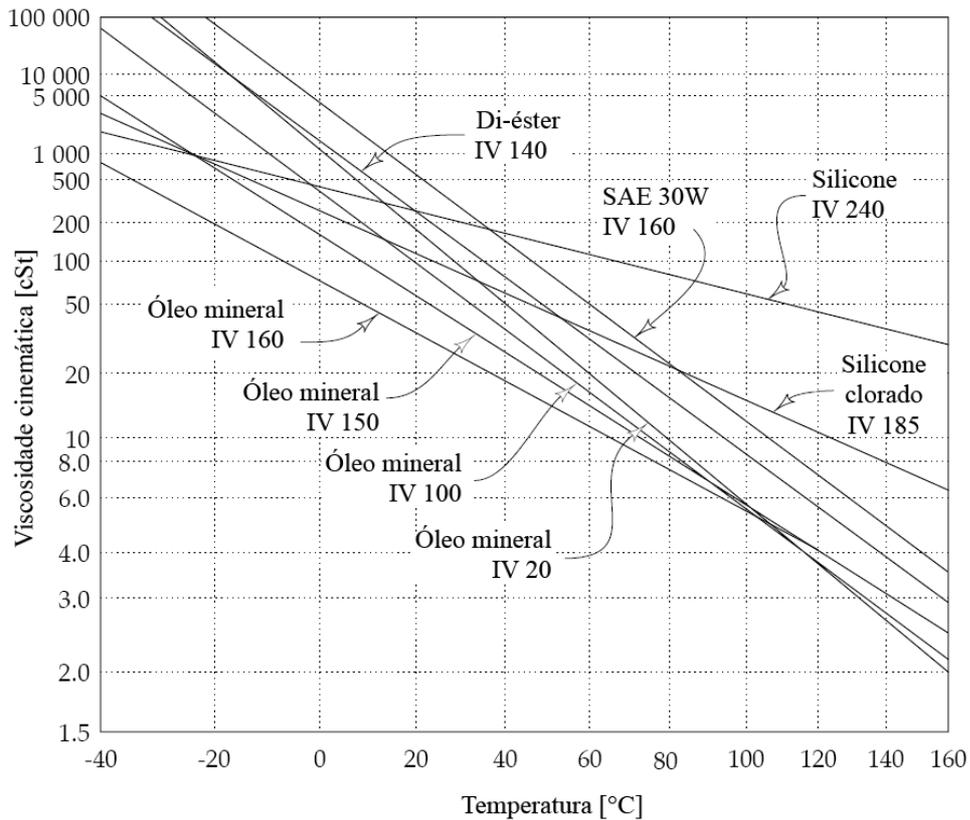


Figura 2.12 – Viscosidade cinemática em função da temperatura para diferentes óleos.

O índice de viscosidade pode ser calculado através da equação 2.17, onde  $U$  é a viscosidade do fluido à temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ , e as constantes  $L$  e  $H$  são tabeladas em função da viscosidade a  $100^{\circ}\text{C}$ .

$$IV = \frac{(L - U)}{(L - H)} \cdot 100 \quad (2.17)$$

Em aplicações nas quais se necessita de índices de viscosidade mais elevados, devido a variações significativas na temperatura de trabalho, é possível o uso de óleos multiviscosos. Estes compostos são obtidos através da adição de aditivos poliméricos a óleos minerais ou sintéticos. Estes óleos, classificados pelas normas SAE J300 e SAE J306, caracterizam-se por possuírem índices de viscosidade mais elevados que outros com viscosidades próximas. A Tabela 2.1 mostra a classificação SAE para óleos simples em função da viscosidade cinemática, usada também para denominar óleos multiviscosos.

Tabela 2.1 – classificação de óleos automotivos segundo a SAE.

Grau de viscosidade SAE	Viscosidade cinemática a 100 ° C (cS)	
	Mínima	Máxima
0W	3,8	-
5W	3,8	-
10W	4,1	-
15W	5,6	-
20W	5,6	-
25W	9,3	-
20	5,6	< 9,3
30	9,3	< 12,5
40	12,5	< 16,3
50	16,3	< 21,9
60	21,9	< 26,1

A classificação de um óleo multiviscoso é feita através da comparação de sua viscosidade, às temperaturas de -18 °C e 100 °C, à viscosidade de óleos simples nas respectivas temperaturas (Figura 2.13).

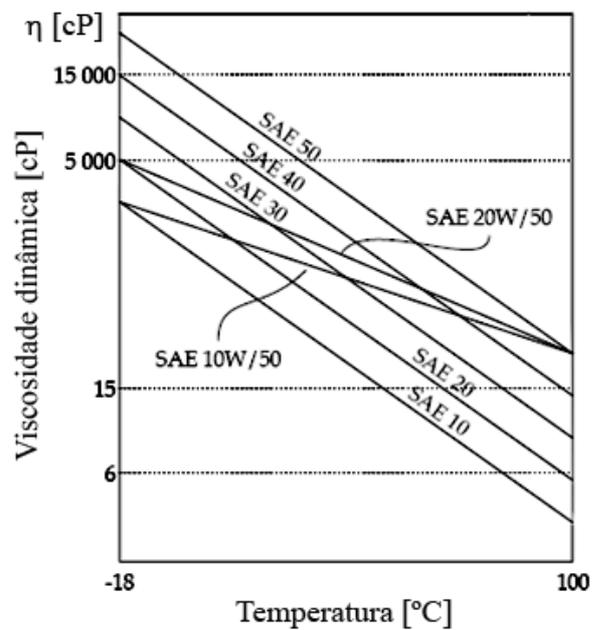


Figura 2.13 – Índice de viscosidade de óleos automotivos simples e multiviscosos.

### 2.3.2 Óleos não-newtonianos

A variação da taxa de cisalhamento é, em geral, acompanhada por uma variação na tensão de cisalhamento observada no filme lubrificante. Geralmente assume-se que este comportamento é linear, o que caracteriza fluidos newtonianos. Óleos minerais puros comportam-se desta maneira até taxas de cisalhamento na faixa de  $10^6 \text{ s}^{-1}$ , porém, em faixas mais elevadas, estes materiais assumem um comportamento não-newtoniano, no qual esta proporcionalidade deixa de ser verdadeira. Neste comportamento, chamado pseudoplástico (Figura 2.14), a viscosidade é uma função da taxa de cisalhamento.

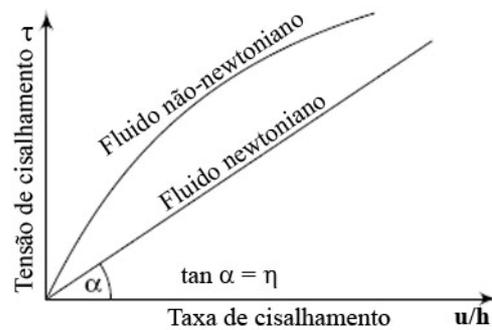


Figura 2.14 – Relação entre força e taxa de cisalhamento para fluidos newtonianos e não-newtonianos.

A Figura 2.15 [Stachowiak, 2000] mostra a variação da viscosidade cinemática em função da taxa de cisalhamento para diferentes lubrificantes. O comportamento pseudoplástico é comum em lubrificantes multiviscosos, devido à grande quantidade de elementos plastificantes adicionados como elemento de liga.

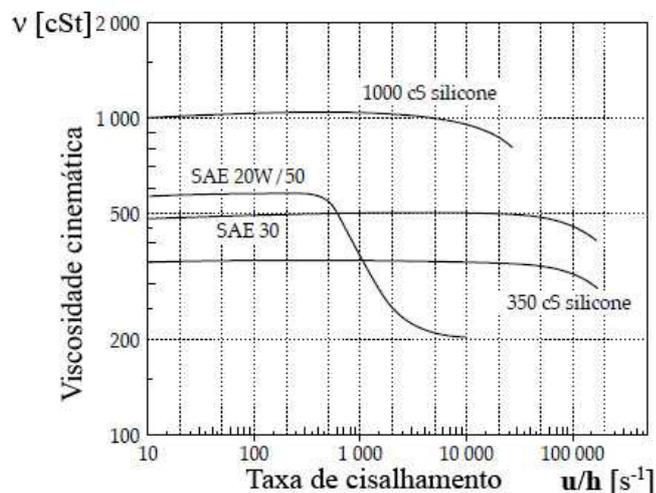


Figura 2.15 – Comportamento pseudoplástico de óleos lubrificantes.

Além do comportamento pseudoplástico, há outro tipo de comportamento não-newtoniano importante do ponto de vista da engenharia, chamado tixotrópico. Enquanto o primeiro consiste na redução da viscosidade cinemática com o aumento da taxa de cisalhamento, este consiste na perda de consistência do fluido durante o cisalhamento, causando uma redução na viscosidade aparente (Figura 2.16). Apesar de geralmente reversível, este efeito pode causar perdas permanentes na viscosidade.

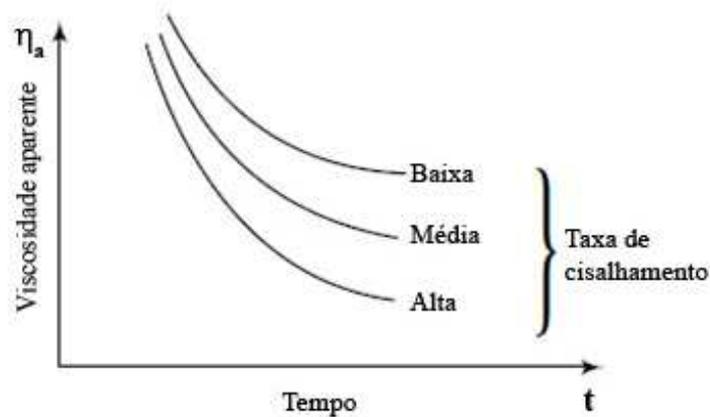


Figura 2.16 – Comportamento tixotrópico de óleos lubrificantes.

## 2.4 Tensão Superficial

A tensão superficial (também chamada de tensão interfacial quando se refere a uma interface definida) é uma propriedade dos fluidos associada à atração entre suas moléculas, e relacionada à energia livre presente na superfície. Esta tensão está presente na interface entre dois fluidos ou, ainda, entre um fluido e um sólido, podendo ser relacionada à curvatura da interface de um líquido através das forças de adesão e coesão. Em uma interface com elevada tensão superficial, uma curvatura, chamada menisco, se forma, criando uma diferença de pressão positiva (pressão de Laplace) entre o lado côncavo e o convexo, com a pressão mais elevada estando no interior da superfície curva. A Figura 2.17 ilustra este processo através da comparação entre as forças de adesão sólido-líquido ( $F_{Ad}$ ) e de coesão do líquido ( $F_{cl}$ ) de dois fluidos, em relação à parede de um reservatório. No primeiro caso (Figura 2.17a), o fluido forma um menisco côncavo. Diz-se, neste caso, que o fluido molha o sólido. Na Figura 2.17b, o menisco formado é convexo, exemplificando um fluido que molha pouco a superfície [Ferreira, 2004].

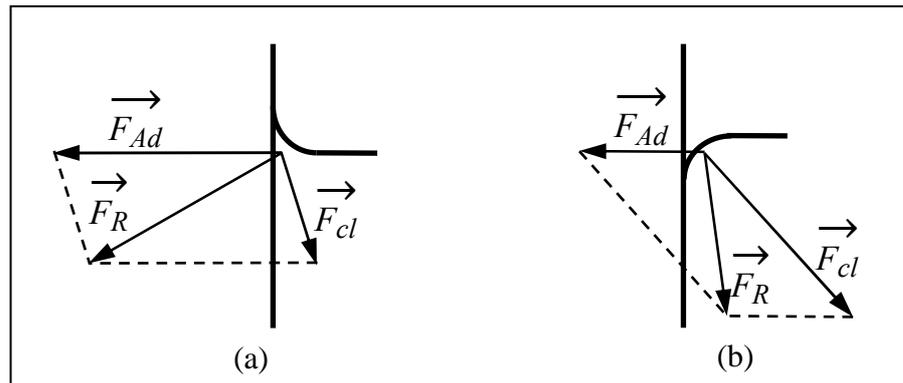


Figura 2.17 – Formação de meniscos em reservatórios para interfaces sólido-líquido de elevada (a) e baixa tensão interfacial (b).

Em uma interface sólido-líquido com elevada tensão interfacial, formam-se interações fortes entre as moléculas de ambos os materiais, de modo que as forças de adesão tornam-se suficientes para fazer com que o líquido aumente sua área de contato com o sólido, seja se espalhando, em uma superfície plana horizontal, seja escalando uma superfície vertical [Ferreira, 2004]. Por outro lado, quando as forças de coesão entre as moléculas do líquido são mais elevadas que as forças de adesão deste com o sólido, há uma tendência de redução da esta área de contato (Figura 2.17b), comportamento típico de fluidos não-molhantes. A Figura 2.18 mostra os ângulos de contato com superfícies sólidas para líquidos perfeitamente molhante a não-molhante.

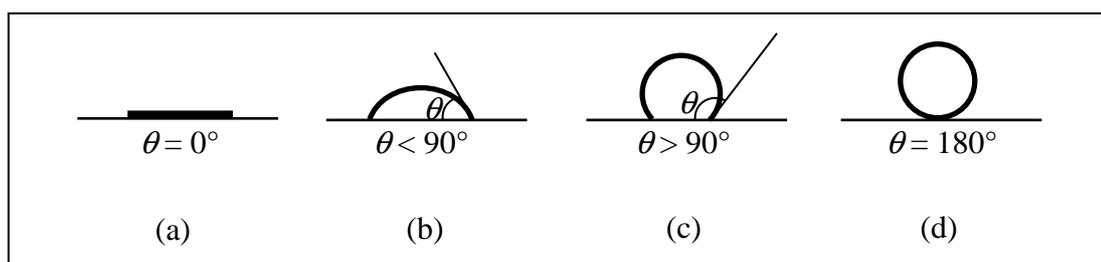


Figura 2.18 – Ângulo de contato para fluido: (a) perfeitamente molhante; (b) predominantemente molhante; (c) predominantemente não-molhante e (d) não-molhante.

O fenômeno da tensão superficial também pode ser exemplificado através da análise do trabalho despendido no aumento da área de uma membrana de água com sabão. Considere-se esta mistura estendida sobre um fio metálico em forma de  $U$  (Figura 2.19, Groff, 1961), que forma um retângulo com outro fio, de comprimento  $L$ , que pode ser movido, alterando a área superficial. Considerando-se a aplicação de uma força  $F$ , causando um deslocamento  $\Delta x$

do arame móvel, obtém-se um aumento superficial nas duas faces da membrana igual a  $2.L\Delta x$ , às custas de um trabalho ( $W$ ) igual a  $F\Delta x$ , em uma relação descrita pela equação 2.18.

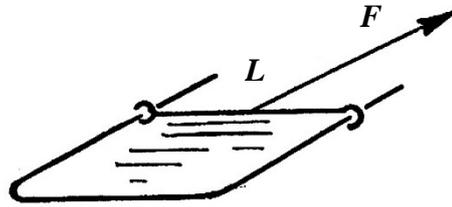


Figura 2.19 – Determinação teórica da tensão superficial de um fluido.

$$W = F \cdot \Delta x = 2 \cdot \gamma \cdot L \cdot \Delta x , \quad (2.18)$$

Onde  $\gamma$  é a tensão superficial do fluido, em mN/m.

## 2.5 Adesão mediada por fluido

A presença de líquidos com baixo ângulo de contato em interfaces sólido-sólido conduz à formação de pontes adesivas (meniscos) nas regiões de contato entre as superfícies (Figura 2.20). Estas forças adesivas podem ser divididas em duas componentes [Bhushan, 2002], segundo a equação 2.19:

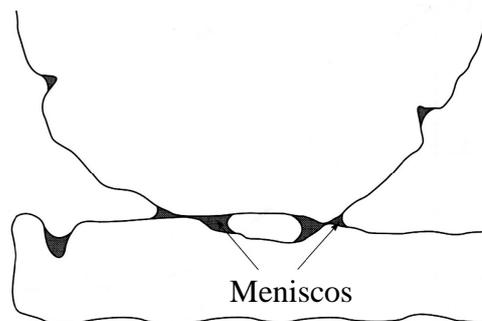


Figura 2.20 – Formação de meniscos nas zonas de interface sólido-sólido.

$$F_{Ad} = F_m + F_{V\perp} , \quad (2.19)$$

Onde  $F_m$  é a força de menisco e  $F_{V\perp}$  uma força viscosa, dependente da taxa de aplicação do esforço. A Figura 2.21 mostra a relação força-tempo para uma taxa de aplicação de força constante. Para uma força aplicada menor que a força de menisco, não há tendência à separação das superfícies. Porém, quando esta força excede  $F_m$ , a força viscosa atua até que haja a separação.

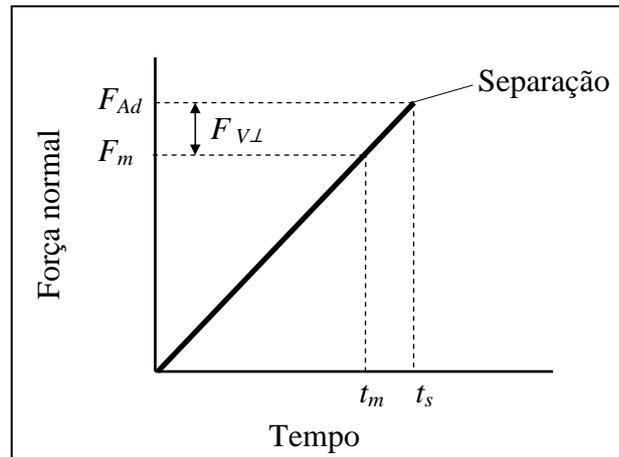


Figura 2.21 – Relação entre força e tempo na separação de duas superfícies unidas por meniscos.

Segundo Bhushan, 2002, a componente viscosa da força adesiva será mais significativa para fluidos viscosos ou para fluidos de baixa viscosidade a elevadas taxas de cisalhamento.

A força de menisco pode ser determinada através da consideração do caso de uma esfera e um plano, em contato intermediado por um menisco (Figura 2.22, fonte: Bhushan, 2002). Uma vez que a pressão no interior de um líquido com menisco côncavo é menor que a pressão no exterior do líquido, ocorre uma diferença entre ambas chamada pressão de Laplace. Se o líquido molha a superfície, os ângulos de contato ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ ) serão entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . A força de atração entre a esfera e o plano é então chamada de força de Laplace (equação 2.20), cujo valor é independente da espessura do filme líquido.

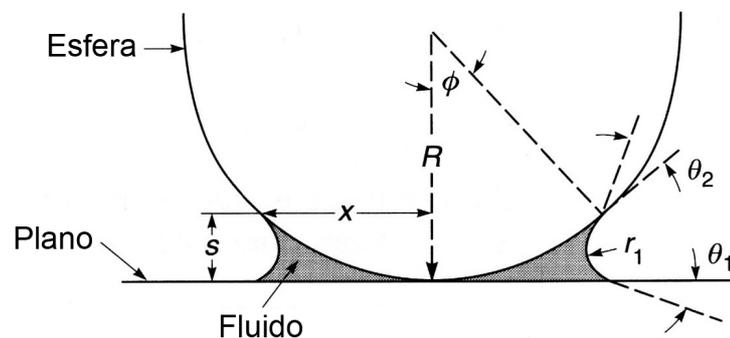


Figura 2.22 – Esfera em contato com superfície plana e menisco.

$$F_L \sim 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \gamma (\cos \theta_1 + \cos \theta_2), \quad (2.20)$$

Onde  $R$  é o raio da esfera e  $\gamma$  a tensão superficial do fluido. Considerando-se esfera e superfície plana constituídas do mesmo material,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são iguais, e pode-se reduzir a equação 2.20 para

$$F_L \sim 4. \pi. R. \gamma \cos \theta \quad (2.21)$$

A componente normal da força de menisco é calculada pela equação 2.22,

$$F_T = 2. \pi. R. \gamma. \text{sen} \phi. \text{sen}(\phi + \theta) \quad (2.22)$$

Para pequenos ângulos de contato,  $F_T$  é suficientemente pequena em relação a  $F_L$  para ser desprezada. Desse modo, havendo contato direto entre os sólidos, a força total de menisco é igual à soma de  $F_L$  com uma componente referente à energia superficial livre do sólido no líquido  $\gamma_{SL}$ , eq. 2.23:

$$F_m = 4. \pi. R. (\gamma \cos \theta + \gamma_{SL}) \quad (2.23)$$

Análises semelhantes podem ser realizadas para os casos de esferas próxima a uma superfície plana (Figura 2.23a) e próxima a uma superfície plana coberta por um filme contínuo (Figura 2.23b). Ambos os casos são descritos pelas equações 2.24 e 2.25.

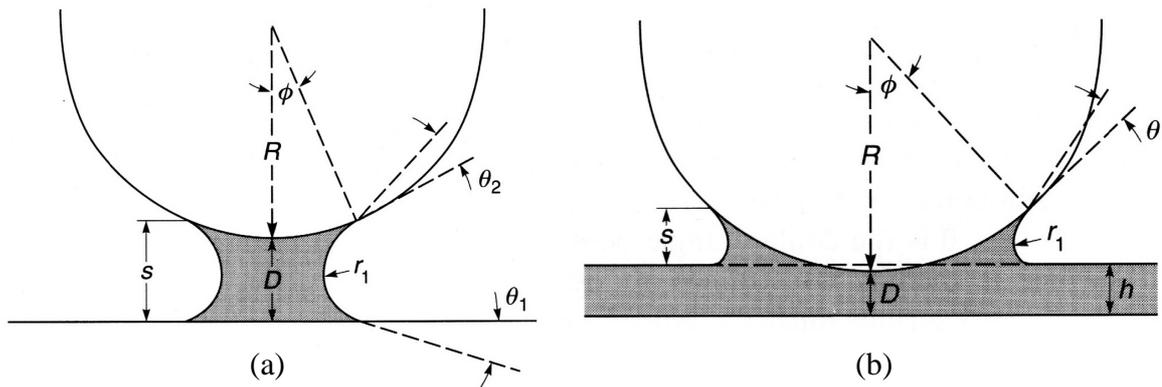


Figura 2.23 – Esfera próxima a uma superfície plana (a) e próxima a uma superfície plana coberta por um filme contínuo (b). Fonte: Bhushan, 2002.

$$F_m = \frac{4. \pi. R. \gamma. (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{(1 + D/s)} \quad (2.24)$$

$$F_m = 2. \pi. R. \gamma. (1 + \cos \theta) \quad (1)$$

A força viscosa pode ser associada à viscosidade dinâmica do fluido e ao tempo necessário para a separação das superfícies através da equação 2.26 [ Mcfarlane e Tabor, 1950]:

$$F_V = \frac{\beta \cdot \eta}{t_s}, \quad (2.26)$$

Onde  $\beta$  é uma constante de proporcionalidade. Para que a força viscosa seja vencida, é necessária a aplicação de um impulso viscoso crítico  $I_V$ , independente da geometria das superfícies e da taxa na qual a separação entre as superfícies ocorre, eq. 2.27.

$$I_V = \int_{t_m}^{t_s} F_V dt \quad (2.27)$$

Para uma força constante aplicada, a relação entre  $F_V$  e tempo é dada pela equação 2.28,

$$F_V = \frac{I_V}{t_s} \quad (2.28)$$

No caso da aplicação de uma força uniformemente variada  $F_V = t \cdot dF/dt$ , a máxima força viscosa é dada pela equação 2.29, e a taxa de variação da força aplicada é relacionada à velocidade através da rigidez  $k$  do elemento que aplica o esforço (equação 2.30):

$$F_V = (2 \cdot I_V \frac{dF}{dt})^{1/2} \quad (2.29)$$

$$\frac{dF}{dt} = k \cdot v \quad (2.30)$$

Matthewson e Mamin, 1998, apresentam expressões para o cálculo aproximado das forças viscosas envolvidas no deslizamento de uma esfera em uma superfície plana, para as direções normal e tangencial ao plano (equações 2.30 e 2.31).

$$I_{V\perp} = 6\pi\eta_l R^2 \ln\left(\frac{h}{2h_m}\right) \quad (2.31)$$

$$I_{V//} = \frac{32}{3}\eta_l R(Rh)^{1/2} \ln\left(\frac{2h}{h_m}\right) \quad (2.32)$$

Onde  $h_m$  é a menor distância entre a esfera e o plano, podendo ser interpretada como a microrrugosidade das superfícies ou o tamanho de uma molécula de fluido, e  $h$  a espessura média da película líquida.

A influência da quantidade de fluido sobre a adesão entre duas superfícies pode ser exemplificada através da comparação entre um caso onde há pouco lubrificante e outro no qual há um filme contínuo. A Figura 2.24, adaptada de Bhushan, 2003, mostra o contato entre duas superfícies, uma das quais contém asperidades. Havendo pouco fluido (Figura 2.24a), meniscos se formam nos pontos de contato entre as asperidades e a superfície plana, criando uma força de menisco proporcional à quantidade de asperidades. No caso de um regime de imersão (Figura 2.24b), não há força de menisco contribuindo com a adesão, sendo esta constituída somente por forças viscosas.

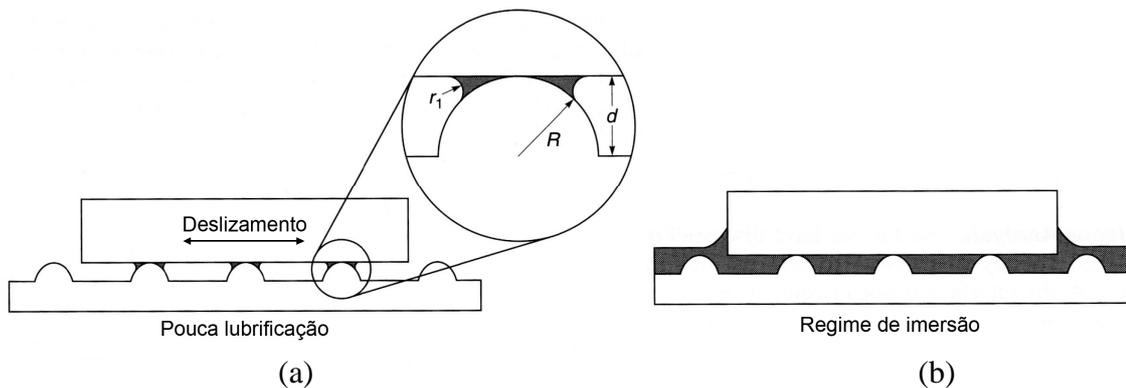


Figura 2.24 – Adesão mediada por fluido entre uma superfície lisa e outra contendo asperidades para regimes de lubrificação de pouco líquido (a) e imerso (b).

A transição entre os regimes com pouco líquido e de imersão provém forças adesivas mais elevadas, permitindo maior efeito aglutinante entre os elementos. Além disso, o aumento na velocidade relativa entre as superfícies causa o aumento na força de cisalhamento viscosa, como ilustra a equação 2.12. A Figura 2.25, adaptada de Bushan, 2003, mostra de forma esquemática a influência do regime de lubrificação, aliado à taxa de cisalhamento entre duas superfícies, sobre a fricção (estática e dinâmica) observada entre elas.

À medida que a espessura do filme lubrificante se torna maior que a rugosidade, o regime de lubrificação passa de pouco líquido para inundado. Este ocorre apenas em uma faixa restrita, causando maior força adesiva e fricção entre as superfícies. Com o aumento na espessura do filme (causado pelo uso de lubrificante mais viscoso, em maior quantidade ou ainda pela redução da carga normal) este regime desaparece substituído pelo imerso, onde as forças de menisco cessam, restando apenas a força viscosa. A escolha do regime de

lubrificação depende da finalidade desejada. Enquanto a durabilidade de componentes móveis aumenta no regime imerso, há maior adesão no regime inundado, permitindo o desenvolvimento de maiores esforços com menor deslizamento relativo.

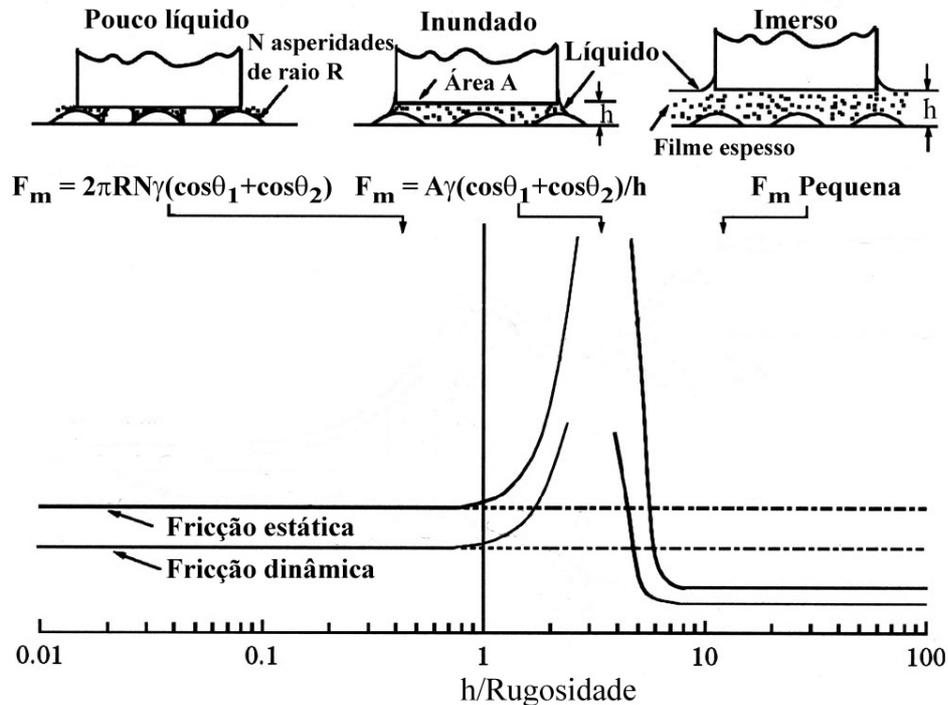


Figura 2.25 – Influência da relação entre espessura do filme fluido e rugosidade sobre as forças de fricção.

## 2.6 Processo de Acabamento Magnético Abrasivo

O acabamento magnético abrasivo é um processo de usinagem com ferramenta de geometria e forma indefinidas. Dentre suas capacidades estão conferir acabamento superficial, remoção de rebarbas e efetuar correções geométricas, com baixa remoção de material. Neste processo, a ferramenta de corte é uma escova magnética flexível (EMF), formada pela ação do campo magnético sobre o pó magnético-abrasivo (PMA). A EMF é gerada pela força de atração magnética núcleo-partícula, partícula-partícula e partícula-peça, e se adapta à geometria da peça a ser usinada. A remoção de material é gerada, então, pela abrasão causada pelo movimento relativo entre ferramenta e peça.

O acabamento magnético-abrasivo pode ser classificado, de acordo com a geometria a ser trabalhada, em cilíndrico ou frontal, cada qual com subclassificações, conforme a Figura 2.26.

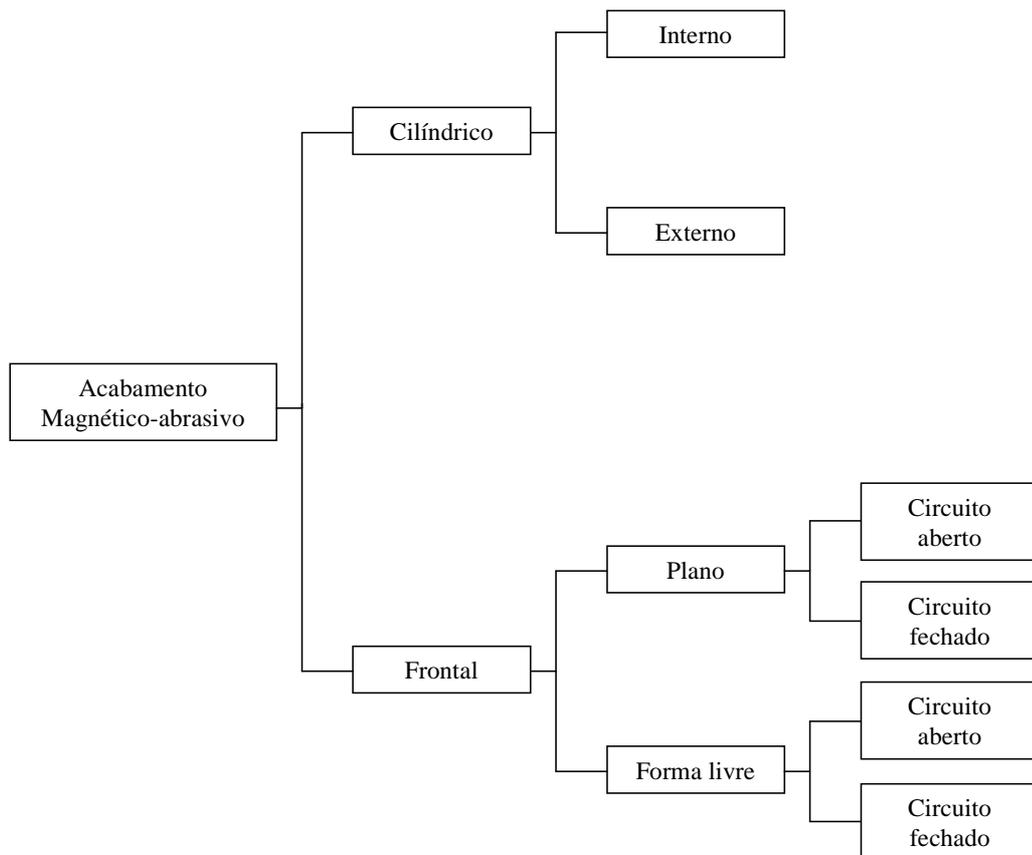


Figura 2.26 – Classificação dos processos de Acabamento Magnético Abrasivo.

Classificações adicionais podem ser feitas com relação ao movimento da ferramenta, e à existência ou não de vibração aplicada ao sistema.

Considerando tratar-se de um processo de fabricação de pouca aplicação industrial, cujo uso ainda se restringe ao ambiente acadêmico, novas variações surgem, tanto de adaptações de aplicações em uso, ou de alterações mais radicais. Devido a esta grande variabilidade, não é possível abordar neste texto todos os processos de acabamento magnético abrasivo, de modo que serão discutidos apenas os mais relevantes ao trabalho em andamento.

Dentre os parâmetros de processo, a densidade de fluxo magnético  $B$  (controlada pela corrente fornecida ao eletroímã), a velocidade relativa entre ferramenta e peça e o entreferro existente entre estas, além das características do pó magnético-abrasivo usado são considerados os mais importantes. Parâmetros referentes à aplicação de vibrações (amplitude, frequência) também podem influenciar significativamente o resultado do processo [Shinmura et al., 1984, Gomes, 2007].

### 2.6.1 Pó Magnético Abrasivo

O pó magnético-abrasivo consiste em uma mistura de pós ferromagnético e abrasivo, e é a ferramenta que efetivamente executa a remoção de material no processo de acabamento magnético abrasivo. Jain et al., 2001, os classificam de acordo com o tipo de ligação existente entre as diferentes partículas. De acordo com este critério, podem ser não ligados, de fraca ligação ou de forte ligação. O pó magnético-abrasivo não-ligado é uma simples mistura mecânica dos seus componentes, enquanto que no de forte ligação (Figura 2.27, adaptado de Mori et al., 2003), ocorre uma união física entre os elementos magnético e abrasivo, obtida através da compactação da mistura, seguida de sinterização. O PMA é então obtido através do esmagamento da forma obtida e peneirado até a granulometria desejada. O procedimento envolvido na obtenção deste composto faz com que seu custo seja mais elevado, porém, segundo Jain et al., 2001, seu desempenho é superior ao do pó magnético-abrasivo não-ligado.

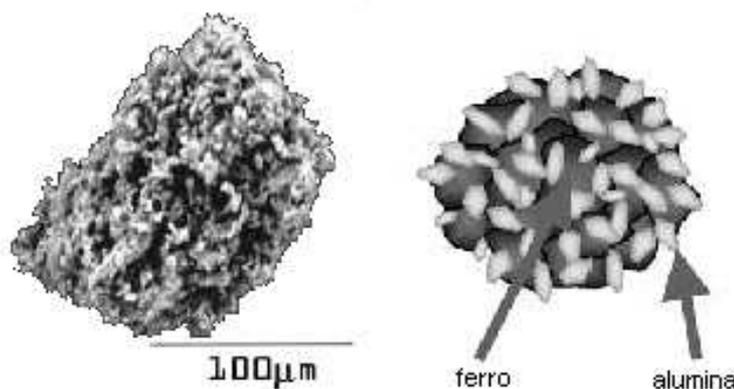


Figura 2.27 – Partículas de pó magnético abrasivo de forte ligação.

Uma classificação adicional é feita para o pó magnético-abrasivo de fraca ligação. Neste composto, é adicionado à mistura mecânica dos pós magnético e abrasivo um componente aglutinante, em geral um óleo lubrificante, visando o aumento da adesão entre ambos. Devido aos bons resultados obtidos e ao baixo custo de produção, o pó magnético-abrasivo de fraca ligação vem sendo amplamente utilizado em pesquisas. Segundo Chang et al., 2002, o uso de PMA de fraca ligação permite resultados tão bons quanto o de misturas sinterizadas.

Devido ao seu fraco desempenho, o pó magnético-abrasivo não-ligado é o que encontra menor aplicação, sendo inclusive mais danoso aos equipamentos envolvidos do que

os demais uma vez que, devido ao movimento existente, o elemento abrasivo tende a se dispersar, acumulando-se nos fusos e barramentos da máquina operatriz. Chang et al., 2002, desconsideram a simples mistura sem adição de aglutinantes, classificando os demais como ligados ou não-ligados, sendo os últimos os que contêm elementos aglutinantes. Neste trabalho é adotada a classificação feita por Jain et al., 2001.

Os pós magnético-abrasivos podem ser constituídos por diferentes materiais, tendo-se em vista apenas que um destes deve ser ferromagnético e o outro abrasivo. Os materiais ferromagnéticos mais usados são ferros fundidos cinzentos e aços em geral, sendo os primeiros preferidos em razão de seu baixo custo e facilidade de obtenção, ainda que pós de aço sejam mais eficientes. Alguns autores [Chang et al., 2002; Yan et al., 2003] estudaram, em seus trabalhos, o comportamento do pó de aço que, por ser de dureza mais elevada, também tem ação abrasiva quando o material em usinagem é de dureza inferior. Chang et al., 2002, obtiveram resultados melhores no acabamento abrasivo de aço termicamente tratado usando pó de aço puro do que com o pó magnético-abrasivo preparado, o que se deve tanto à dureza do pó de aço ser mais elevada que a do material do corpo de prova quanto à maior pressão exercida sobre este pelo campo magnético, em decorrência do material ser completamente ferromagnético.

Gogaev et al., 2006, classificam as partículas do pó magnético-abrasivo de forte ligação (Figura 2.28) como de estrutura martensítica (a); de estrutura *cermet* com partículas abrasivas uniformemente distribuídas (b); globular (c); de estrutura martensítica com carbeto (d); núcleo magnético revestido com uma única camada compósita (e); núcleo recoberto com múltiplas camadas de partículas abrasivas (f) ou núcleo de ferro revestido com uma camada uniforme de boretto de ferro (g). Os elementos abrasivos mais comuns na composição de pós magnético-abrasivos são óxido de alumínio ou alumina, ( $Al_2O_3$ ), carboneto de silício (SiC) e carboneto de nióbio (NiC).

Em relação à granulometria, uma vez que a força magnética resultante da atuação de um campo magnético sobre uma partícula é diretamente proporcional à sua massa, grãos magnéticos de maior dimensão resultam na aplicação de maiores esforços sobre os grãos abrasivos, promovendo maior remoção de material. Efeito contrário é verificado em relação ao pó abrasivo. Uma vez que a profundidade do corte executado por um grão em um passe sobre a peça aumenta com a sua dimensão, menores grãos abrasivos resultam em menor remoção de material e melhor acabamento superficial (rugosidade mais baixa).

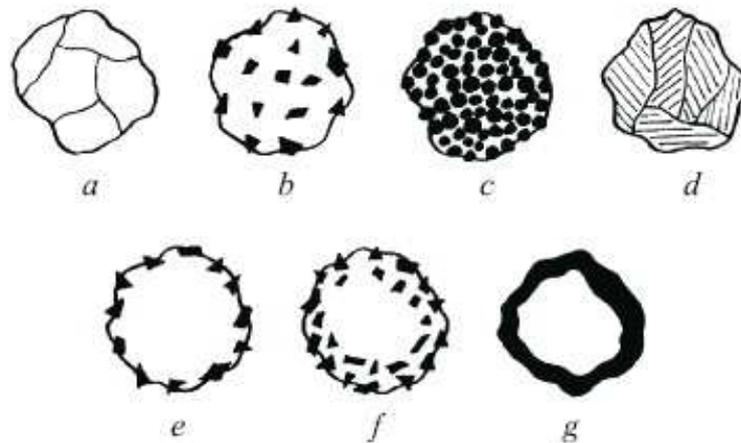


Figura 2.28 – Classificação das partículas do pó magnético-abrasivo de forte ligação.

### 2.6.2 Acabamento Magnético Abrasivo Cilíndrico

O acabamento magnético abrasivo cilíndrico é usado no acabamento de peças de revolução, e pode ser aplicado tanto em geometrias internas quanto externas, em materiais ferromagnéticos ou não. A Figura 2.29, adaptada de Chang et al., 2002, ilustra uma aplicação típica do processo em geometria externas. Neste procedimento, a peça é posicionada entre dois pólos magnéticos, e os entreferros preenchidos com pó magnético-abrasivo. O movimento relativo entre ferramenta e peça ocorre pela rotação da última, enquanto o campo magnético permanece estável, sendo o acabamento feito pela escova magnética flexível. Devido às vantagens do uso de um dispositivo comercial, alguns autores [Jain et al., 2001; Shinmura et al., 1984] executam o acabamento magnético abrasivo em tornos mecânicos adaptados.

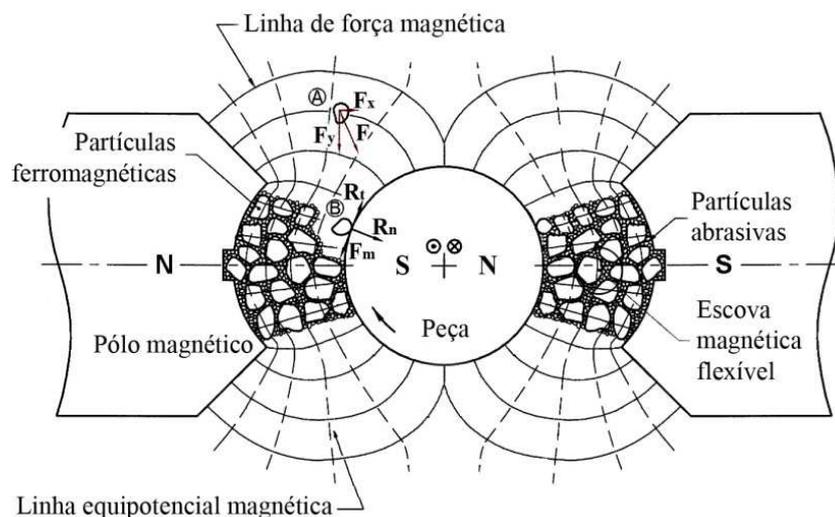


Figura 2.29 – Acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo.

A Figura 2.29 mostra o balanço de forças agindo sobre uma partícula magnética na posição “A”. A resultante é formada pelas componentes ortogonais  $F_x$  e  $F_y$ , equações 2.33 e 2.34:

$$F_x = V\chi_m\mu_o H \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (2.33)$$

$$F_y = V\chi_m\mu_o H \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (2.34)$$

Onde  $x$  e  $y$  são eixos ortogonais em um plano cartesiano,  $\chi_m$  a suscetibilidade magnética da partícula,  $V$  o volume da partícula magnética e  $H$  a intensidade do campo magnético no ponto considerado. Estas forças têm a função de manter o pó no entreferro, impedindo-o de ser disperso pelo efeito da força centrífuga. As partículas magnéticas formam, junto com o pó abrasivo, a escova magnética flexível, que, por sua vez, aplica pressão sobre a superfície de trabalho. A equação 2.35 [Shinmura e Aizawa, 1989] descreve a pressão aplicada:

$$P = \frac{\left[ \mu_o H^2 \left( 1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \right]}{2} \quad (2.35)$$

Onde  $\mu_m$  é a permeabilidade relativa do pó magnético.

Durante o processo de acabamento magnético abrasivo cilíndrico, os esforços agindo sobre uma partícula magnética em um ponto  $B$  junto à superfície em usinagem são devidos aos gradientes da intensidade do campo magnético ( $H$ ) e à rotação da peça. Devido ao movimento da superfície de trabalho, observa-se uma força de resistência ao corte ( $R_t$ ) aplicada pelo material sobre a partícula, tangencial à peça. Os gradientes de  $H$  provocam uma força normal  $R_n$ , apontando para o eixo de rotação, e uma força magnética  $F_m$ , que atua na direção contrária a  $R_t$ . Quando  $F_m$  é maior que  $R_t$ , a partícula magnética tende a executar um movimento de translação regular sobre a superfície, transmitindo pressão ao pó abrasivo. Por outro lado, se  $F_m$  é menor que  $R_t$ , a partícula irá rolar sobre a superfície ou, em casos extremos, ser jogada para fora do entreferro. Ocorrendo o rolamento, a pressão sobre o pó abrasivo desaparece, diminuindo a eficiência do processo. Apesar da maioria dos estudos recentes se concentrarem no efeito causado pelo campo magnético na força tangencial, a total

transmissão desta componente às partículas abrasivas depende fortemente da adesão entre estas e as magnéticas, em especial no caso do pó magnético-abrasivo de fraca ligação.

O acabamento magnético abrasivo cilíndrico interno pode ser executado tanto com rotação da ferramenta quanto da peça. Com o objetivo de obter maior contato entre a escova magnética flexível e a superfície interna da peça, o campo magnético é aplicado em peças não ferromagnéticas (Figura 2.30, Yamaguchi e Shinmura, 1999), com ângulos entre pólos menores que  $180^\circ$ . No acabamento de materiais ferromagnéticos, o ângulo entre os pólos permanece próximo a  $180^\circ$ , sendo ainda necessário o uso de um núcleo com elevada permeabilidade magnética no interior da peça, caso contrário, a densidade de fluxo magnético no interior da peça tende a ser nula.

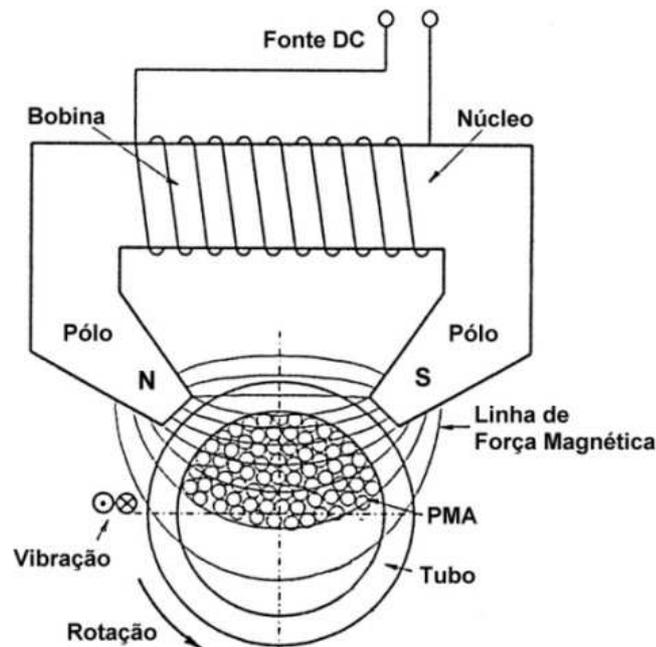


Figura 2.30 – Acabamento magnético-abrasivo cilíndrico interno em tubo não-ferromagnético.

Yamaguchi e Shinmura, 2001, desenvolveram um dispositivo rotativo composto por ímãs permanentes, permitindo a aplicação do processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico interno a superfícies internas de tubos com curvas.

### 2.6.3 Acabamento Magnético Abrasivo Plano

No processo de acabamento magnético abrasivo frontal ou de topo, a rotação é aplicada à ferramenta, cujo eixo se encontra num ângulo perpendicular ao da superfície a receber o acabamento (Figura 2.31, Yin e Shinmura, 2004), que se move no plano de trabalho.

Devido a estas características, o acabamento magnético-abrasivo frontal é executado principalmente em fresadoras universais especialmente adaptadas.

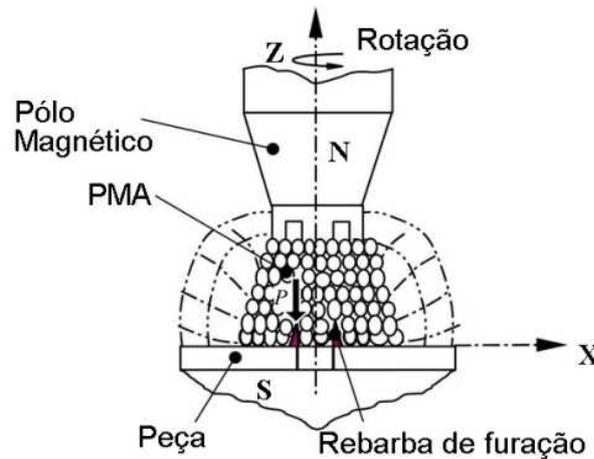


Figura 2.31 – Processo de acabamento magnético-abrasivo frontal.

Esta variação do acabamento magnético abrasivo pode ser aplicada no acabamento de peças planas e de geometrias complexas, e na remoção de rebarbas de furação.

Em relação à ferramenta, esta pode ser de circuito fechado (ou interno) ou de circuito aberto (ou externo). A Figura 2.32, adaptado de Yin e Shinmura, 2004a e 2004b, mostra um dispositivo para aplicação de acabamento magnético abrasivo plano com ferramenta de circuito aberto. Esta nomenclatura é adotada neste trabalho para evidenciar as diferenças entre os processos.

Nesta variante do processo, a bobina responsável pela força magnetomotriz é externa à ferramenta, de modo que é necessário um núcleo ferromagnético (culatra) que conduza o fluxo magnético ( $\phi$ ) até a mesma. Sua maior limitação é a necessidade de polarização da peça ou de sua base, o que restringe o movimento da mesa, uma vez que ferramenta e peça devem permanecer ligadas aos pólos magnéticos. Esta restrição pode ser vencida com o uso de uma mesa auxiliar que possibilite o movimento de avanço e a aplicação de vibração, porém, restringe seu uso em máquinas automáticas e de comando numérico.

A ferramenta de circuito fechado ou interno (Figura 2.33, Singh et al., 2005) é constituída por uma bobina, à qual é aplicada rotação. Desse modo, quando a ferramenta está em contato com o pó magnético-abrasivo, as linhas de força magnética passam, através deste, do núcleo interno ao externo, e de ambos para a peça.

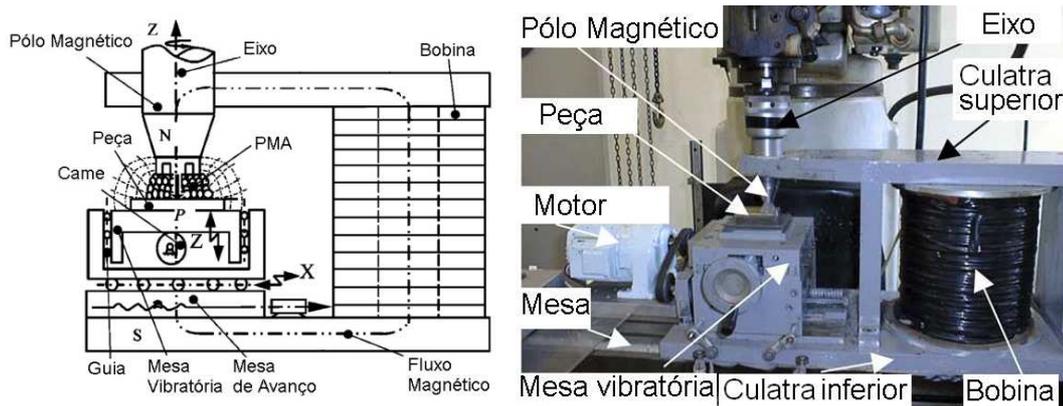


Figura 2.32 – Dispositivo para acabamento magnético-abrasivo frontal com circuito aberto.

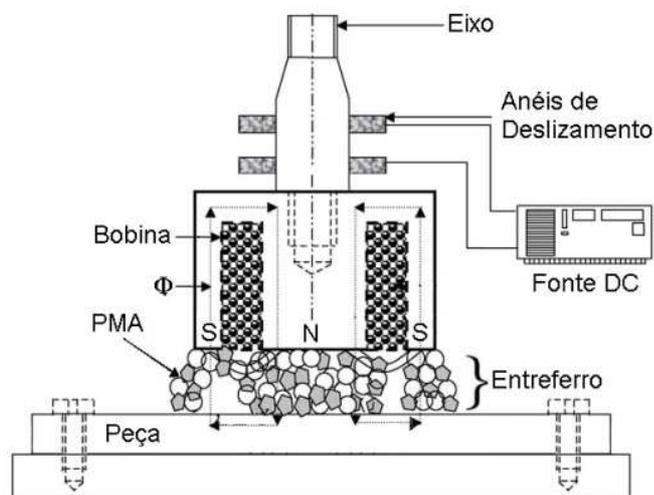


Figura 2.33 – Processo de acabamento magnético-abrasivo frontal com circuito fechado.

No processo com ferramenta de circuito aberto ou externo, é necessário que haja geração externa de campo magnético, que é também conduzido para a peça, ou diretamente abaixo dela, de modo que o pó magnético-abrasivo feche o circuito. Assim, enquanto a ferramenta de circuito aberto possui apenas um pólo, sendo o outro localizado na própria peça em usinagem ou abaixo, a de circuito fechado possui pólos sul e norte na extremidade que executa o acabamento.

### 3. ESTUDOS RELEVANTES NA ÁREA

Esta revisão tem o objetivo de apresentar os avanços obtidos nos processos de acabamento magnético abrasivo até o presente momento, bem como processos de fabricação similares ou derivados.

#### 3.1 Estudos sobre o acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo

Shinmura et al., 1984, 1985a, 1985b, 1986, 1987 e Shinmura, 1989, realizaram uma série de estudos onde diversos aspectos relativos ao acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo foram detalhados. A vantagem desses estudos é que, para a maior parte dos ensaios, equipamentos e condições de trabalho similares (Tabela 3.1) foram aplicados. Nestes trabalhos, os autores usaram apenas pó magnético-abrasivo de forte ligação.

Tabela 3.1 – Parâmetros de processo fixos usados por Shinmura et al., 1984.

Parâmetro	Valor
Velocidade de corte	29 m/min
Entreferros	1,5 mm
Intensidade de fluxo magnético (B)	1,2 T
Tempo	4 min
Quantidade de PMA (massa)	6 g
Tipo do PMA	Forte ligação, granulometria não informada
Frequência de vibração	0-15 Hz
Amplitude de vibração	1,5 mm
Peça	Aço laminado SS41
Rugosidade Inicial	1,1 $\mu$ m Rmax

Os autores estudaram as características do acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo em função da densidade de fluxo magnético ( $B$ ) na zona de usinagem, comprimento do entreferro, e vibração aplicada ao dispositivo. Os resultados obtidos mostram que um aumento na dimensão do entreferro causa tanto queda na remoção de material quanto piora no acabamento superficial. Quanto à densidade de fluxo magnético, o aumento é associado, inicialmente, a maior remoção de material e melhora no acabamento superficial. Porém, os resultados experimentais mostram, respectivamente, pontos de máximo e mínimo na faixa que vai de 1,2 a 1,4 T, apresentando, a partir de então, queda no desempenho. É importante ressaltar que, uma vez que as dimensões do entreferro estão intimamente ligadas ao fluxo magnético (equações 2.8 a 2.11), a variação isolada do primeiro parâmetro causa, através da

alteração da relutância magnética do sistema, um efeito inversamente proporcional no segundo.

Outros testes foram realizados, a fim de avaliar a influência dos parâmetros de vibração sobre os resultados finais do processo. O aumento, tanto na amplitude quanto na frequência de vibração, gerou uma tendência forte de crescimento nas curvas de remoção de material (Figura 3.1, adaptada de Shinmura et al., 1984), e melhora no acabamento superficial. A Figura 3.2 (adaptada de Shinmura et al., 1984) indica a influência da aplicação de vibração, através da comparação entre dois ensaios, com frequências de zero e 15 Hz. Observa-se que tanto a remoção de material quanto a rugosidade são afetadas, com a primeira apresentando um aumento na taxa de remoção (maior inclinação da curva que relaciona remoção de material com tempo de usinagem), e a segunda um deslocamento da curva para baixo.

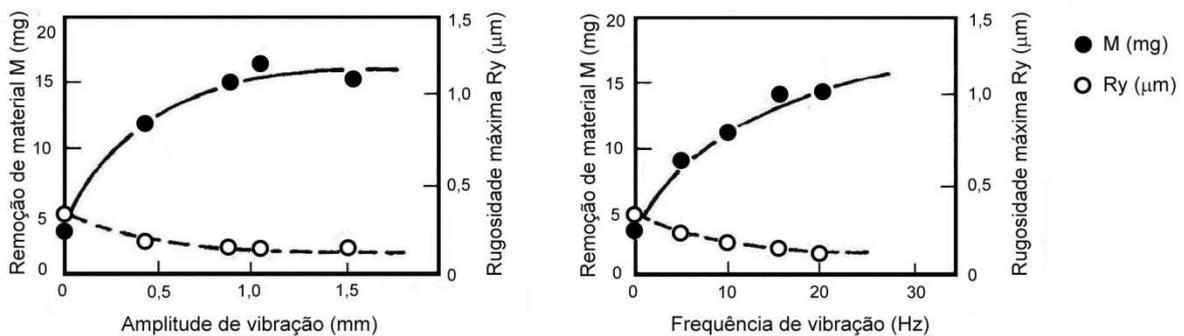


Figura 3.1 – Influência dos parâmetros de vibração no acabamento superficial.

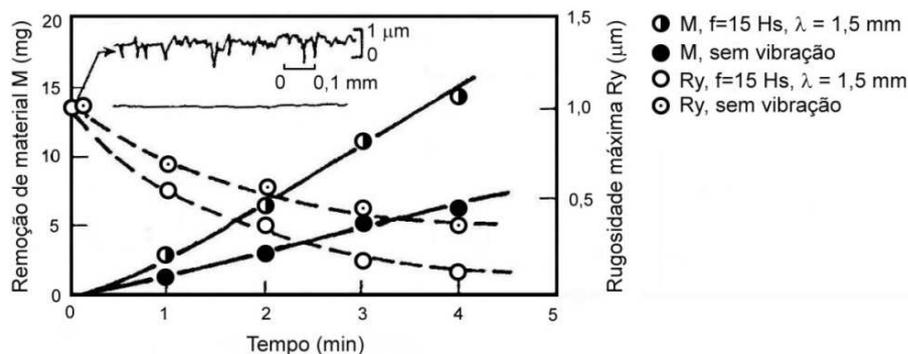


Figura 3.2 – Influência da vibração no acabamento magnético-abrasivo.

Os autores consideram que a melhora das características de acabamento observadas na presença de vibrações mecânicas se deve a dois fatores, a saber:

1. aumento da distância efetiva percorrida por cada partícula abrasiva por unidade de tempo e da velocidade de corte efetiva relacionada;
2. efeito de acabamento multi-direcional.

Shinmura, 1989, ao realizar experimentos com parâmetros de processo e equipamento diferentes, encontrou um comportamento semelhante para a remoção de material, sem no entanto observar diferenças estatisticamente significativas entre as curvas de rugosidade em função do tempo obtidas com e sem vibração, o que fornece indicação da interdependência (interação) entre os diferentes parâmetros de processo.

Posteriormente, Shinmura et al., 1985, avaliaram a aplicabilidade do acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo na remoção de rebarbas de torneamento e retificação, concluindo que a eficiência do processo depende fortemente da direção da rebarba a ser removida. Quando esta está alinhada com o sentido de vibração, o processo se comporta de forma eficiente. Os resultados mostraram ainda a eficácia do processo no arredondamento de arestas, o que se deve, segundo os autores, ao efeito de borda, que causa um aumento na concentração da densidade de fluxo magnético próximo a cantos vivos.

A influência da adição de fluido de corte, em pequenas proporções, ao pó magnético abrasivo foi avaliada por Shinmura et al., 1986. Em comparação com os resultados obtidos com elemento aglutinante, verificou-se melhora no desempenho no que diz respeito à remoção de material, porém, com pior acabamento superficial (Figura 3.3, Shinmura et al., 1986). Os resultados obtidos para diversos fluidos (óleo leve, emulsão e óleo puro para retificação) mostram pouca diferença entre si, com maior taxa de remoção de material para o pó magnético-abrasivo preparado com óleo puro, seguido pelo que contém óleo leve e emulsão, respectivamente. Os resultados de rugosidade, apesar de semelhantes, mostraram tendência inversa ao observado para a remoção de material.

Dentre os pós magnético-abrasivos preparados com fluidos de corte (conforme descrito pelos autores), o que se mostrou menos eficiente em termos de taxa de remoção de material foi o com adição de ácido esteárico sendo, porém, o que permitiu a obtenção de melhor acabamento superficial, ainda assim pior do que o atingido sem o uso de fluido de corte. Este comportamento diferente é consequência de, à temperatura ambiente, o ácido esteárico se apresentar na forma de cristais, atingindo seu ponto de fusão na temperatura de 71,5°C, não atingida no intervalo de tempo testado pelos autores. Durante uma usinagem mais longa, devido ao aumento de temperatura, o desempenho do pó magnético abrasivo contendo este material mostra uma forte melhora, uma vez que o elemento acaba por se fundir.

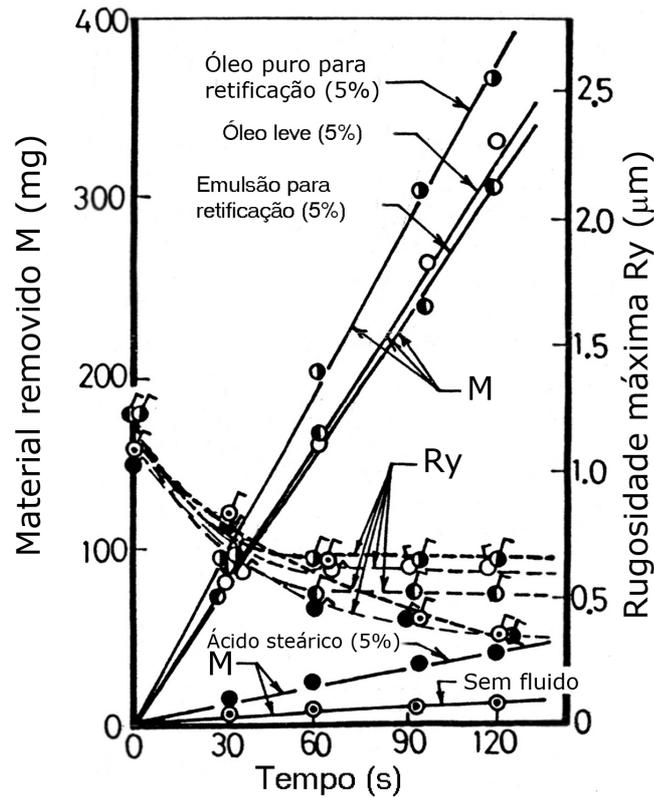


Figura 3.3 – Efeito da adição de diferentes elementos aglutinantes no acabamento magnético-abrasivo.

Ao analisar o efeito da quantidade de elemento lubrificante sobre o acabamento resultante do processo (Figura 3.4), os autores observaram um aumento na taxa de remoção de material, que cresce expressivamente após a adição de 5% em massa de óleo. O salto observado na remoção de material entre os percentuais de óleo de 2,5 e 5%, identificado pela diferença na declividade das curvas, é detalhado na Figura 3.5, que ilustra a taxa de remoção de material após dois minutos de usinagem. O acabamento superficial apresenta curvas exponenciais decrescentes (Figura 3.4), conforme observado por outros autores [Chang et al., 2002, Jain et al., 2001, Amorim e Lorini, 2007]. Porém, a influência da adição de diferentes quantidades de óleo lubrificante sobre este parâmetro fornece resultados menos convencionais. A Figura 3.5 mostra que, para um intervalo de tempo de dois minutos de usinagem, a rugosidade, que apresenta queda até a adição de 2,5% de óleo ao PMA, aumenta expressivamente quando esta proporção atinge 5% em massa, mantendo-se então constante.

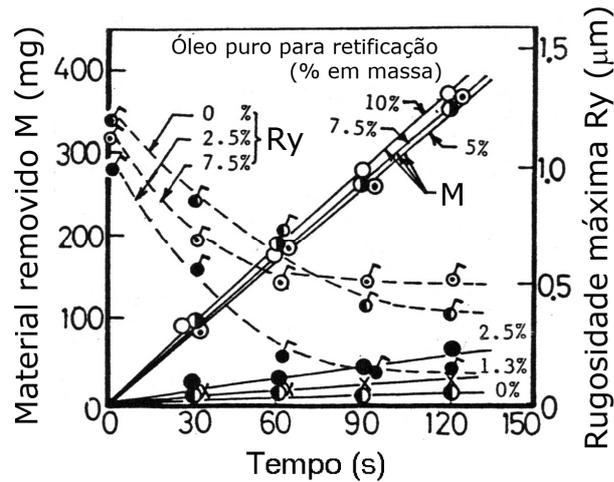


Figura 3.4 – Efeito do tempo de usinagem sobre o acabamento superficial e remoção de material obtidos com a adição de diferentes quantidades de óleo ao PMA.

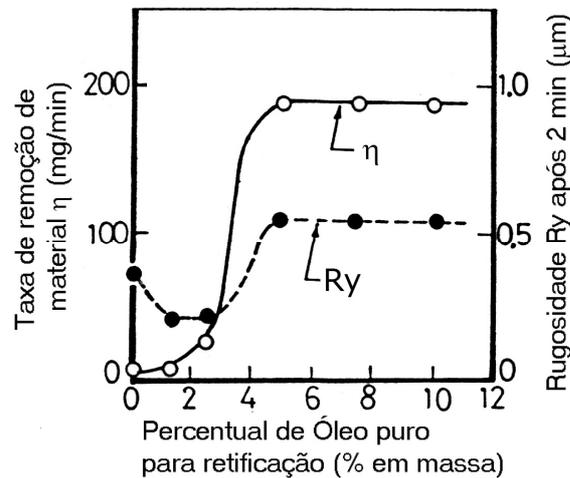


Figura 3.5 – Efeito da quantidade de óleo adicionado ao PMA sobre o acabamento superficial e a remoção de material obtidos após 2 min.

O efeito da adição de lubrificante sobre as propriedades magnéticas do pó magnético-abrasivo foi avaliado de forma indireta com o uso de um dispositivo [Shinmura et al., 1985] que, através da aplicação de um campo magnético sobre a mistura compactada, permite avaliar a pressão exercida por esta sobre uma célula de carga.

Os resultados obtidos com o uso de diferentes óleos em diferentes concentrações em função da densidade de fluxo magnético são apresentados pela Figura 3.6 [Shinmura et al., 1984]. Após a zona na qual ocorre a inflexão das curvas (acima de 0,5 T), maiores valores de pressão foram medidos para a mistura contendo 2 % de óleo puro para retificação, seguidos pelas curvas referentes aos pós magnético-abrasivos sem adição de fluido de corte, com adição de 5 % de óleo leve e 5 % de óleo puro para retificação.

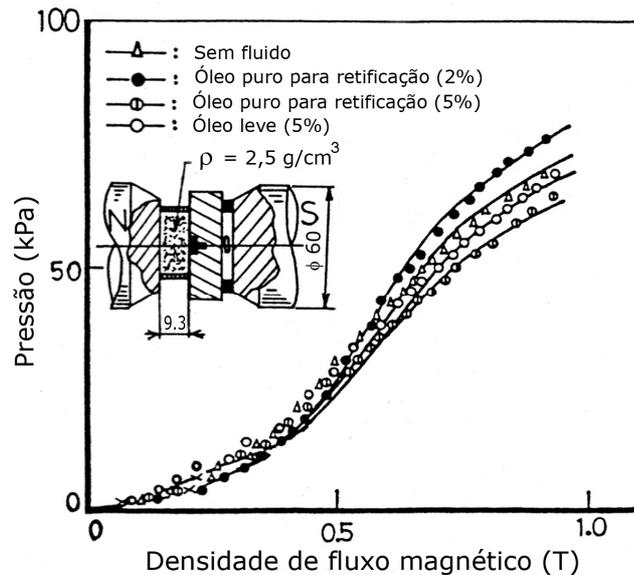


Figura 3.6 – Relação entre a densidade de fluxo magnético aplicada e a pressão exercida pelo PMA com diferentes elementos aglutinantes.

Os autores concluíram não haver forte dependência entre o tipo e quantidade de fluido de corte misturado ao pó magnético-abrasivo sobre a pressão aplicada, preferindo atribuir os efeitos mostrados na Figura 3.4 a outros fatores, entre os quais uma maior agitação da escova magnética flexível constatada com o uso de quantidades de fluido de corte maiores que 5 % em massa. Apesar de não ser considerado pelos autores, uma vez que o fluxo magnético no circuito magnético equivalente depende principalmente da relutância do entreferro (equação 2.11), e que as quantidades de fluido adicionadas dificilmente causariam alterações significativas nesta grandeza em comparação com o ferro presente na mistura, estes resultados devem ser interpretados de forma criteriosa. Através da análise das curvas a partir do ponto de inflexão, há uma redução na pressão (em consequência de uma provável variação da permissividade magnética da mistura, relacionada à espessura do filme lubrificante), quando ocorre o aumento na quantidade de fluido e também quando se aumenta a viscosidade deste.

O mecanismo através do qual ocorre o aumento na remoção de material com a adição de elementos lubrificantes não foi abordado em profundidade pelos autores. Foi observado, ainda, um aumento na força tangencial, o que sugere maior resistência das partículas ao rolamento. Os autores explicam o aumento na força tangencial através de micrografias da superfície usinada com e sem adição de óleo, estando, na primeira, evidentes os sulcos profundos deixados pelos abrasivos. Porém, ambos os fatos (aumento na força tangencial, sulcos mais profundos) são efeitos, e não causas. Os mais prováveis causadores deste efeito são o aumento na adesão das partículas magnético-abrasivas (PMA de forte ligação), devido à adição dos fluidos, e a força de cisalhamento viscosa. Porém, uma vez que as propriedades

dos elementos adicionados não foram mencionadas no texto, não é possível inferir conclusões mais aprofundadas.

Em estudo publicado em 1987, Shinmura et al. avaliam o impacto de diferentes granulometrias de pó de ferro e alumina, usados na mistura do pó magnético-abrasivo, sobre a taxa de remoção de material e o acabamento superficial dos componentes usinados. Os resultados obtidos mostram que o uso de grãos mais finos, tanto magnéticos quanto abrasivos, permite melhores acabamentos superficiais. Em contrapartida, pós mais grosseiros resultam em peças com acabamentos superficiais piores e, no caso do grão magnético, maior taxa de remoção de material.

Chang et al., 2002, avaliaram diferentes granulometrias de pós abrasivos (SiC) e ferromagnéticos, obtendo resultados que concordam parcialmente com os de Shinmura et al, 1987. Segundo os autores, quanto menores as partículas abrasivas, melhor o acabamento obtido, com menor remoção de material. Porém, no que diz respeito ao pó ferromagnético, observa-se tanto melhor acabamento, quanto maiores taxas de remoção de material para partículas de elevada granulometria. Uma maior taxa de remoção de material é explicada pela força magnética exercida sobre a partícula, que tende a ser proporcional ao seu volume (equações 2.33 e 2.34). Desse modo, grãos maiores estão menos sujeitos ao rolamento, removendo mais material. Quanto ao efeito do pó ferromagnético sobre o acabamento superficial, maiores partículas deixam, entre si, maiores vacâncias, que são, então, preenchidas por uma quantidade maior de partículas abrasivas. Assim, apesar da força atuante sobre cada grão ferromagnético ser mais elevada, a maior quantidade de abrasivo faz com que uma pressão menor seja aplicada por aresta de corte, o que resulta em sulcos menos profundos. Os autores alertam que este efeito ocorre somente até um limite, após o qual maiores partículas ferromagnéticas tendem a aumentar a remoção de material, porém, piorando o acabamento superficial.

Os autores ainda comparam, sob condições de operação idênticas, pós ferromagnéticos constituídos de ferro e aço, observando que, apesar do comportamento se manter (melhor acabamento e maior remoção de material para maiores partículas ferromagnéticas, melhor acabamento e menor remoção de material para menores partículas abrasivas), a eficiência aumenta significativamente ao substituir o primeiro pelo segundo. Isto se deve a três vantagens do pó de aço sobre a limalha de ferro:

1. maior dureza do pó de aço, o que faz com que atue também como abrasivo, no acabamento de peças de menos dureza;

2. menor rolamento, devido ao formato poliédrico do aço, em comparação com o formato arredondado do pó de ferro;
3. devido à maior ocorrência de faces planas no pó de aço, ocorre uma distribuição mais homogênea da pressão de corte sobre a peça, sobre uma área efetiva maior.

Os resultados obtidos com pó magnético-abrasivo composto por aço foram tão superiores aos obtidos com pó de ferro que os autores avaliaram o desempenho de pó de aço puro, a fim de identificar sua contribuição no acabamento e na remoção de material (Figura 3.7, adaptada de Chang et al., 2002). Os testes mostraram que o pó de aço puro é tão efetivo quanto o pó magnético-abrasivo constituído por partículas ferromagnéticas de igual granulometria e o pó abrasivo mais fino (1,2  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio) para a obtenção de acabamento superficial, e mais eficiente na remoção de material. Em comparação com o pó magnético-abrasivo com adição do abrasivo de granulometria mais grosseira (5,5  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio), o acabamento superficial foi superior, porém, com menor remoção de material. Considerações podem ser feitas em relação ao efeito do tempo de usinagem sobre o acabamento superficial e a remoção de material. Apesar da tendência de remoção contínua de material, após os primeiros cinco minutos.

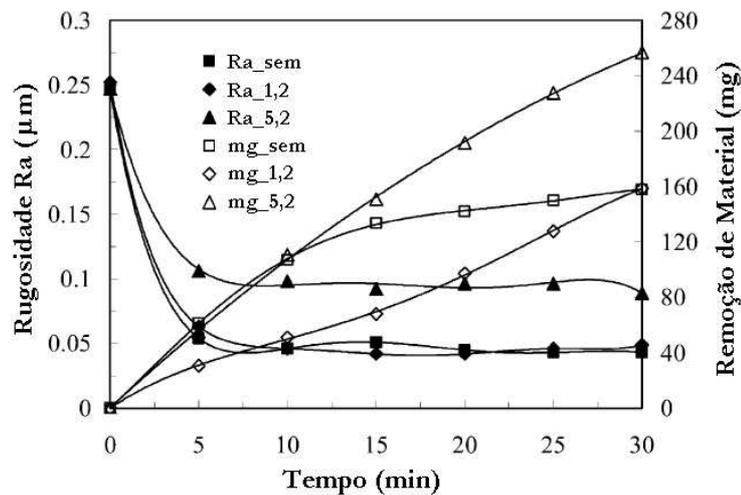


Figura 3.7 – Rugosidade e remoção de material em função do tempo com e sem pó abrasivo.

Os autores relatam ainda a ocorrência de um fenômeno no qual ocorre concentração de partículas nas saídas dos entrefeitos (Figura 3.8, adaptado de Chang et al., 2002), apenas nos ensaios realizados com o pó abrasivo mais fino. Este fenômeno é atribuído ao fato das partículas abrasivas, com maior superfície efetiva, envolverem mais facilmente as partículas magnéticas, resultando em perda de coesão devido ao menor contato metal-metal.

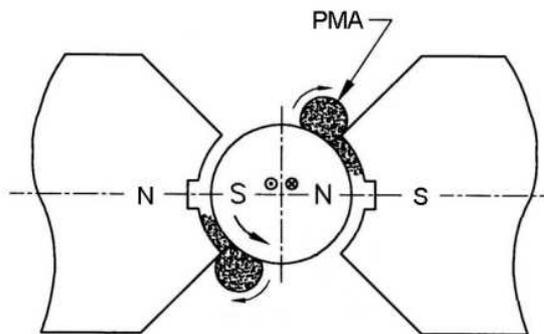


Figura 3.8 – Rolamento do pó magnético abrasivo.

Avaliando de forma comparativa o efeito do acabamento magnético abrasivo cilíndrico em peças de diferentes durezas (HRC 61 e HRC 55), Chang et al., 2002, obtiveram melhores acabamentos superficiais para o aço de maior dureza, explicados pela maior incidência de rolamento das partículas magnéticas na usinagem de materiais menos duros. Isto porque, nestes materiais, ocorre maior penetração das partículas (tanto magnéticas quanto abrasivas), acarretando maior resistência ao corte. Como nos materiais de maior dureza a penetração das partículas (neste caso somente as abrasivas, de maior dureza) é menor, tanto a resistência ao corte, responsável pela rotação das partículas, quanto a profundidade dos sulcos acabam por ser menores. Além disso, uma vez que a limalha de aço não possui a mesma capacidade de corte no material de maior dureza, esta deixa o caminho livre para que a capacidade abrasiva das partículas de SiC possa se desenvolver completamente.

Os autores também observam que, para o aço de maior dureza, o acabamento magnético-abrasivo cilíndrico usando apenas limalha de aço remove menos material que no processo com pó magnético-abrasivo, alcançando, porém, acabamento superficial similar. Em relação às propriedades do material usinado, afirmam que o processo deixa pouca ou nenhuma camada deteriorada na superfície, comprovado através da avaliação da micro-dureza *Vickers* antes ou depois do acabamento magnético-abrasivo. Porém, o aumento na quantidade de silício na superfície das peças, proveniente do pó abrasivo utilizado (SiC), acarreta queda na resistência a corrosão na camada superficial da peça, não afetando seu interior devido à baixa temperatura observada durante o processo, insuficiente para difusão de material.

Jain et al., 2001, avaliaram a influência dos parâmetros de processo (velocidade tangencial e dimensão do entreferro) sobre a remoção de material e o acabamento superficial dos componentes testados, verificando que, quanto mais alta a rotação, e quanto menor o entreferro, melhor o acabamento superficial e maior a remoção de material. Os autores verificam, porém, que esta regra não é constante: com entreferros pequenos, observa-se um

fraco desempenho do processo, que melhora conforme a ferramenta se afasta da peça. Esta melhora se dá até uma distância a partir da qual o comportamento se inverte, e é explicada devido a pouca capacidade de renovação do pó magnético-abrasivo usando entreferros de pequena dimensão. Neste caso, como a densidade de fluxo magnético é muito alta, somada ao pequeno espaço para movimentação das partículas, as partículas abrasivas gastas não têm meios de sair da área de corte e dar lugar a outras mais afiadas, diminuindo a eficiência do processo.

Os autores ainda sugerem, no tocante à velocidade tangencial, que a melhor eficiência observada a altas rotações se deve apenas ao fato das partículas percorrerem uma distância maior no mesmo intervalo de tempo, verificando-se uma tendência de queda no acabamento superficial a altas rotações. Isto é explicado pelos autores devido ao desgaste acelerado sofrido pelas partículas, e pelo seu tempo de renovação, que continua sendo o mesmo, de modo que, apesar de se desgastar mais rápido, o pó magnético-abrasivo é repostado com a mesma frequência.

Kremen et al., 1994, estudaram a aplicação do acabamento magnético-abrasivo cilíndrico a peças com erros de forma conhecidos, visando obter uma expressão que estime o tempo necessário para atingir a tolerância desejada. Os autores observaram que, assim como acontece no acabamento superficial, o erro de circularidade apresenta maior tendência de redução nos minutos iniciais de usinagem. Testes em acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo (Figura 3.9, adaptada de Kremen et al., 1994) e interno realizados, com diferentes configurações e aparatos, confirmam esta tendência mesmo sob condições diversas.

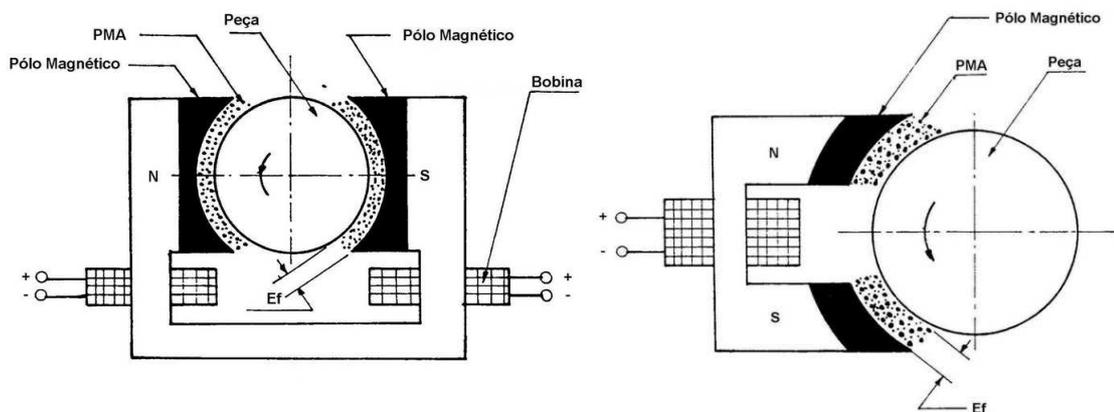


Figura 3.9 – Aparatos experimentais.

A estimativa do tempo necessário para conferir a tolerância desejada é dada pela “lei da mudança de formas geométricas em sólidos”, desenvolvida por Kremen et al., 1985, que

estabelece que os erros de circularidade de uma peça cilíndrica usinada com o acabamento magnético-abrasivo seguem uma queda hiperbólica, dada pela equação 3.1:

$$\phi(t) = \frac{\Delta p(t)}{\Delta \omega} = \frac{1}{(1 + \alpha t)^\beta} \quad (3.1)$$

onde  $\phi(t)$  é o erro normalizado no instante de tempo  $t$ ,  $\Delta p(t)$  é o erro de circularidade medido no instante  $t$ ,  $\Delta \omega$  é o erro inicial, e  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes determinadas experimentalmente. Tanto  $\alpha$  quanto  $\beta$  dependem da dureza e dimensões da peça em usinagem, das propriedades do pó magnético-abrasivo e da intensidade do campo magnético, sendo menores para materiais duros e na presença de campo magnético de baixa intensidade. Os autores concluem que o uso do acabamento magnético-abrasivo na obtenção de menores erros de circularidade em peças cilíndricas submetidas ao processo é viável, e que, segundo a “lei da mudança de formas geométricas em sólidos”, estes irão eventualmente chegar a um valor nulo.

Em estudo posterior, Kremen et al., 1996, analisam o mecanismo de remoção de material envolvido no acabamento magnético-abrasivo cilíndrico. Através da análise dos esforços envolvidos (Figura 3.10a), propõe a equação 3.2, que relaciona a força de corte a outras aplicadas às partículas do pó magnético-abrasivo e ao ângulo de corte. Assumindo que os esforços referentes à ação do campo magnético e ao atrito permanecem constantes durante o corte, a única componente a sofrer variação durante o corte é o ângulo  $\alpha$ .

$$F_c = \sqrt{F_n^2 (1 + \mu^2) + F_m^2 + 2F_m F_n (\mu_{at} \cos \alpha - \text{sen } \alpha)} \quad (3.2)$$

onde  $F_c$  é a força de corte,  $F_m$  a força magnética sobre a partícula,  $F_n$  a força normal, e  $\mu_{at}$  o coeficiente de atrito. A eq. 2.16 sugere que quanto menor o ângulo de corte, maior a força de corte exercida pela partícula. Desse modo, de acordo com a Figura 3.10 b, próximo aos vales,  $F_c$  é mínima, aumentando gradativamente, até chegar a um valor máximo no ponto onde o ângulo  $\alpha$  é mínimo (equação 3.3).

$$\alpha \text{ min} = \frac{\lambda}{2A} \quad (3.3)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda das irregularidades e  $A$  a sua altura média. Após passar pelo ponto onde  $\alpha$  é mínimo, o ângulo de corte aumenta novamente, fazendo com que a força de corte volte a cair, até que esta atinja um valor mínimo da crista de cada

imperfeição. Este mecanismo sugere que as maiores taxas de remoção de material, devido aos maiores esforços, ocorram mais próximos dos picos que dos vales, de modo que, quanto maiores os picos (superfícies mais rugosas), maior a taxa de remoção de material, explicando a rápida convergência dos valores encontrados pelos autores nos minutos iniciais de usinagem.

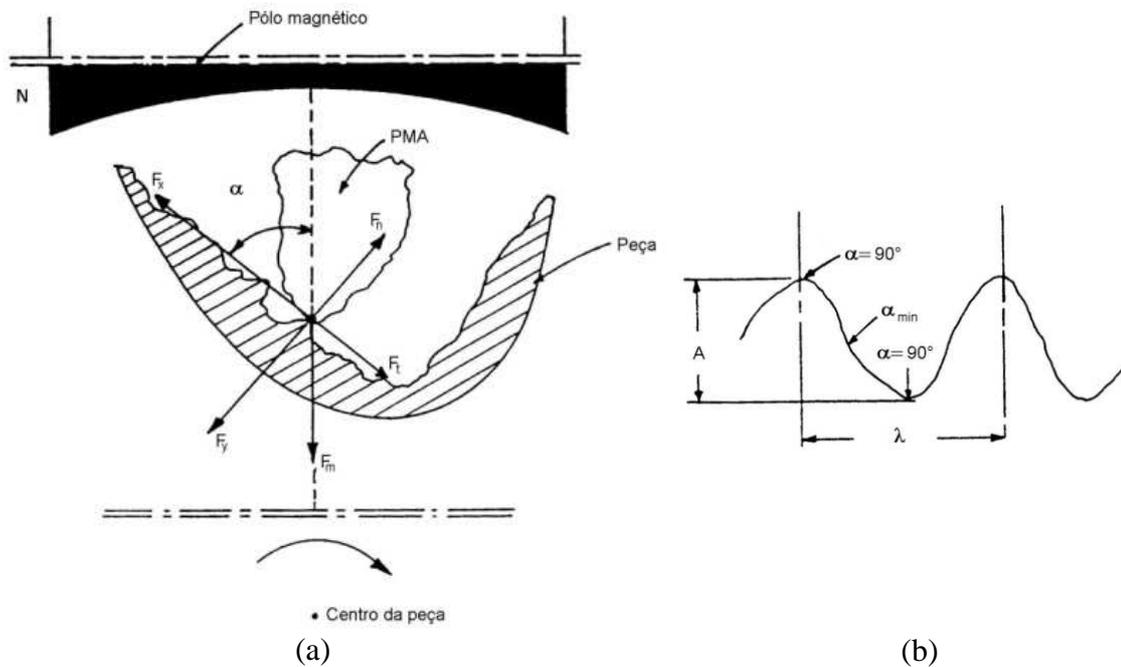


Figura 3.10 – Esforços envolvidos no corte (a); ângulo de corte entre picos e vales (b).

Estudos foram feitos no sentido de prever o comportamento de uma superfície submetida ao acabamento magnético-abrasivo. Kim e Choi, 1995, desenvolveram um modelo baseado nos estudos de Shinmura et al., 1984-1989, através do qual é possível prever, com relativa exatidão, a pressão de corte existente entre a superfície em trabalho e os abrasivos (equação 3.4), além da quantidade de material removido (equação 3.5) e do acabamento superficial (equação 3.6) obtido em função do tempo de processamento.

$$P = \mu_0 \frac{H_a^2}{4} \cdot \frac{3\pi(\mu_r - 1)w}{3(2 + \mu_r) + \pi(\mu_r - 1)w} \quad (3.4)$$

$$M = \left( C \frac{nN\Delta fvt}{H_{mi} \pi \tan \theta_\beta l_w} \right)^{1/2} (Ra^0)^{-1/4} \quad (3.5)$$

$$Ra = Ra^0 - C(Ra^0)^{-1/8} (l_w)^{-5/4} \left( \frac{nN\Delta fvt}{H_{mt} \pi \tan \theta_\beta L_w} \right)^{1/4} \quad (3.6)$$

Onde  $\mu_r$  é a permeabilidade relativa do ferro puro,  $w$  a razão, em volume, de aço em uma partícula magnético-abrasiva (apesar de não especificado pelos autores, as características do estudo levam a crer que foi usado pó magnético-abrasivo de forte ligação),  $H_a$  a intensidade do campo magnético no entreferro,  $H_{mt}$  a dureza do material em trabalho,  $n$  o número de arestas de uma partícula magnético-abrasiva agindo simultaneamente,  $N$  o número de partículas magnéticas em contato com a superfície,  $v$  a velocidade relativa das partículas magnético-abrasivas,  $\Delta f$  a força aplicada por uma aresta cortante,  $t$  o tempo de processamento,  $l_w$  ao comprimento da peça submetido ao acabamento magnético-abrasivo,  $\theta_\beta$  corresponde à metade do ângulo de cunha das arestas abrasivas e  $K$  uma constante determinada experimentalmente.

Os autores ainda sugerem a existência de um valor crítico de rugosidade, a partir do qual a aplicação do acabamento magnético-abrasivo não gera melhora no acabamento superficial. Este valor se baseia na penetração das arestas de corte das partículas abrasivas submetidas a determinada pressão pelo campo magnético, equação 3.7:

$$\delta_{crit} = \frac{1}{\tan \theta} \sqrt{\frac{\Delta f}{H_{mt} \pi}} \quad (3.7)$$

Onde  $\delta_{crit}$  é a penetração máxima da aresta cortante de ângulo  $2\theta$ .

Jain et al., 2006, obtiveram concordância entre valores numéricos e experimentais ao desenvolver e otimizar, através da aplicação de algoritmos genéticos, um modelo baseado nos estudos de Kim e Choi, 1995 (equação 3.8).

$$\Delta Ra = \left[ \frac{9 \times 10^3 K_{maf} K_3^2 A_{ar} l_m \mu_0}{8 \pi H_w L_w^2 \tan \theta} \right] \times \left( \frac{v_{ma} t_f}{d_{ma}} \right) \times \left( \frac{w_f I^2}{K_2 + w_f} \right) (\mu m) \quad (3.8)$$

onde  $L_w$  é o comprimento da peça submetido ao acabamento magnético-abrasivo,  $K_{maf}$  uma constante de proporcionalidade, dependente do número de restrições,  $A_{ar}$  é a seção reta do entreferro,  $l_m$  o comprimento do magneto,  $v_{ma}$  a velocidade relativa entre a peça e a escova magnética flexível,  $H_w$  a dureza do material da peça,  $d_{ma}$  o diâmetro médio das partículas

magnético-abrasivas,  $t_f$  o tempo de acabamento,  $w_f$  a proporção de material ferromagnético presente no pó magnético-abrasivo,  $I$  a corrente aplicada ao eletroímã, e  $K_2$  e  $K_3$  são definidos de acordo com as equações 3.9 e 3.10, na qual  $\mu_{rf}$  representa a permeabilidade magnética relativa do material ferromagnético presente no pó magnético-abrasivo,  $\mu_{em}$  a mesma grandeza para o magneto e  $A_M$  a área de sua seção reta.

$$K_2 = \frac{3(\mu_{rf} + 2)}{\pi(\mu_{rf} - 1)} \quad (3.9)$$

$$K_2 = \frac{nc}{A_{ar} \left( \frac{l_{ar}}{A_{ar}} + \frac{1}{\mu_{em}} \frac{l_M}{A_M} \right)} \quad (mm^{-1}) \quad (3.10)$$

### 3.2 Equipamentos desenvolvidos

Considerando-se que o acabamento magnético-abrasivo é um processo de fabricação não-convencional de utilização restrita principalmente ao ambiente acadêmico, com limitada aplicação industrial até o presente momento, a pesquisa neste campo requer o projeto e fabricação do equipamento necessário. Enquanto certos autores realizam adaptações em dispositivos preexistentes [Jain et al., 2001, Shinmura, 1984 e 1989], outros desenvolvem aparato experimental completo.

A Figura 3.11 mostra o equipamento desenvolvido por Jain et al., 2001. Este equipamento, composto por uma base móvel que contém os eletroímãs e o dispositivo gerador de vibração, possui um funil, no qual o pó magnético-abrasivo é estocado. A renovação do elemento consumível é feita em intervalos de tempo pré-definidos, através da interrupção periódica da corrente de alimentação dos eletroímãs. Este aparato experimental é afixado no carro móvel de um torno mecânico, permitindo seu movimento ao longo da peça em usinagem, presa à placa.

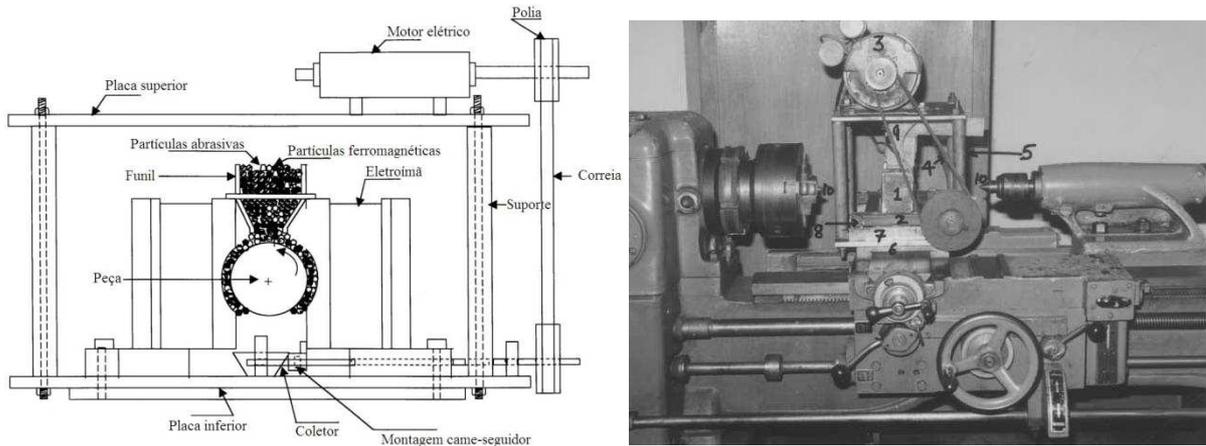


Figura 3.11 – Diagrama esquemático do dispositivo desenvolvido por Jain et al., 2001 (a); dispositivo instalado em um torno mecânico (b).

Chang, 2002, desenvolveu dois diferentes aparatos experimentais, com o objetivo de estudar o acabamento magnético abrasivo (Figura 3.12) e uma variação deste processo de fabricação, chamada acabamento magnético-abrasivo eletrolítico (Figura 3.13). Em ambos os casos, o objetivo foi realizar acabamento cilíndrico externo. Estes aparatos diferenciam-se dos demais por não utilizar um torno mecânico para aplicar a rotação à peça em trabalho, e sim um redutor ligado a um motor de indução. Este redutor, situado sobre um barramento, sofre vibração no sentido do eixo da peça através de um motor de indução, conectado por um came. A peça em trabalho é fixada a uma placa, passando entre os pólos do eletroímã.

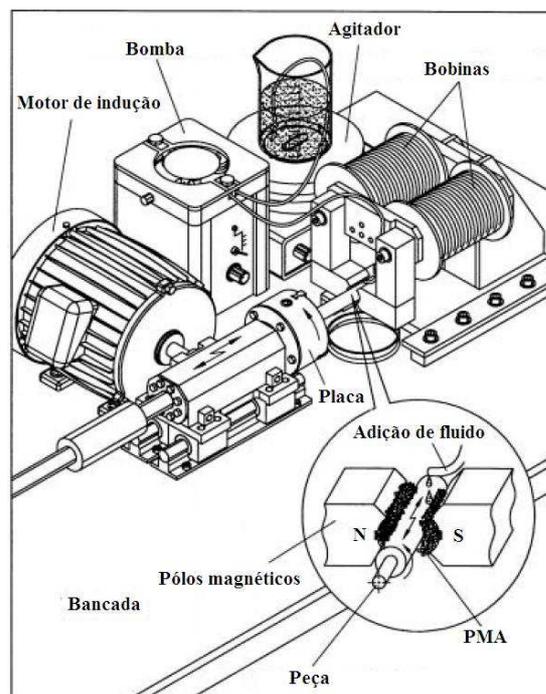


Figura 3.12 – Aparato experimental desenvolvido por Chang, 2002.

A Figura 3.12 ilustra o equipamento usado na execução do acabamento magnético-abrasivo. Um detalhe a respeito deste equipamento é que ele fornece material abrasivo, durante o processo mecânico, através do gotejamento de uma mistura de óxido de alumínio e um fluido (água destilada) sobre a escova magnética flexível. O aparato experimental usado na execução do acabamento magnético-abrasivo eletrolítico é mostrado na Figura 3.13. Nesta variação do processo, o uso de um eletrólito, aliado à aplicação de uma diferença de potencial, permite a remoção eletroquímica de material, além da abrasiva.

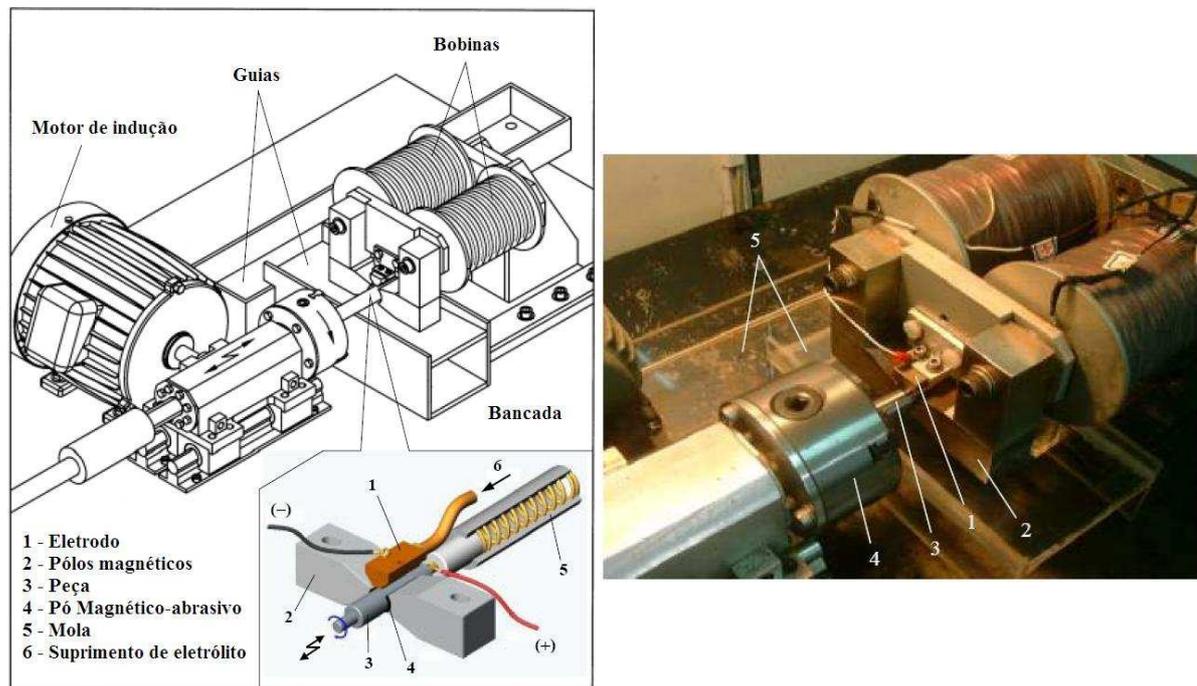


Figura 3.13 – Aparato experimental para o acabamento magnético-abrasivo eletrolítico.

Shinmura, 1984 e 1987, desenvolveu dois diferentes equipamentos para a execução do acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo, ambos adaptáveis ao barramento de um torno mecânico: no primeiro (Figura 3.14), foi usado um eletroímã para gerar o campo magnético e um excitador eletromagnético para gerar a vibração necessária, enquanto o segundo (Figura 3.15) foi desenvolvido com ímãs permanentes, com vibração aplicada por um vibrador pneumático.

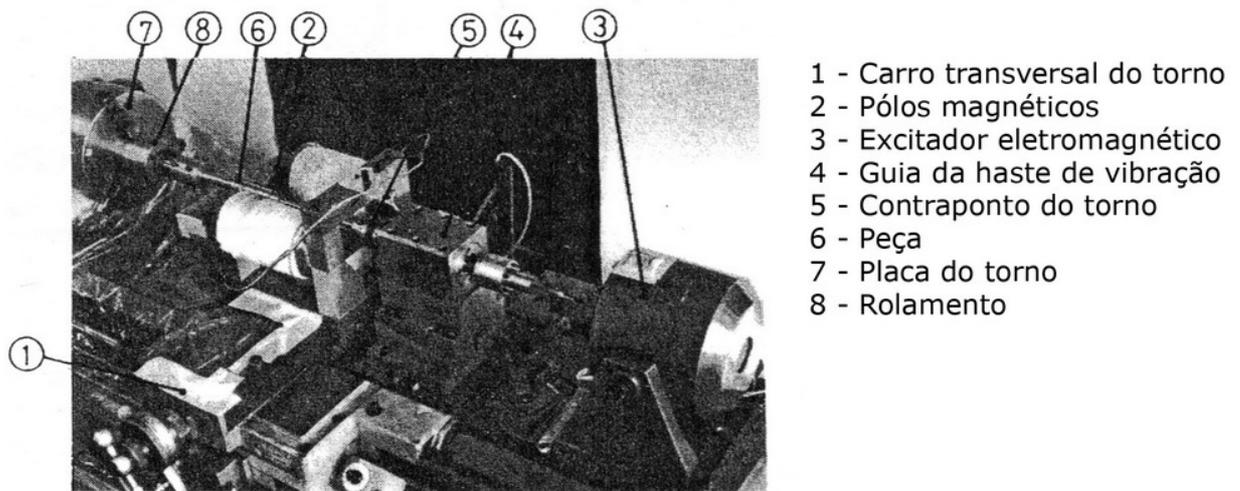


Figura 3.14 – Aparato experimental Desenvolvido por Shinmura et al., 1984.

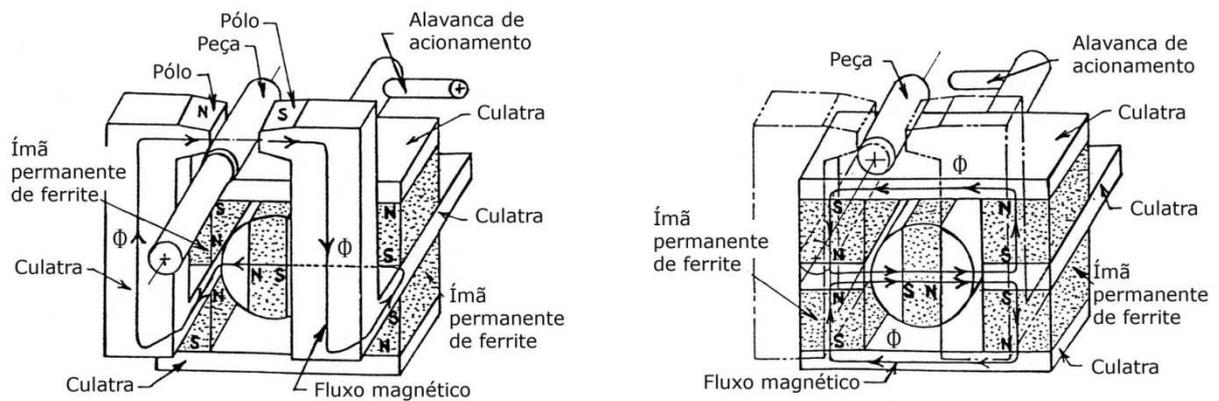


Figura 3.15 – Aparato experimental constituído por ímãs permanentes (Shinmura et al., 1989).

A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros de processo utilizados em diversos estudos envolvendo o processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo. A análise dos dados apresentados mostra que os parâmetros de projeto utilizados variam tanto quanto aos aparatos experimentais desenvolvidos pelos autores.

Tabela 3.2 – Parâmetros de processo.

Parâmetros	Shinmura, 1986	Shinmura, 1989	Jain et al., 2001	Kremen et al., 1993	Chang et al., 2002
Entreferos (mm)	1,5	1	0,4-0,7	1,5	1
B (T)	1,2	1	0-0,35	1,2	0,65
Pó magnético-abrasivo					
Tipo	Sinterizado	Sinterizado	Fraca ligação	pseudo fundido	Fraca ligação
Proporção em massa (Mag/Ab/Lub)	Não informado	Não informado	66,5:28,5:5	Não informado	4:1:0,6
Pó abrasivo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC	SiC
Diâmetro dos grãos abrasivos (mm)	5	5	25,7		1,2-5,5
Pó magnético	Ferro fundido	Ferro fundido	Ferro fundido	Ferro fundido	Aço e ferro fundido
Diâmetro dos grãos ferromagnéticos (mm)	100	120	51,4	300-500	80-180
Quantidade usada	8 g	-	Reposição contínua	-	-
Amplitude de vibração (mm)	1,5	2	1,5	1,5	5
Frequência de vibração (Hz)	15	15	11	10	5
Material avaliado	Aço SS41 (equivalente ao ASTM A569), até 0,15% C	Aço Sk4 (equivalente ao ASTM A569), tratado termicamente (HRC63)	Aço Inoxidável não magnético	Aço baixo carbono	Aço SKD11 (HV 600)
Tempo total de usinagem (min)	4	4	5	21	30
Velocidade de corte (m/s)	0,48	1,5	0,80-1,60	1 - 5	0,4
Fluido	Fluidos diversos	Óleo para retificação, 6% em massa	Óleo Servospin 12 (v = 11-14 cSt a 40 °C)	Fluido à base de água	Óleo SAE30, adição de solução de abrasivos em água destilada

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados aspectos relevantes quanto à realização do trabalho experimental.

### 4.1 Equipamento desenvolvido

O equipamento utilizado no estudo do processo de acabamento magnético abrasivo cilíndrico foi inteiramente desenvolvido no Laboratório de Usinagem e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este equipamento compreende um eletroímã, conectado a uma fonte DC, e um dispositivo móvel para aplicação de vibrações mecânicas com frequência e amplitude controladas.

#### 4.1.1 Eletroímã

O eletroímã utilizado foi desenvolvido por Leonhart e Amorim, 2004, no Laboratório de Usinagem e Automação da UFRGS, com o objetivo de iniciar estudos no campo do acabamento magnético abrasivo. Como limitações, apresentava dificuldades na regulagem do centro e do diâmetro da peça a ser usinada e, devido à sua fixação rígida ao torno, não permitia a aplicação de vibrações. A Figura 4.1 [Leonhart, 2003] mostra as dimensões do núcleo usado no eletroímã, construído em aço ABNT 1020 laminado, com propriedades magnéticas adequadas ao uso.

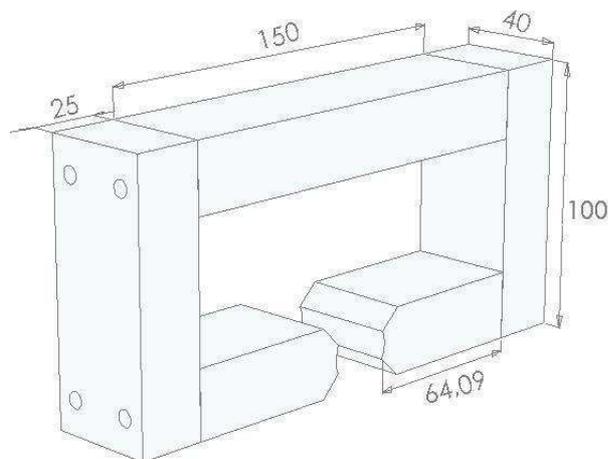


Figura 4.1 – Dimensões do núcleo de ferro.

O dimensionamento da bobina foi feito através do circuito elétrico análogo, considerando um entreferro de 1 mm e uma densidade de fluxo magnético desejável em torno de 0,8 T, valor médio considerado na literatura [Chang et al., 2002, Baron et al., 2001]. A Figura 4.2 [Leonhart, 2004] ilustra o eletroímã (a) e seu circuito elétrico análogo (b), onde  $R_n$ ,  $R_p$ , e  $R_e$  são as relutâncias magnéticas do núcleo, peça e entreferro, respectivamente. Não foram consideradas, no cálculo, as relutâncias de contato entre diferentes partes do núcleo.

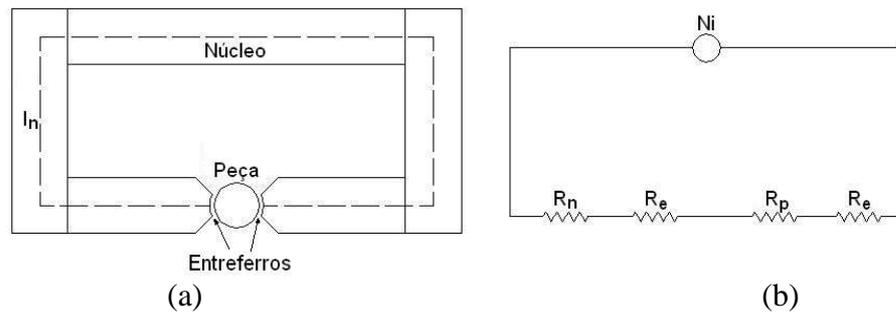


Figura 4.2 – Eletroímã desenvolvido (a); circuito elétrico análogo (b).

A Tabela 4.1 [Leonhart, 2004] mostra as características do eletroímã construído. É importante ressaltar que a densidade de fluxo magnético no entreferro ( $B$ ) pode ser alterada através da variação da corrente e do entreferro.

Tabela 4.1 – Características do eletroímã desenvolvido.

Distância média $l_n$	476 mm
Área da seção do núcleo	1000 mm <sup>2</sup>
Diâmetro interno	24 mm
Relutância do núcleo $R_n$	$74,6 \cdot 10^3$ A.espira/Wb
Relutâncias dos entreferros $R_e$	$3,8 \cdot 10^6$ A.espira/Wb
Relutância do corpo de prova $R_p$	$7,6 \cdot 10^3$ A.espira/Wb
Relutância equivalente $R_{eq}$	$7,68 \cdot 10^6$ A.espira/Wb
Fluxo magnético $\phi$	$3,2 \cdot 10^{-3}$ Wb
Número de espiras $N$	1610
Resistência do enrolamento	4,2 $\Omega$

#### 4.1.2 Equipamento utilizado

O equipamento desenvolvido por Leonhart e Amorim, 2004 foi modificado por Gomes, 2007, a fim de permitir a aplicação de vibrações mecânicas na direção do eixo da peça. Este dispositivo foi também dotado de uma base móvel, que permite sua remoção para ajustes e manutenção. A Tabela 4.2 mostra as características do eletroímã antes e após as adaptações realizadas.

Tabela 4.2 – Características dos eletroímãs usados.

Parâmetro	Original	Modificado
Número de espiras	1610	1610
Distância média (mm)	476	Variável conforme ponteira e ajuste
Área da seção A (mm <sup>2</sup> )	1000	1000
Resistência	4,2 $\Omega$	4,2 $\Omega$
Ponteiras	fixas	Ajustáveis/ intercambiáveis
Distância entre pólos (mm)	24	Variável conforme ponteira
Suporte	Fixo	Móvel
Vibração	Sem	Com

As modificações realizadas no dispositivo original se concentram em duas características desejáveis: versatilidade, visando a aplicação do acabamento magnético abrasivo em diferentes máquinas e peças, e a possibilidade de aplicação de vibrações, permitindo a obtenção de componentes com menor rugosidade e em menores tempos de usinagem. A primeira característica foi atingida através do uso de ponteiras reguláveis e intercambiáveis, que permitem o ajuste do eletroímã à altura do torno e ao diâmetro da peça a ser usinada, e do uso de uma base rígida, sobre a qual é montado o equipamento, permitindo sua remoção para adaptação em diferentes tornos mecânicos sem necessidade de repetir o procedimento de montagem e ajuste. A aplicação de vibração foi possibilitada graças ao desenvolvimento de um sistema de deslocamento unidirecional, composto por mancais e quatro guias lineares, e um sistema atuador, composto por motor, inversor de frequência e um conjunto manivela-biela. O motor usado possui 1/3 CV, e rotação controlada por inversor de frequência. A

Figura 4.3 ilustra o projeto do dispositivo desenvolvido.

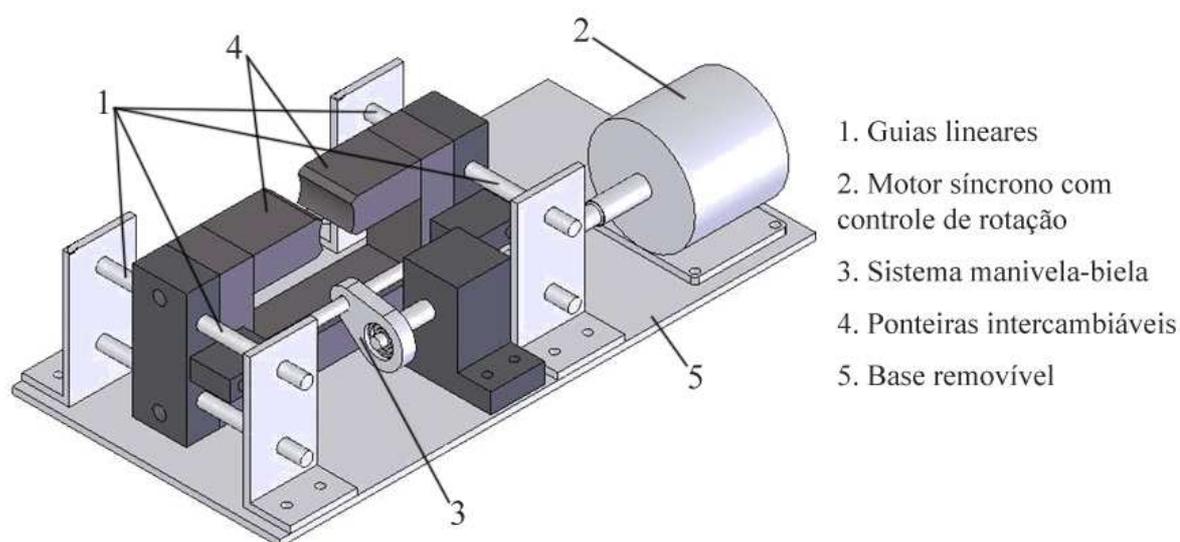


Figura 4.3 – Dispositivo para realização do acabamento magnético abrasivo.

À exceção do motor, do rolamento da biela, dos elementos de fixação, da base e dos suportes das guias lineares, todos os elementos aplicados na adaptação do dispositivo para o eletroímã foram fabricados em materiais não ferromagnéticos.

#### 4.1.3 Determinação da curva de magnetização do eletroímã

O comportamento do sistema eletroímã-peça quando sujeito a uma corrente elétrica é descrito pelas curvas de magnetização e desmagnetização. Estas curvas foram levantadas através do uso de um sensor de efeito *Hall*, posicionado no entreferro, com variação da corrente aplicada através do uso de um reostato ligado em série à bobina, previamente desmagnetizada. A Figura 4.4 ilustra o aparato experimental utilizado.

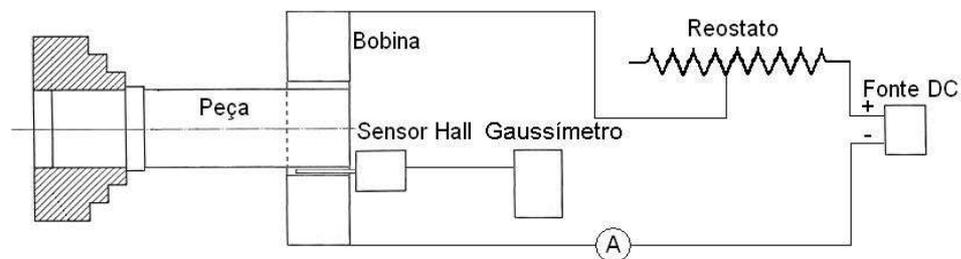


Figura 4.4 – Aparato experimental para a determinação da curva de magnetização do eletroímã.

Devido à espessura do sensor ser maior que o comprimento do entreferro, foi necessário deslocar o centro do eletroímã, aproximando o corpo de prova de um pólo e o afastando do outro. O deslocamento aplicado em relação ao centro foi de 0,05 mm. Uma vez que a distância acrescentada entre o corpo de prova e o pólo magnético onde foi posicionado o sensor de efeito *Hall* equivale à aproximação verificada no entreferro seguinte, não deve haver variação significativa na densidade de fluxo magnético observada.

A Tabela 4.3 mostra a densidade de fluxo magnético medida e o fluxo magnético calculado para as condições de utilização do dispositivo.

Tabela 4.3 – Condições de utilização do eletroímã.

Tensão aplicada	12 V
Corrente aplicada	2,85 A
Densidade de fluxo magnético medida no entreferro	670 mT
Fluxo magnético calculado	$2,90 \times 10^{-3}$ Wb

A Figura 4.5 mostra as curvas de magnetização e desmagnetização obtidas para o eletroímã. Através dos resultados apresentados, é possível obter a densidade de fluxo magnético no entreferro para diferentes condições de operação, além da magnetização residual presente no núcleo.

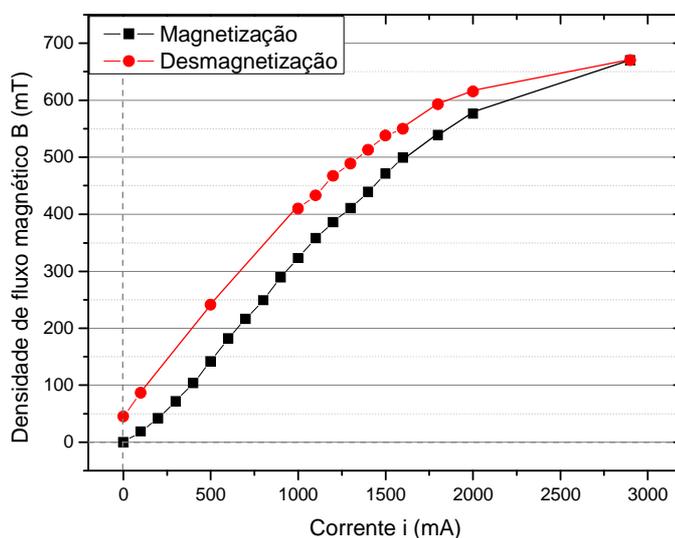


Figura 4.5 – Curvas de magnetização e desmagnetização do eletroímã.

## 4.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental adotado para a análise do efeito de diferentes elementos aglutinantes sobre o processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo foi definido após a realização de ensaios preliminares (APÊNDICE A), nos quais a influência de diversos parâmetros do processo sobre o acabamento superficial dos corpos de prova submetidos ao processo foi avaliada.

Através dos resultados obtidos no APÊNDICE A, foram observadas fortes relações entre o elemento lubrificante utilizado, sua concentração no pó magnético-abrasivo e o acabamento superficial obtido. Ao comparar testes realizados com três diferentes óleos lubrificantes (Figura 4.6), foram encontradas interações positivas, negativas e inexistentes, o que motivou o estudo mais aprofundado da influência deste elemento. Enquanto o óleo multiuso, de baixa viscosidade dinâmica, apresentou bons resultados a altas velocidades de corte e maus resultados a baixas, o uso de óleo automotivo multiviscoso comportou-se de forma contrária, permitindo a obtenção de baixas rugosidades a baixas rotações e altas rugosidades a altas rotações. Por outro lado, o uso de óleo hidráulico, de viscosidade cinemática próxima a 31 cSt a 40 °C, permitiu a obtenção de bons acabamentos superficiais em todas as condições nas quais foi utilizado. A Tabela 4.4 apresenta estes resultados.

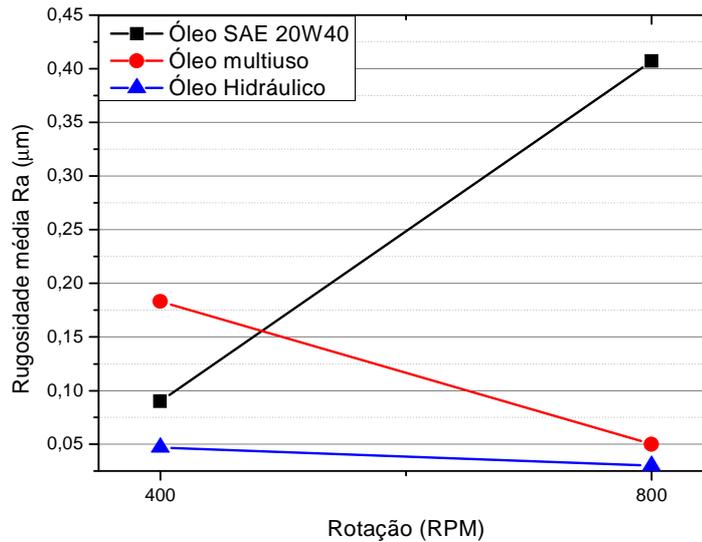


Figura 4.6 – Resultados obtidos para diferentes óleos lubrificantes em função da rotação.

Tabela 4.4 – Resultados preliminares de rugosidade em função do óleo lubrificante e rotação.

Óleo	Classificação	Viscosidade a 40°C (cSt)	Viscosidade a 100°C (cSt)	Ra (µm) 400 RPM	Ra (µm) 800 RPM
Automotivo	SAE 20W40	126 cSt	16,3 cSt	0,090	0,407
Multiuso	-	9,6 cSt	-	0,183	0,050
Hidráulico	Iso VG32	32,1cSt	5,1cSt	0,047	0,030

#### 4.2.1 Elementos aglutinantes testados

Uma vez que os resultados apresentados na Figura 4.6 foram obtidos com o uso de produtos comerciais, contendo elementos e quantidades diversas de aditivos, foi necessária a adoção de condições nas quais as propriedades dos elementos aglutinantes adicionados ao pó magnético-abrasivo pudessem ser avaliadas de forma isolada. Estas condições incluem o teste de óleos básicos, elementos obtidos através do refino de petróleo e sem adição de aditivos.

A Tabela 4.5 mostra a nomenclatura e sigla dos óleos avaliados no trabalho, segundo especificação oficial [ANP, 1999]. Todos os elementos são parafínicos (identificação iniciada pela letra *P*).

Tabela 4.5 – Óleos lubrificantes avaliados experimentalmente.

Óleo	Sigla
Spindle 09	PSP09
Neutro leve 30	PNL30
Neutro médio 55	PNM55
Neutro pesado 95	PNP95
Bright stock 33	PBS33

A caracterização dos óleos avaliados experimentalmente foi executada visando a determinação das características de maior influência no acabamento magnético-abrasivo, que são a viscosidade cinemática e a tensão superficial, responsáveis pela força de adesão entre as partículas magnéticas e abrasivas, além do índice de viscosidade, que relaciona o comportamento dessa propriedade em função da temperatura.

#### 4.2.1.1 Determinação da viscosidade cinemática dos óleos lubrificantes

A medição da viscosidade cinemática dos óleos lubrificantes foi realizada através do método Saybolt. Neste procedimento, o fluido, contido em um recipiente cilíndrico, é aquecido até a temperatura desejada através de um banho de óleo, controlado por termostato (Figura 4.7, Stachowiak e Batchelor, 2001). Uma vez atingida a temperatura desejada, é removida a tampa inferior, permitindo ao líquido escoar por um furo de diâmetro determinado. A viscosidade SSU (segundos Saybolt universal) é então medida como o tempo necessário para que este óleo preencha um recipiente de volume igual a 60 ml. Para óleos de alta viscosidade (tempo necessário para o escoamento maior que mil segundos), é recomendado o uso de furo de maior diâmetro, chamado furol, que permite o escoamento em um tempo dez vezes menor. A unidade correspondente é o SSF (segundo Saybolt furol), que pode ser facilmente convertida para SSU.

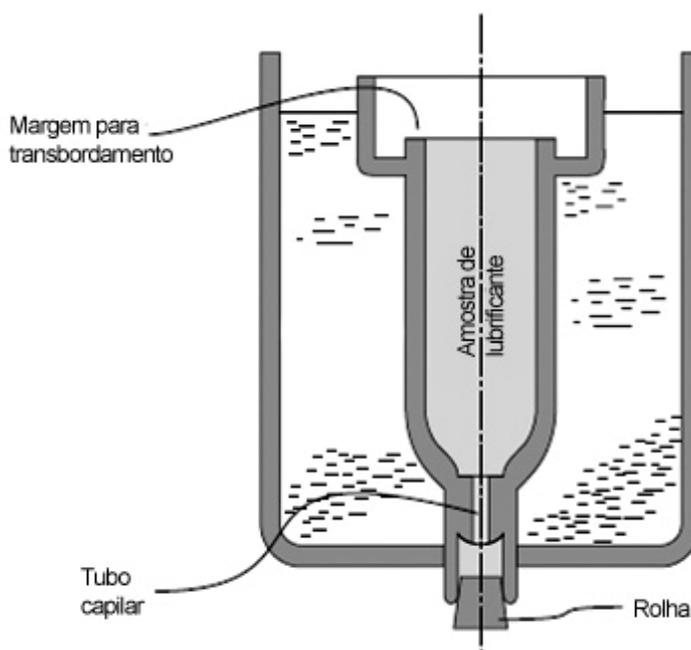


Figura 4.7 – Representação de um viscosímetro de efluxo.

A medição de viscosidade foi realizada em três diferentes temperaturas (40, 70 e 100°C), com três repetições para cada fluido. A Figura 4.8 mostra as curvas obtidas de viscosidade em função da temperatura, enquanto a Tabela 4.6 mostra os valores de viscosidade cinemática obtidos para as temperaturas de 40 e 100 °C e o índice de viscosidade destes elementos.

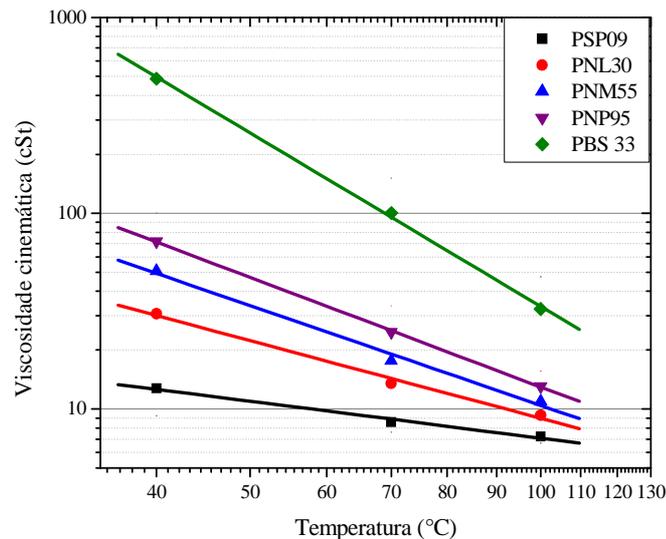


Figura 4.8 – Curvas de viscosidade cinemática em função da temperatura para os óleos avaliados.

Tabela 4.6 – Viscosidade e índice de viscosidade dos óleos lubrificantes avaliados.

Óleo	V40 (cSt)	V100 (cSt)	L	H	IV
Spindle	12,8	7,3	82,4	50,7	219,7
PNL	30,8	9,3	130,4	74,6	178,5
PNM	50,8	11,0	173,9	95,2	156,3
PNP	71,8	13,1	235,0	122,9	145,6
PBS33	487,4	32,5	1184,0	454,0	95,4

#### 4.2.1.2 Avaliação da tensão superficial dos óleos lubrificantes

A determinação da tensão superficial dos óleos adicionados como aglutinante ao pó magnético-abrasivo foi realizada através do método do anel de *Du Noy*, usando um medidor de tensão superficial e interfacial marca Krüss, modelo 8451. A técnica do anel de *Du Noy* consiste na medição da força ( $F$ ) necessária para destacar um anel de platina, de dimensões conhecidas (raio  $r$ ), da superfície do líquido. A tensão superficial ( $\gamma$ ) é então calculada através da equação 4.1, em mN/m.

$$\gamma = \frac{F}{4\pi r} \quad (4.1)$$

Os testes foram realizados em diferentes temperaturas (20, 40, 70 e 100 °C), com três repetições em cada, gerando os resultados apresentados na Figura 4.9 e na Tabela 4.7.

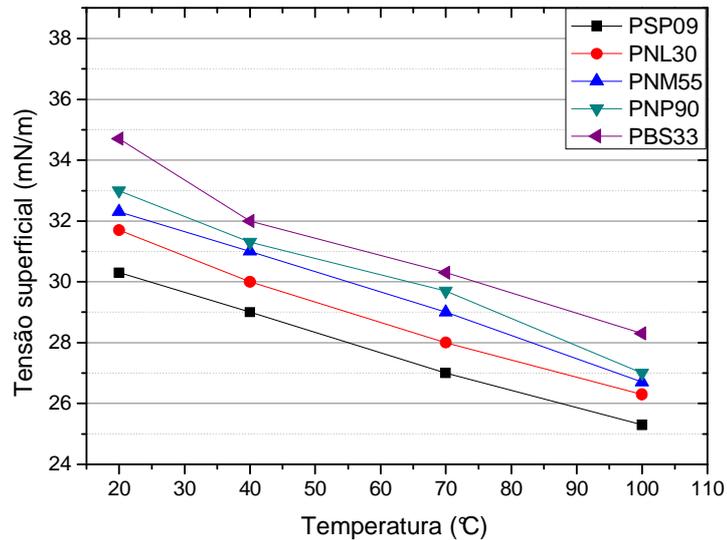


Figura 4.9 – Tensão superficial em função da temperatura para os óleos avaliados.

Tabela 4.7 – Tensão superficial dos óleos lubrificantes avaliados em função da temperatura.

Óleo	PSP09	PNL30	PNM55	PNP95	PBS33
Temperatura (°C)	Tensão superficial (mN/m)				
20	30,3	31,7	32,3	33,0	34,7
40	29,0	30,0	31,0	31,3	32,0
70	27,0	28,0	29,0	29,7	30,3
100	25,3	26,3	26,7	27,0	28,3

#### 4.2.2 Avaliação da influência do tipo e quantidade de elemento lubrificante

O procedimento experimental adotado foi dividido em duas partes complementares, tendo em comum a variação do elemento aglutinante e da rotação imposta ao corpo de prova. Porém, enquanto a primeira abordagem incluiu ainda a variação do tempo de usinagem, na segunda foi abordada a quantidade de elemento aglutinante.

As variáveis de resposta avaliadas em todos os testes realizados foram o acabamento superficial, através da medição da rugosidade média  $Ra$ , e a remoção de material. A medição do acabamento superficial foi realizada com a utilização de um rugosímetro digital *Mitutoyo*,

modelo *Surftest SJ-201*. As medições foram executadas em regiões equidistantes  $120^\circ$  no corpo de prova, localizadas na região central da área usinada. Devido à baixa remoção de material obtida no processo em comparação com processos convencionais de usinagem, a metodologia adotada para avaliar esta grandeza foi a medição da variação da massa do corpo de prova, medida em miligramas. O instrumento utilizado foi uma balança analítica marca Sartorius, modelo ME414S, com resolução de  $10^{-4}$  g e repetitividade, declarada pelo fabricante, menor ou igual a 0,1 mg. A avaliação da remoção de material se justifica pelo fato de ser uma grandeza tão afetada pela agressividade do processo quando o acabamento superficial, com a vantagem de não haver um ponto de saturação tão definido. Desse modo, estes resultados podem não só corroborar conclusões atingidas através da medição da rugosidade como também evitar conclusões errôneas.

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de uma única barra retificada de aço ABNT 1045, cortados, faceados e com furos de centro usinados em ambos os lados, de acordo com a Figura 4.10. Com o objetivo de obter maior aproveitamento de material, os corpos de prova foram confeccionados de forma que ambas as extremidades pudessem ser utilizadas independentemente. Desse modo, o espaço necessário para a sua fixação foi consideravelmente reduzido, sendo esta feita em seu comprimento útil. A proteção do corpo de prova durante a sua fixação na placa do torno é obtida através do uso de uma bucha, usinada em nylon, que efetua o contato entre as partes metálicas, evitando tanto danos à peça quanto imprecisões devidas à inclusão do torno no circuito magnético.

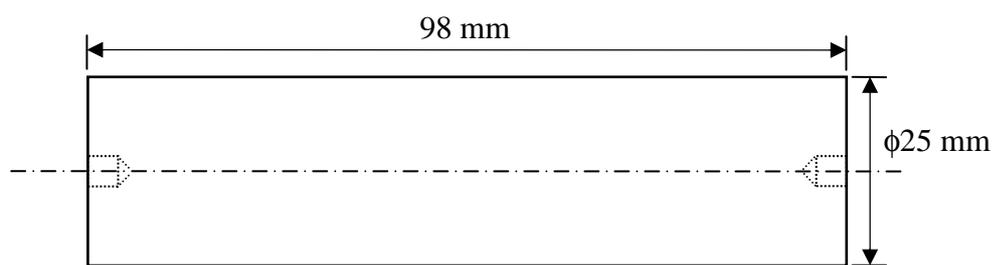


Figura 4.10 – Corpo de prova utilizado.

A Tabela 4.8 mostra a composição, em percentagem de massa, do aço ABNT 1045. A escolha desse material se deveu à sua composição química simples e ao fato deste ser um dos aços carbono mais amplamente utilizados na indústria metal-mecânica, com propriedades conhecidas e disponível comercialmente em diversas dimensões e acabamentos.

Tabela 4.8 – Composição química, em percentagem de massa, do aço ABNT 1045.

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Al	Ti
0,46 %	0,68 %	0,012 %	0,008 %	0,2 %	0,01 %	0,02 %	0,02 %	0,002 %

A fim de garantir condições iniciais de acabamento suficientemente próximas para possibilitar a comparação direta da rugosidade, realizou-se o controle da condição inicial dos corpos de prova. Para tanto, foram medidos os acabamentos superficiais originais de cada peça, resultando em uma média igual a 0,58  $\mu\text{m Ra}$ , com desvio padrão de 0,04  $\mu\text{m}$ . Desse modo, definiu-se uma faixa de rugosidades utilizável, incluindo os corpos de prova cuja condição inicial enquadrava-se até um desvio padrão acima ou abaixo da média, com os demais sendo rejeitados.

A realização de estudos preliminares (APÊNDICE A) e a revisão de trabalhos anteriores [Leonhart e Amorim, 2004; Leonhart, 2003; Amorim e Lorini, 2006; Amorim et al., 2007, Gomes et al., 2007] permitiram a determinação dos parâmetros de ensaio mostrados na Tabela 4.9 e das características básicas do pó magnético-abrasivo utilizado como base para a adição dos óleos lubrificantes (Tabela 4.10). Estes valores são mantidos fixos no decorrer de ambos os testes realizados. Os parâmetros de vibração foram adotados com base no estudo realizado por Gomes, 2007.

Tabela 4.9 – Parâmetros de processo adotados no procedimento experimental.

Parâmetro	Valor
Densidade de fluxo magnético	0,67 T
Rotação da peça	400/800 RPM
Entreferro	1 mm
Frequência de vibração	5 Hz
Amplitude de vibração	1 mm
Corpo de prova	Aço ABNT 1045
Condição inicial do corpo de prova	0,58 $\pm$ 0,04 $\mu\text{m Ra}$
Diâmetro do corpo de prova	25 mm

Tabela 4.10 – Características do pó magnético-abrasivo.

Parâmetro	Valor
Elemento abrasivo	Óxido de alumínio
Diâmetro médio das partículas abrasivas	88,32 $\mu\text{m}$
Elemento ferromagnético	Ferro fundido cinzento
Diâmetro médio das partículas ferromagnéticas	180,58 $\mu\text{m}$
Proporção em massa da mistura (Fe:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4:1

A medição da temperatura na região em usinagem foi realizada através do uso de um pirômetro, registrando periodicamente a temperatura máxima encontrada no corpo de prova. Foram usadas frequências de aquisição de temperatura de 30 e 60 s para ensaios com tempo total de 150 e 300 s, respectivamente.

### 4.2.3 Projeto de experimentos

O modelo experimental adotado para a avaliação da influência dos fatores sobre o acabamento superficial foi o *experimento fatorial cruzado*. A fim de minimizar o consumo de material, foram realizados, ao invés de um experimento com quatro fatores, dois experimentos com três fatores. Dessa maneira, foi possível observar os efeitos isolados de todos os parâmetros envolvidos (tipo de óleo, rotação, tempo em usinagem e proporção em massa da composição do pó magnético-abrasivo), com prejuízo apenas nos efeitos de interação envolvendo a proporção em massa do PMA e o tempo em usinagem, de menor importância uma vez que os efeitos do tempo em usinagem já foram exaustivamente abordados neste e em outros trabalhos. Por outro lado, uma possível interação entre estes parâmetros pode ser identificada através de uma diferença no comportamento dos gráficos que associam a acabamento superficial e a remoção de material ao tipo de óleo adicionado ao pó magnético-abrasivo e à rotação imposta ao corpo de prova em ambos os experimentos.

Com o objetivo de avaliar o efeito da adição de diferentes elementos lubrificantes ao pó magnético-abrasivo, foi realizado um experimento do tipo fatorial cruzado, no qual cada um dos elementos da Tabela 4.5 foi avaliado em função do tempo de processamento (150 e 300 s) e da rotação da peça (400 e 800 RPM), num total de  $5 \times 2 \times 2 = 20$  experimentos. Neste procedimento foi utilizada uma quantidade fixa de óleo, resultando em uma proporção ferro: $\text{Al}_2\text{O}_3$ :óleo igual a 4:1:0,4 em massa, equivalente à adição de 8%, em massa, de óleo à mistura ferro:alumina.

A influência da quantidade de óleo lubrificante adicionado ao PMA sobre o resultado do processo foi avaliada através da realização de um experimento fatorial similar ao anterior, porém realizado com pós magnético-abrasivos contendo, em massa, as proporções de 4:1:0,4 e 4:1:0,8 (8 e 16% de óleo básico).

A Tabela 4.11 mostra a matriz experimental referente ao procedimento adotado. Os conjuntos de testes referidos foram agrupados em dois procedimentos experimentais, doravante chamados Experimento 1 e Experimento 2, sendo o primeiro constituído pelos fatores a níveis variáveis óleo básico (A), rotação (B) e tempo em usinagem (C) e o segundo

pelos fatores óleo básico, rotação e proporção da mistura ferro:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:óleo básico (*D*). Os resultados foram apresentados na forma  $R_{ABCDn}$ , sendo *n* a medição, variando de um a três.

Tabela 4.11 – Matriz experimental.

		Experimento 2				
Proporção Fe:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :óleo	Óleo básico	Tempo				
		2,5 min		5 min		
		400 RPM	800 RPM	400 RPM	800 RPM	
Experimento 1	4:1:0,4	Spindle	R <sub>11111</sub> , R <sub>11112</sub> , R <sub>11113</sub>	R <sub>12111</sub> , R <sub>12112</sub> , R <sub>12113</sub>	R <sub>11211</sub> , R <sub>11212</sub> , R <sub>11213</sub>	R <sub>12211</sub> , R <sub>12212</sub> , R <sub>12213</sub>
		PNL	R <sub>21111</sub> , R <sub>21112</sub> , R <sub>21113</sub>	R <sub>22111</sub> , R <sub>22112</sub> , R <sub>22113</sub>	R <sub>21211</sub> , R <sub>21212</sub> , R <sub>21213</sub>	R <sub>22211</sub> , R <sub>22212</sub> , R <sub>22213</sub>
		PNM	R <sub>31111</sub> , R <sub>31112</sub> , R <sub>31113</sub>	R <sub>32111</sub> , R <sub>32112</sub> , R <sub>32113</sub>	R <sub>31211</sub> , R <sub>31212</sub> , R <sub>31213</sub>	R <sub>32211</sub> , R <sub>32212</sub> , R <sub>32213</sub>
		PNP	R <sub>41111</sub> , R <sub>41112</sub> , R <sub>41113</sub>	R <sub>42111</sub> , R <sub>42112</sub> , R <sub>42113</sub>	R <sub>41211</sub> , R <sub>41212</sub> , R <sub>41213</sub>	R <sub>42211</sub> , R <sub>42212</sub> , R <sub>42213</sub>
		PBS	R <sub>51111</sub> , R <sub>51112</sub> , R <sub>51111</sub>	R <sub>52111</sub> , R <sub>52112</sub> , R <sub>52113</sub>	R <sub>51211</sub> , R <sub>51212</sub> , R <sub>51213</sub>	R <sub>52211</sub> , R <sub>52212</sub> , R <sub>52213</sub>
	4:1:0,8	Spindle	R <sub>11121</sub> , R <sub>11122</sub> , R <sub>11123</sub>	R <sub>12121</sub> , R <sub>12122</sub> , R <sub>12123</sub>		
PNL		R <sub>21121</sub> , R <sub>21122</sub> , R <sub>21123</sub>	R <sub>22121</sub> , R <sub>22122</sub> , R <sub>22123</sub>			
PNM		R <sub>31121</sub> , R <sub>31122</sub> , R <sub>31123</sub>	R <sub>32121</sub> , R <sub>32122</sub> , R <sub>32123</sub>			
PNP		R <sub>41121</sub> , R <sub>41122</sub> , R <sub>41123</sub>	R <sub>42121</sub> , R <sub>42122</sub> , R <sub>42123</sub>			
PBS		R <sub>51121</sub> , R <sub>51122</sub> , R <sub>51123</sub>	R <sub>52121</sub> , R <sub>52122</sub> , R <sub>52123</sub>			

A análise da influência dos parâmetros de processo sobre a rugosidade média *Ra* dos corpos de prova usinados foi realizada através de um procedimento estatístico chamado análise de variância (ANOVA), permitindo determinar a influência de cada fator em separado e das interações entre esses no resultado do processo [Montgomery, 2004].

A remoção de material foi avaliada para cada ensaio realizado, através da pesagem dos corpos de prova antes e após a usinagem. Uma vez que somente uma pesagem foi realizada para cada condição de ensaio, o uso da análise de variância não foi possível, sendo feita, então a análise de cada condição.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da execução do procedimento experimental descrito no capítulo 4, com as devidas discussões e análises estatísticas. A apresentação dos resultados segue uma sequência na qual inicialmente são apresentados os efeitos causados pelo processo no acabamento superficial de forma geral, em função da principal grandeza avaliada, seguidos pelos resultados obtidos segundo dois ou mais fatores. Resultados de ensaios específicos são apresentados de acordo com a relevância em relação ao experimento abordado.

Os resultados obtidos para remoção de material, bem como para a temperatura medida durante o processo de acabamento magnético-abrasivo, são apresentados após os de rugosidade, visando fornecer elementos que auxiliem a discussão.

### 5.1 Resultados obtidos com o uso de PMA a níveis fixos (Experimento 1)

Através da aplicação de um projeto de experimentos fatorial cruzado é possível obter tanto os efeitos isolados das fontes analisadas quanto verificar a existência de interações entre estas. A Figura 5.1 apresenta os valores médios de rugosidade  $Ra$  obtidos para cada óleo básico avaliado como elemento aglutinante no Experimento 1. Estes resultados constituem uma média aritmética de experimentos realizados em diversas condições, e apontam uma região onde melhores acabamentos superficiais são obtidos. A apresentação dos resultados é realizada, sempre que possível, em ordem crescente de viscosidade cinemática (que também corresponde, para os elementos avaliados, à ordem crescente de tensão superficial e viscosidade dinâmica).

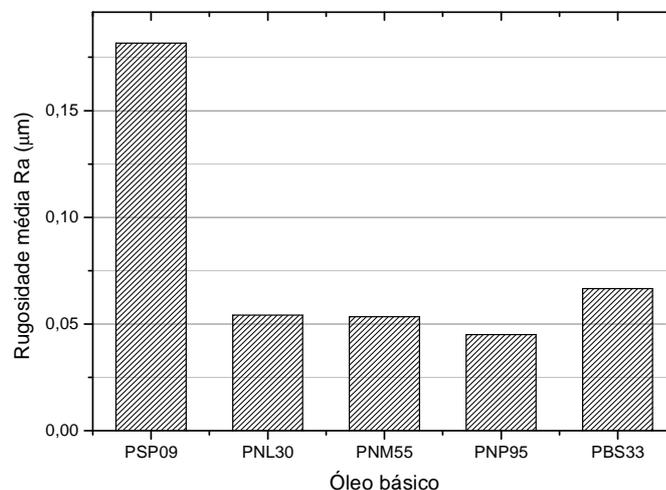


Figura 5.1 – Rugosidade em função do óleo básico adicionado ao PMA (Experimento 1).

Observa-se na Figura 5.1 que o óleo básico de menor viscosidade (PSP09) apresenta acabamento superficial significativamente inferior em comparação com os demais elementos. Não foi verificada diferença significativa entre os resultados obtidos com o uso dos óleos PNL30, PNM 55 e PNP95, apesar de haver pequena melhora nos resultados em direção a este último. Os resultados gerais observados para o óleo PBS33 mostram leve piora no acabamento superficial em comparação com os elementos mencionados, ainda assim não significativo.

O efeito combinado da adição de diferentes óleos lubrificantes ao pó magnético-abrasivo sobre a rugosidade média dos componentes usinados para diferentes intervalos de tempo é ilustrado na Figura 5.2. A análise destes resultados permite concluir que, para as condições experimentais aplicadas, não há diferença significativa entre os acabamentos superficiais obtidos após 150 e 300 s de processamento para os óleos PNL30, PNM55 e PNP95, indicando que o principal ganho em acabamento superficial ocorre no período inicial do processo, após o qual é atingido um ponto de saturação em relação à rugosidade dos componentes usinados.

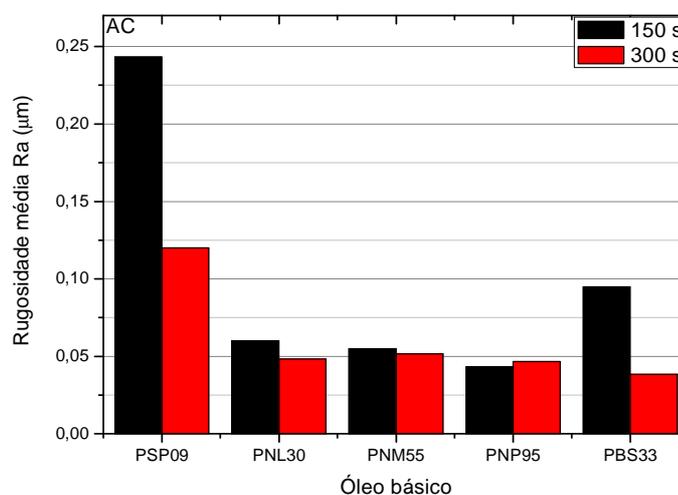


Figura 5.2 – Rugosidade em função do óleo básico e do tempo de processamento.

Os testes realizados com pós magnético-abrasivos contendo os elementos PSP09 e PBS33 apresentaram forte melhora após 300 s de processamento, o que indica que menor taxa de variação da rugosidade em função do tempo. Esta menor taxa pode ser atribuída às particularidades de ambos os elementos. Enquanto o óleo PSP09 possui baixa tensão superficial e viscosidade, apresentando assim menores forças de adesão e viscosa, o elemento PBS apresenta uma situação oposta. O primeiro caso resulta em baixa resistência das partículas abrasivas ao rolamento e deslizamento, resultando em menor remoção de material

e, em consequência, maior tempo necessário para que o limite de saturação seja atingido, enquanto o segundo, devido às forças adesiva e viscosa demasiado elevadas, impede a renovação das partículas abrasivas na zona de corte. Este efeito tende a diminuir após maiores intervalos de usinagem, devido à redução causada na tensão superficial e na viscosidade em função da temperatura.

A Figura 5.3 ilustra o efeito combinado da adição de diferentes óleos lubrificantes ao pó magnético-abrasivo sobre a rugosidade média dos componentes usinados com diferentes rotações. Assim como o efeito do tempo de processamento, o aumento da rotação imposta à peça mostra pouca influência sobre o acabamento superficial para os óleos PNL30 a PNP95, com valores mais baixos de rugosidade obtidos para a rotação mais elevada, ainda que as diferenças não sejam consideradas estatisticamente significativas. Novamente, o comportamento dos testes realizados com adição dos óleos PSP09 e PBS33 pode ser explicado em função de suas propriedades e da dependência destas em relação à temperatura, uma vez que, a rotações mais elevadas, há maior geração de calor.

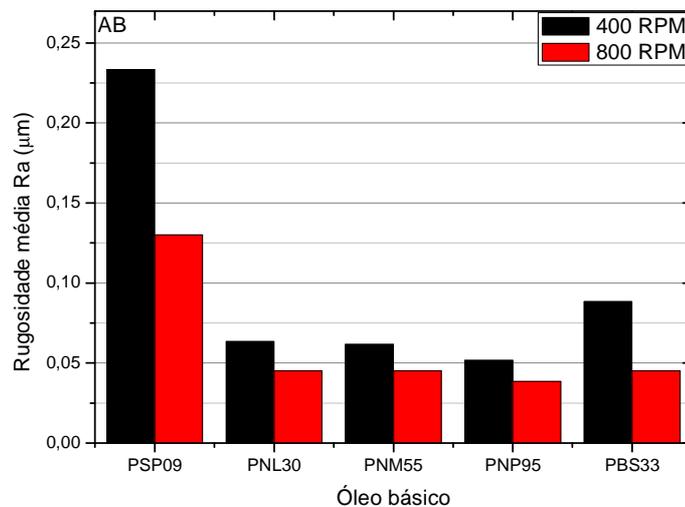


Figura 5.3 – Rugosidade em função do óleo e rotação da peça para o Experimento 1.

A semelhança entre Figuras 5.2 e 5.3 sugere haver, para a proporção da mistura avaliada (4:1:0,4), efeito semelhante entre a variação do tempo de usinagem e da rotação aplicada ao corpo de prova. A representação dos resultados de acabamento superficial em função do tempo para as diferentes rotações impostas à peça (Figura 5.4) comprova esta tendência, uma vez que a comparação múltipla de médias entre resultados obtidos após 150 s de usinagem a 800 RPM e 300 s a 400 RPM não indica diferenças estatisticamente significativas. Este resultado concorda com as observações feitas por Jain et al., 2001, de que a melhora no acabamento obtida com o aumento da velocidade de corte se deve

principalmente ao aumento na distância percorrida pelos abrasivos em um mesmo intervalo de tempo, sendo então relacionado ao comprimento efetivo de corte. Há, no entanto, evidências, observadas em resultados individuais de ensaios, de que este efeito, apesar de ocorrer de forma geral, não é uma regra, e sim uma condição na qual interações positivas verificadas com determinados elementos aglutinantes compensam interações negativas referentes aos demais.

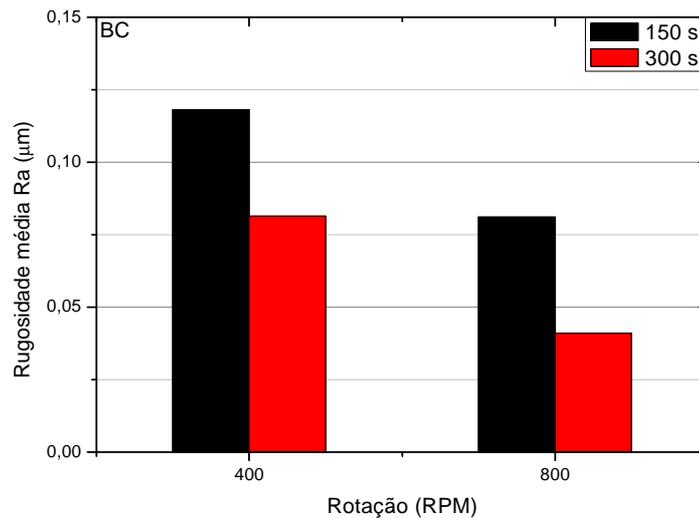


Figura 5.4 – Rugosidade em função da rotação e do tempo de usinagem.

Os resultados ilustrados nas Figuras 5.2 e 5.3 indicam um intervalo de viscosidades (uma vez que os óleos são apresentados em ordem crescente em relação a esta propriedade) em que melhores resultados são obtidos, que inclui os óleos PNL30 a PNP95. Estes resultados concordam parcialmente com o observado no testes preliminares (APÊNDICE A) e ilustrado na Figura 4.6, onde o óleo de menor viscosidade apresentou pior acabamento superficial ao ser usinado a velocidade de corte mais baixa e bom acabamento a alta rotação.

A Tabela 5.1 apresenta a análise de variância realizada para o Experimento 1, com um intervalo de confiança  $\alpha$  igual a 5% (0,05). A fonte A é o elemento aglutinante (óleo básico). A Fonte B é a rotação imposta ao corpo de prova e C o tempo de processamento. Os resultados mostram que, para os parâmetros testados, todas as fontes geram diferenças estatisticamente significativas para o intervalo de confiança usado. Efeitos de interação de segunda ordem significativos foram encontrados para todas as combinações de fontes exceto rotação e tempo, não ocorrendo interação significativa de terceira ordem.

Tabela 5.1 – Análise de variância dos testes de elemento lubrificante.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média Quadrática	F calc.	F tab.	≠ Significativa
Óleo (A)	0,165	4	0,041	64,5	2,61	<b>SIM</b>
Rotação (B)	0,020	1	0,020	30,94	4,09	<b>SIM</b>
Tempo (C)	0,021	1	0,021	33,25	4,09	<b>SIM</b>
SQAB	0,015	4	0,004	5,96	2,61	<b>SIM</b>
SQAC	0,036	4	0,009	13,91	2,61	<b>SIM</b>
SQBC	0,000	1	0,000	0,44	4,09	<b>NÃO</b>
SQABC	0,004	4	0,001	1,70	2,61	<b>NÃO</b>
Erro	0,026	40	0,001			
Total	0,287	59	$\alpha = 0,05$			

Os resultados obtidos para cada teste realizado são apresentados, na Figura 5.5, sob a forma de dois gráficos em função do tempo, obtidos a 400 RPM e 800 RPM. Como esperado, não há diferenças significativas para os resultados obtidos com o uso dos óleos PNL30, PNM55 e PNP95 em nenhuma condição apresentada. Por outro lado, o uso do óleo PSP09 resulta em piores acabamentos superficiais em baixas rotações. Quando aplicado no acabamento de uma peça a 800 RPM durante 300 s, este elemento permite a obtenção de resultados equivalentes aos dos demais. Porém, isto se deve mais ao fato de, nestas condições, os processos realizados com adição dos demais elementos atingirem mais rapidamente o ponto de saturação, após o qual há pouca ou nenhuma melhora no acabamento superficial.

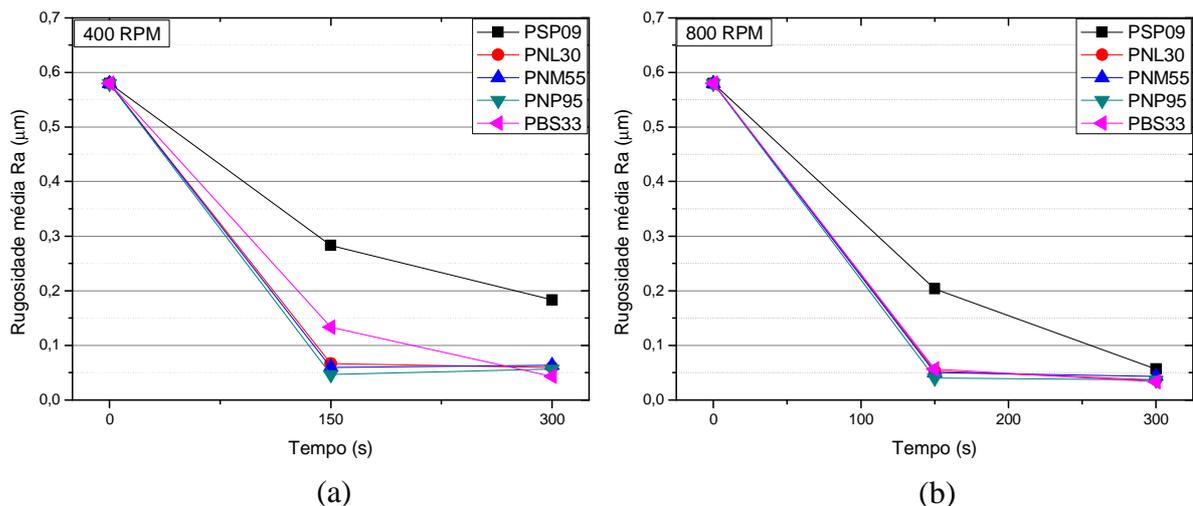


Figura 5.5 – Rugosidade em função do tempo. (a) 400 RPM e (b) 800 RPM.

O uso do óleo PBS33 também apresenta diferenças em relação aos demais, resultando em uma resposta mais lenta do processo. Na Figura 5.5a, observa-se que, após 150 s de

usinagem, o acabamento superficial gerado encontra-se significativamente afastado da rugosidade atingida pelos óleos de melhor desempenho. Por outro lado, este elemento permitiu, após 300 s, a obtenção de um acabamento superficial do mesmo nível. Os resultados experimentais sugerem que há a necessidade de o processo “entrar em regime” antes que se obtenha os melhores resultados, indicando uma influência da temperatura na região em usinagem.

Os resultados obtidos para remoção de material são apresentados na Figura 5.6, para as rotações de 400 RPM (a) e 800 RPM (b). A comparação entre as Figuras 5.2 e 5.6 indica uma relação entre material removido e acabamento superficial uma vez que a distribuição de ambas as grandezas se apresentam de forma semelhante, porém verticalmente invertida (maiores remoções de material tendem a ocorrer em condições que apresentaram melhor acabamento superficial). Em comparação com o acabamento superficial, ocorre, em especial a 400 RPM, maior remoção de material e melhor acabamento superficial ocorrendo na mesma faixa de viscosidades já mencionada. Observa-se que os óleos básicos adicionados aos pós magnético-abrasivos permitiram o aumento da remoção de material em rotações mais elevadas, tendência que se estende também ao comportamento em relação ao tempo em usinagem. As únicas exceções se referem aos comportamentos dos PMAs preparados com os óleos PSP09 e PNM55. Enquanto o primeiro não apresentou variação na remoção de material entre 150 e 300 s em nenhuma condição de usinagem avaliada, o segundo se comporta da mesma maneira quando usinado durante 300 s em ambas as rotações. Estas exceções mostram que, apesar de se apresentar na média geral dos resultados, a dependência do comprimento efetivo de corte não é verdadeira.

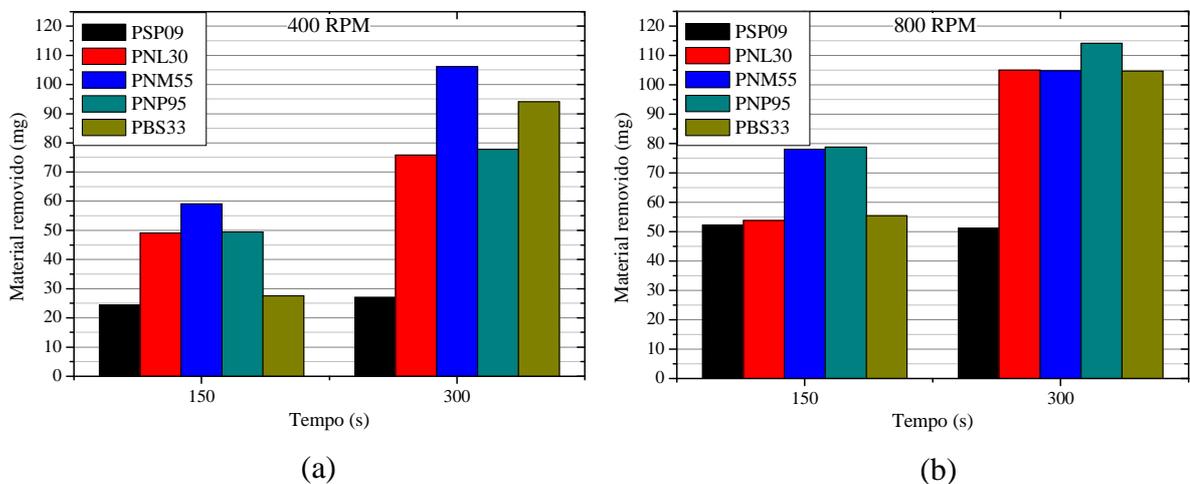


Figura 5.6 – Remoção de material observada com diferentes óleos básicos em função do tempo de processamento nas rotações (a) 400 RPM e (b) 800 RPM.

Uma diferença importante em relação aos resultados de acabamento superficial é observada ao avaliar os efeitos de rotação e tempo de usinagem sobre a remoção de material. Enquanto, para fins de obtenção de acabamento superficial, ambos os parâmetros aparentam possuir influência equivalente, a quantidade de material removida pelo processo de acabamento magnético-abrasivo é mais afetada pelo tempo em usinagem do que pela rotação imposta ao corpo de prova, como se pode observar através da comparação entre a massa removida após 300 s a 400 RPM (Figura 5.6a) e após 150 s a 800 RPM (Figura 5.6b). Dos óleos básicos avaliados como elemento aglutinante, somente os óleos PSP09 e PNP95 se comportaram de modo diferente e destes, somente o primeiro obteve maior remoção de material após menos tempo de ensaio com velocidade mais elevada, enquanto o óleo PNP95 não gerou resultados significativamente diferentes nestas condições de utilização. Em relação à influência do tempo de ensaio, a Figura 5.6 mostra que, com exceção do o óleo PSP09, com o qual se obteve a mesma remoção de material após 150 e 300 s de usinagem, todos os elementos aglutinantes permitem o aumento da quantidade de massa removida com aumento no tempo de processamento.

Sob as condições de ensaio da Figura 5.6a, maiores remoções de material foram obtidas com a adição de elementos de viscosidade moderada, à exceção do óleo *bright stock*. Este elemento, apesar de haver resultado em uma baixa remoção de material após 150 s (somente mais alta que a obtida com o uso do óleo PSP09 nesta mesma condição), foi responsável por uma elevada remoção de material após 300 s, somente menor, a 400 RPM, que a obtida com o uso do óleo PNM55, comportamento que se repetiu nos testes realizados à rotação mais elevada.

O principal motivo encontrado para o forte aumento da taxa de remoção de material obtido após intervalos mais longos de usinagem para o óleo PBS33 é a variação de temperatura, associada às características tribológicas do elemento aglutinante, em especial seu índice de viscosidade. Isto significa que, com o aumento da temperatura na zona de usinagem, a viscosidade desse elemento tende a se aproximar da viscosidade dos demais óleos básicos, explicando a aparente necessidade do processo de “entrar em regime”. Desse modo, a movimentação das partículas abrasivas é facilitada, ao mesmo tempo que a sua maior adesão ao elemento magnético, aliada à maior força viscosa oferecida, dificulta tanto o seu rolamento quanto o deslizamento quando em contato com a superfície em usinagem, permitindo maior remoção de material.

A Figura 5.7 ilustra a temperatura observada na superfície do corpo de prova ao longo do ensaio, com medições realizadas a cada minuto.

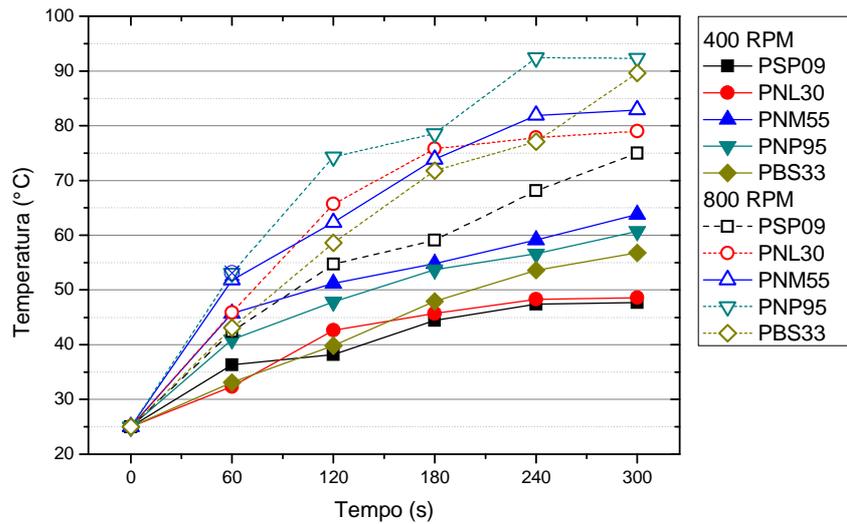


Figura 5.7 – Temperaturas na superfície de peças durante os testes realizados.

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam, respectivamente, os resultados combinados de rugosidade média  $Ra$  e material removido em função do tempo de usinagem. O uso de óleo básico PSP09 gerou, na maior parte das condições de corte avaliadas, menor remoção de material com pior acabamento superficial, equiparando-se ao obtido com o uso dos demais elementos testados somente na condição que permite o maior deslocamento efetivo dos grãos abrasivos sobre a peça (300 s a 800 RPM). Ainda assim, a quantidade de material removida foi, a esta condição, inferior à metade da obtida com o uso do segundo elemento menos eficiente em relação a este parâmetro. Por outro lado, o óleo mais viscoso testado apresentou um comportamento bastante dependente do tempo em usinagem, em ambas as rotações avaliadas.

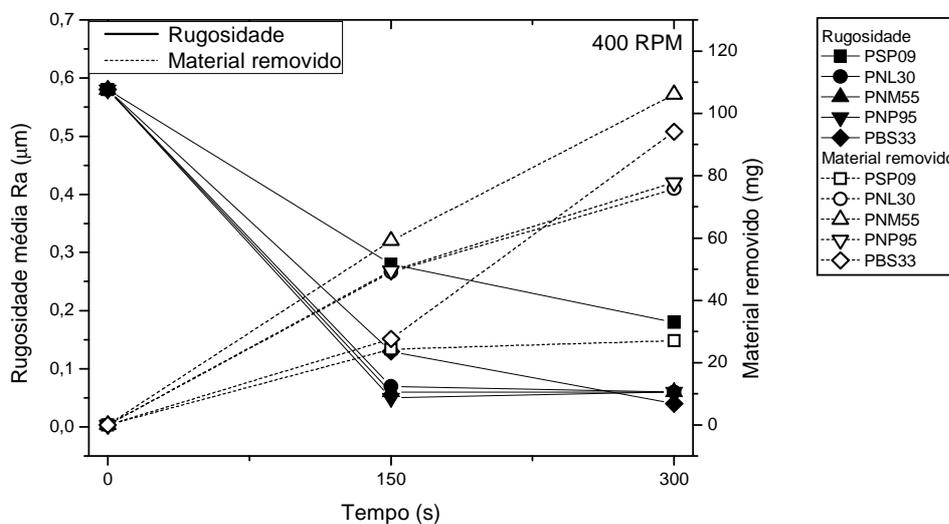


Figura 5.8 – Resultados combinados de rugosidade e remoção de material (400 RPM).

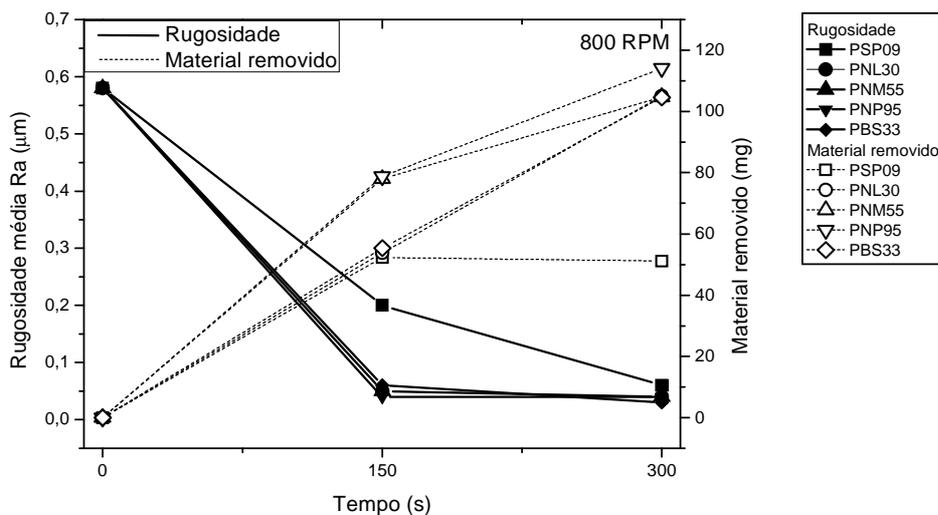


Figura 5.9 – Resultados combinados de rugosidade e remoção de material (800 RPM).

Tanto na Figura 5.8 quanto na Figura 5.9, o que se observa é que, no intervalo entre 150 e 300 s de usinagem, há um aumento significativo em sua taxa de remoção de material. Efeito inverso é observado em relação ao acabamento superficial, em especial a 400 RPM, onde se observa, após 150 s, pior acabamento em relação aos óleos parafínico neutro leve, médio e pesado. Tal comportamento se explica pelo efeito da temperatura sobre o óleo, uma vez que este elemento possui o mais baixo índice de viscosidade (*IV*) entre os avaliados, o que significa que é mais sensível a variações de temperatura.

## 5.2 Resultados obtidos para diferentes quantidades de óleo básico (Experimento 2)

A Figura 5.10 apresenta os valores médios de rugosidade *Ra* obtidos para cada óleo básico avaliado como elemento aglutinante no Experimento 2, de forma semelhante ao ilustrado na Figura 5.1. Como tal, estes resultados constituem uma média aritmética de experimentos realizados em diversas condições. Porém, ao invés dos dados experimentais referentes aos testes realizados em um intervalo de tempo igual a 300 s, são computados os resultados obtidos com diferentes proporções de óleo básico. Assim como no Experimento 1, os resultados apontam uma região onde melhores acabamentos superficiais são obtidos, sendo esta, porém, restrita aos elementos PNM55 e PNP95. Tanto os óleos PNL30 quanto PBS33 permitiram a obtenção de acabamentos superficiais intermediários, com os piores resultados referentes ao óleo parafínico neutro leve. Estes resultados, com exceção do elemento PNL30 e dos valores mais altos de rugosidade média *Ra* (piores acabamentos superficiais), concordam com o apresentado na Figura 5.1.

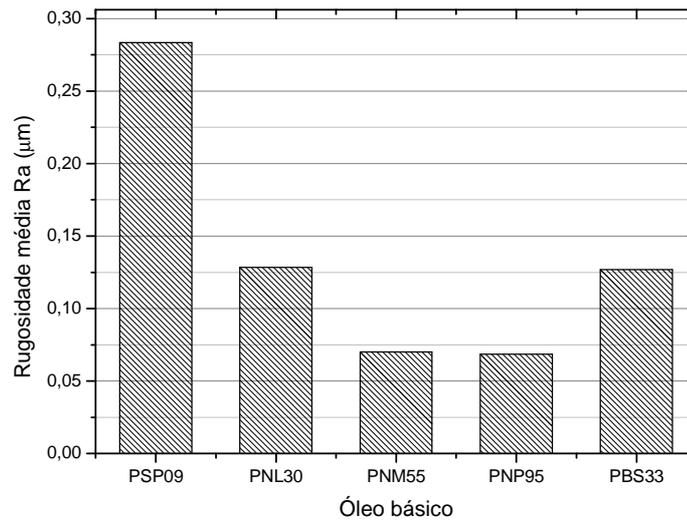


Figura 5.10 – Rugosidade em função do óleo básico adicionado ao PMA (Experimento 2).

A Figura 5.11 mostra o efeito combinado do elemento aglutinante (óleo básico) e sua proporção, em massa, adicionada ao pó magnético-abrasivo. Quando adicionados ao PMA em maior quantidade, todos os elementos geraram componentes com acabamentos superficiais de qualidade inferior. Em termos percentuais, a proporção 4:1:0,4 equivale à adição, à mistura ferro-alumina, de 8% em massa, enquanto a mistura 4:1:0,8 possui 16% de óleo básico. Estes resultados concordam com o observado no APÊNDICE A (Figura A.9), onde diferentes quantidades de óleo hidráulico foram adicionados ao PMA, resultando em uma faixa que permite os melhores resultados para adição de 8 a 12% deste elemento.

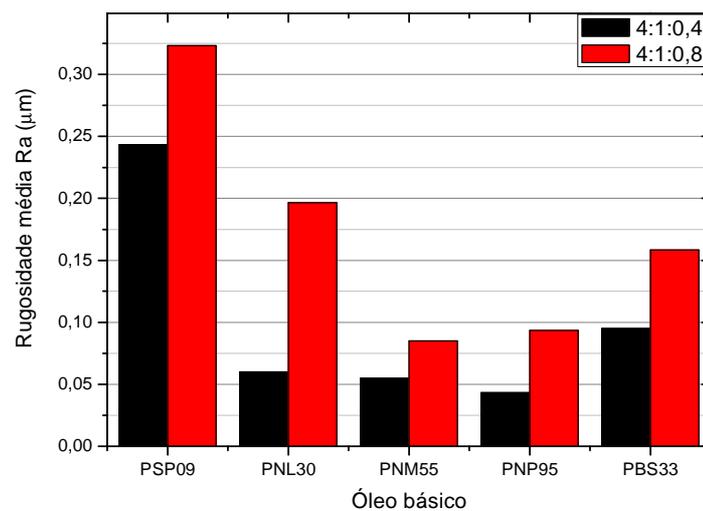


Figura 5.11 – Rugosidade em função do óleo básico e da proporção do PMA.

A Figura 5.12 ilustra o efeito combinado da adição de diferentes óleos lubrificantes ao pó magnético-abrasivo sobre a rugosidade média dos componentes usinados com diferentes rotações, constituindo uma análise equivalente à da Figura 5.3 (Experimento 1). Estes resultados diferem dos apresentados na seção 5.1 em diversos pontos além da magnitude dos valores encontrados. Diferente do observado anteriormente, há um aumento na distância entre os resultados obtidos com diferentes rotações impostas à peça para a maior parte dos elementos testados. Este aumento só não é observado para o óleo PSP09 que, apesar disso, manteve um comportamento bastante próximo do observado no Experimento 1. O resultado menos esperado foi obtido com o uso do óleo PBS33. Enquanto a Figura 5.3 mostra menor rugosidade obtida para os ensaios realizados com a rotação mais elevada, o Experimento 2 apresenta uma inversão neste quadro, com pior acabamento superficial obtido nesta condição. Este resultado se assemelha ao obtido para o óleo SAE20W40 (APÊNDICE A), a 800 RPM.

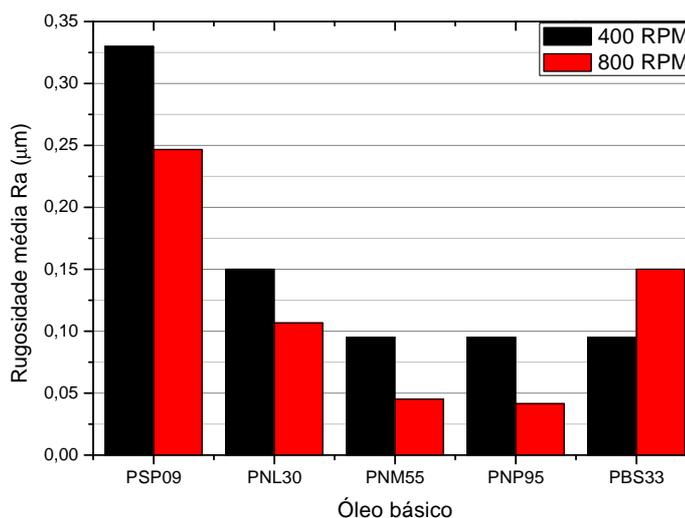


Figura 5.12 – Rugosidade em função do óleo básico e da rotação da peça (Experimento 2).

De modo geral, não foi verificada interação significativa entre os efeitos da rotação e da proporção do pó magnético-abrasivo (Figura 5.13). Isto significa que a execução do processo com adição de 8 % de óleo básico ao PMA permite a obtenção de menor rugosidade, assim como velocidades de corte mais elevadas. Porém, não se espera que o efeito de um parâmetro a determinado nível potencialize ou prejudique o do outro.

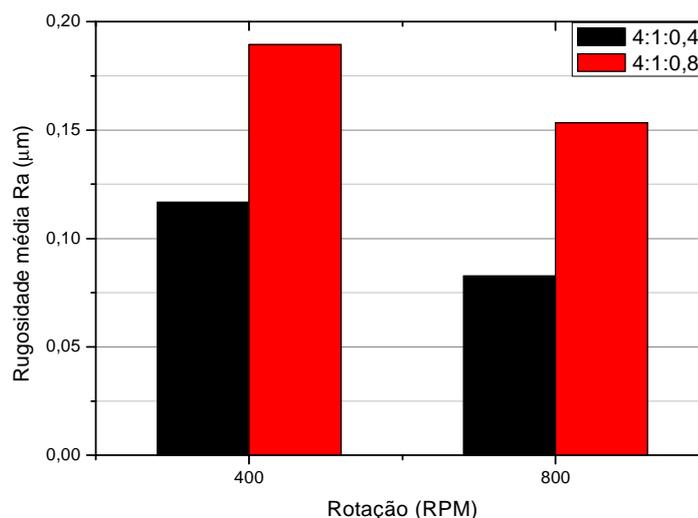


Figura 5.13 – Relação entre rotação e proporção do PMA.

A Figura 5.14 apresenta o acabamento superficial obtido para cada condição de ensaio, nas rotações de 400 e 800 RPM. Nos resultados obtidos com PMAs de proporção 4:1:0,4 a 400 RPM (Figura 5.14a) observa-se que, após a obtenção de valor inicial de rugosidade relativamente alto (dados os resultados obtidos nas demais condições) referente à utilização do óleo neutro *Spindle* (PSP09), há uma tendência de diminuição sucessiva, ainda que não estatisticamente significativa dada a dispersão dos resultados experimentais, em especial relacionada a maus acabamentos superficiais, desta variável de resposta, conforme óleos básicos de maior viscosidade vão sendo avaliados. Esta tendência cessa após o alcance de um valor mínimo de rugosidade com o uso do elemento PNP95, havendo, então, piora da rugosidade com o óleo PBS33. Para os testes realizados com um PMA de proporção 4:1:0,8, há também uma tendência de melhora no acabamento superficial relacionada ao aumento da viscosidade do elemento aglutinante. Os resultados, porém, mostram pior desempenho nesta condição quando comparada com a anterior, exceto para o óleo mais viscoso, que apresentou rugosidade mais baixa.

Os resultados obtidos com a rotação mais elevada (800 RPM) refletem, em parte, aqueles obtidos em baixas rotações. Para a condição na qual 8% em massa de óleo básico foi adicionado ao PMA (4:1:0,4), o aumento da rotação gera resultados que se parecem com os obtidos a 400 RPM, se diferenciando apenas pela maior proximidade entre os valores obtidos, uma vez que os três elementos de viscosidade intermediária proporcionam, já a 400 RPM (Figura 5.14a), acabamentos superficiais próximos à zona de saturação. Este comportamento se repete para pós magnético-abrasivos de proporção 4:1:0,8, exceto para a mistura preparada

com o óleo PBS33, cujo acabamento superficial piora significativamente com o aumento da rotação.

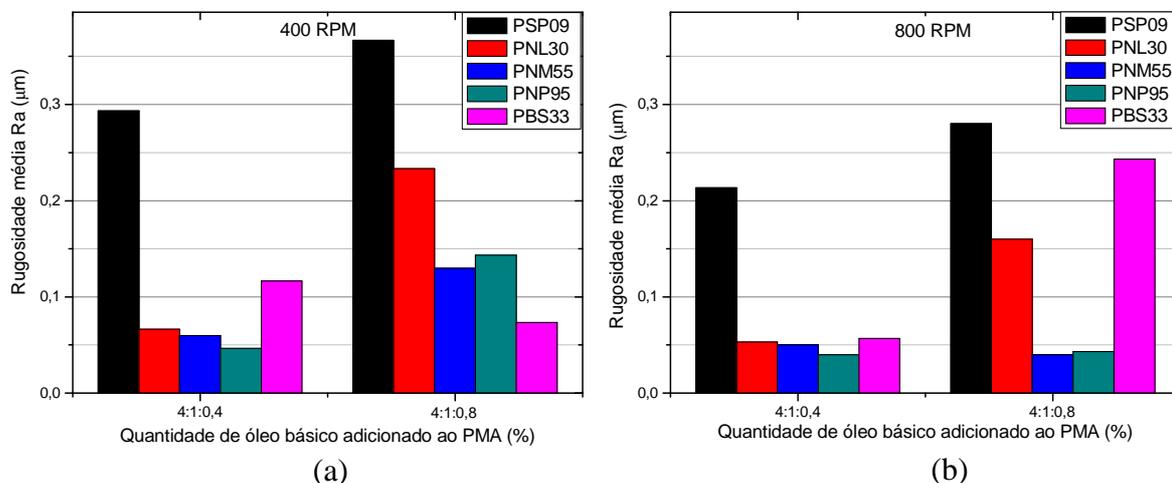


Figura 5.14 – Rugosidade em função da proporção do PMA. (a) 400 RPM e (b) 800 RPM.

A análise dos resultados de remoção de material (Figura 5.15) e das temperaturas medidas para as condições avaliadas no Experimento 2 auxilia o entendimento dos resultados apresentados na Figura 5.14. Para os testes realizados com adição de 8% de óleo básico ao PMA, maiores remoções de material são obtidas para os mesmos elementos com os quais melhores acabamentos superficiais foram obtidos. Porém, o aumento na concentração do elemento aglutinante causa, na rotação mais elevada, um aumento na quantidade de material removido que, excluindo o óleo PBS33, pode ser considerado linear em relação ao aumento na viscosidade, sem prejuízo significativo quanto à exatidão dos resultados. Por outro lado, o fato da viscosidade deste elemento a baixas temperaturas estar em um patamar bastante superior às dos demais elementos, aliado a seu índice de viscosidade mais baixo, significando que este elemento é mais sensível à ação da temperatura, podem afetar o seu desempenho. A alta remoção de material verificada nos testes realizados com o elemento PBS33 ocorre de forma simultânea à piora no resultado de acabamento superficial observada na Figura 5.14b.

As maiores rugosidades associadas a menores remoções de material verificadas com o aumento da concentração do elemento aglutinante podem ser atribuídas a diversos fatores, a saber:

- menor permeabilidade magnética do PMA, devido aos filmes lubrificantes de maior espessura e mais distribuídos, impedindo ou dificultando o contato metal-metal;

- menor adesão devido às forças de menisco, uma vez que a quantidade de fluido é demasiada, gerando, na prática, menos meniscos, como no exemplo da Figura 2.24;
- maior lubrificação da zona de corte, permitindo maior movimentação entre as partículas abrasivas (menor força cisalhante viscosa), com consequente aumento no rolamento e deslizamento destas.

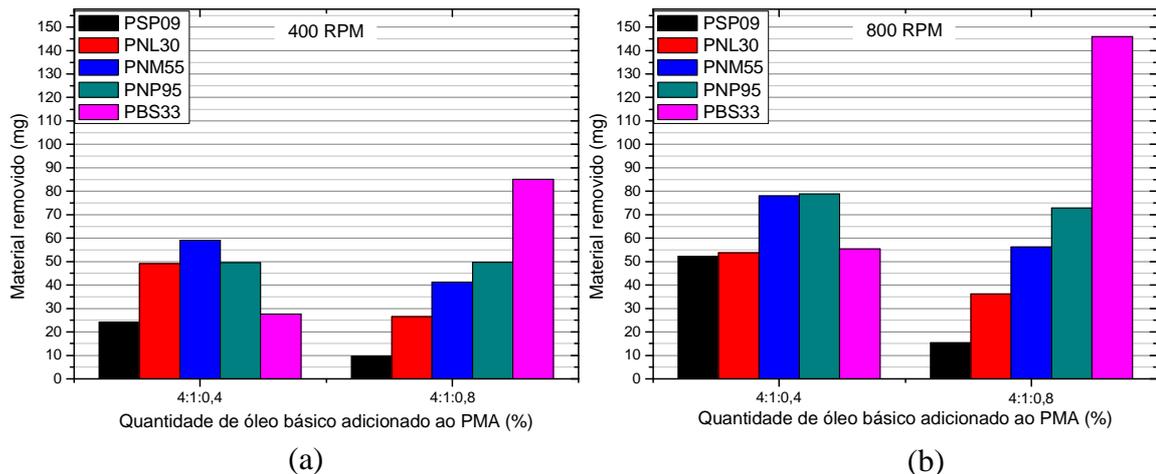


Figura 5.15 – Remoção de material vs proporção do PMA (a) 400 RPM e (b) 800 RPM.

O elemento PBS33 também se comportou de maneira inesperada em relação à temperatura e ao comportamento do pó magnético-abrasivo ao qual foi adicionado, quando na quantidade de 16% em massa, e a uma rotação imposta à peça igual a 800 RPM. A Figura 5.16 mostra os valores de temperatura medidos na área em usinagem ao longo dos testes do Experimento 2, com pós magnético-abrasivos com adição de 8% de óleo básico. Distinguem-se os valores medidos a 400 e 800 RPM, sendo mais elevados os resultados referentes a estes últimos. Em ambas as rotações, as temperaturas mais altas são obtidas com o uso dos óleos PNP95 e PNM55, cujas curvas em função do tempo são bastante próximas. Os demais elementos aglutinantes apresentaram faixas de temperatura mais baixas, com as menores temperaturas obtidas pelo óleo PBS33.

A Figura 5.17 apresenta as temperaturas medidas ao longo do tempo na região em usinagem, para os testes realizados com adição de 16% de óleo básico ao pó magnético-abrasivo. Via de regra, temperaturas mais baixas são atingidas nos testes realizados com adição dos óleos PSP09, PNL30, PNM55 e PNP95.

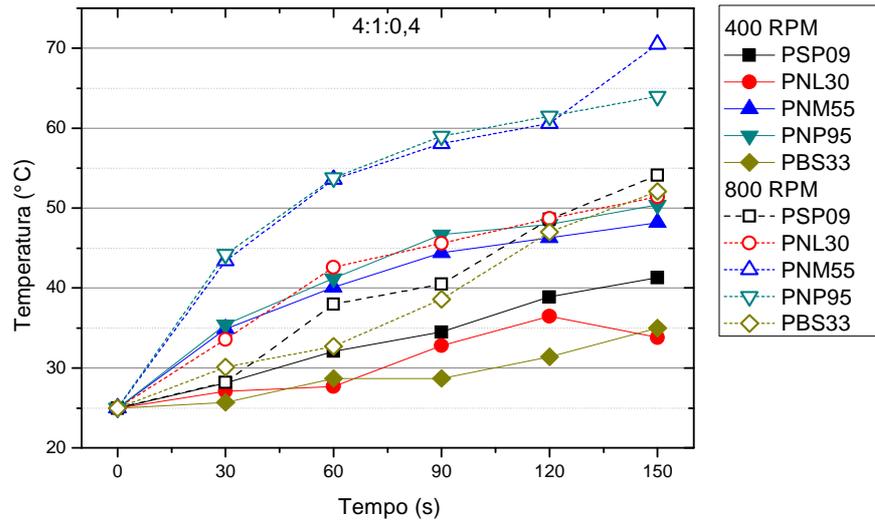


Figura 5.16 – Temperatura na superfície de peças nos testes com 8% de óleo básico.

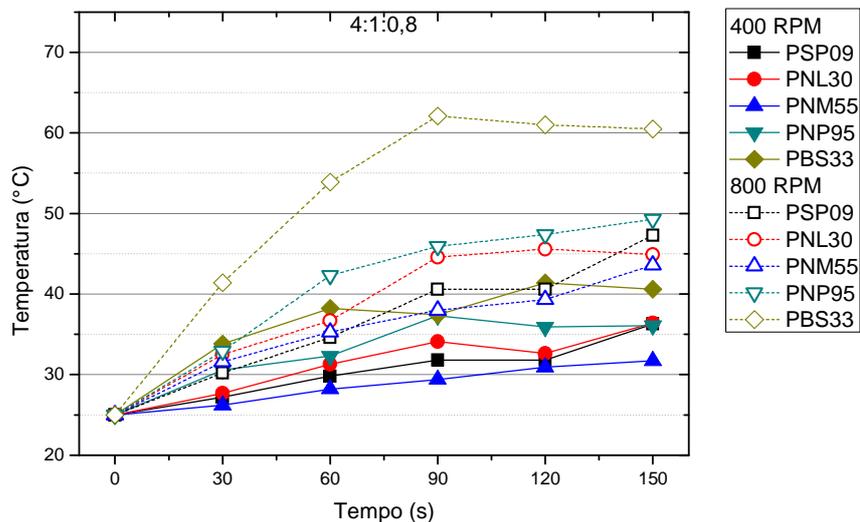


Figura 5.17 – Temperatura na superfície de peças nos testes com 16% de óleo básico

De acordo com a Figura 5.17, o único elemento a atingir temperaturas mais elevadas quando adicionado em maior quantidade ao PMA foi o óleo *Bright Stock* (PBS33). Este comportamento se repetiu em ambas as velocidades, o que condiz com o fato deste elemento ser o único a permitir maior remoção de material quando presente em maior quantidade. Ambos os fatos (maior temperatura e remoção de material) são indicativos fortes de que a adição deste elemento permite uma maior força de corte, se devendo esta mais às características tribológicas do óleo (em especial, as relacionadas às componentes da força adesiva) do que à força magnética propriamente dita. Além da temperatura e taxas de remoção de material mais elevadas, quatro outras evidências reforçam este argumento:

- Nos instantes iniciais do processo, com o PMA na proporção 4:1:0,8 e uma rotação de 800 RPM, ocorre, na adição deste, o rolamento das partículas, do modo como descrito por Chang et al., 2001, e ilustrado na Figura 3.8, indicativo claro de perda de coesão da escova magnética flexível devido à redução na força magnética. Também os resultados obtidos por Shinmura, 1984, ao avaliar a influência da quantidade e tipo de óleo adicionado ao pó magnético abrasivo, sugerem que a permeabilidade magnética de uma mistura diminui com o aumento de sua concentração e viscosidade;
- O acabamento superficial resultante da condição supracitada é significativamente pior do que o que seria esperado através da análise dos demais resultados, o que sugere que, uma vez que houve forte remoção de material, esta tenha sido mal distribuída pela limitação ao movimento das partículas abrasivas causada por excessiva força adesiva;
- A quantidade de PMA recolhida após os ensaios realizados sob estas condições é sensivelmente menor do que o resíduo obtido nas demais condições, indicando que parte desse material tenha sido perdida nos instantes iniciais do processo;
- Ao término do ensaio, há uma quantidade significativa de material aderido ao corpo de prova, formando uma pasta espessa, em clara demonstração da força adesiva deste elemento. A Figura 5.18 mostra o estado do corpo de prova ao final do ensaio.



Figura 5.18 – Corpo de prova após usinagem com 16% de óleo PBS33, a 800 RPM.

A piora no acabamento e o aumento na remoção de material observados para o pó magnético-abrasivo com adição de óleo *bright stock* na proporção 4:1:0,8 se devem a uma combinação de maior força viscosa, devido à maior taxa de cisalhamento na zona de corte, aliada à elevada viscosidade cinemática do óleo básico, e maior tensão superficial, resultando em uma força adesiva de magnitude mais elevada que as demais, ainda que com maior quantidade de lubrificante.

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam, na forma de gráficos com duplo eixo y, resultados de rugosidade média Ra e remoção de material, para as velocidades de corte obtidas com a aplicação de rotações de 400 e 800 RPM. A representação de ambas as variáveis de resposta em um mesmo gráfico permite uma comparação direta entre a influência dos parâmetros avaliados sobre o resultado do processo. Como discutido anteriormente, com o aumento na quantidade do elemento aglutinante, ocorre o aumento da rugosidade (declividade positiva), em conjunto com a diminuição na taxa de remoção de material para todos os elementos exceto o óleo PBS33, que apresenta comportamento oposto (maior remoção de material e melhor acabamento superficial obtido com o PMA contendo maior concentração de óleo básico).

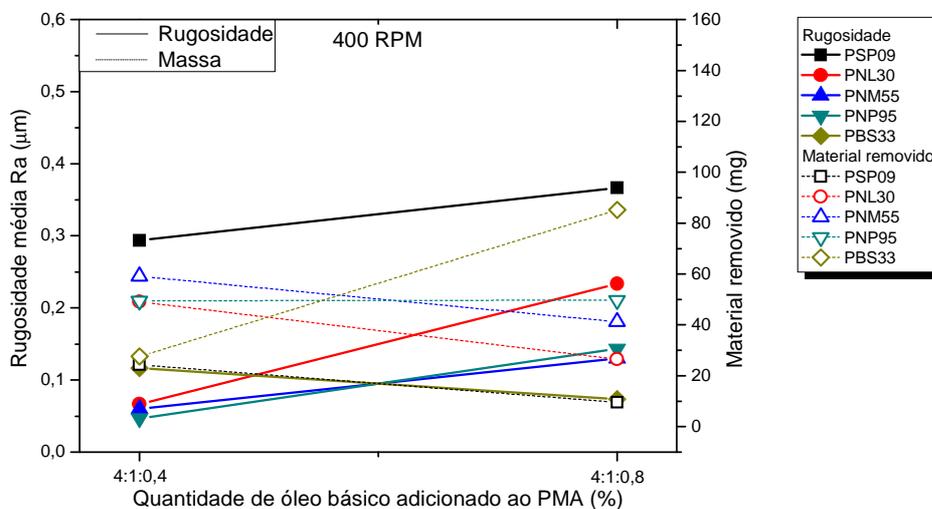


Figura 5.19 – Resultados combinados de rugosidade e remoção de material (400 RPM).

Os resultados obtidos a 800 RPM mantêm a tendência de piora no acabamento superficial associada a maiores concentrações de óleos adicionados ao pó magnético-abrasivo. As exceções são verificadas para o elemento PNP95, em relação à variável de resposta rugosidade e, novamente, para o óleo PBS33. Neste caso, porém, ambas as curvas obtidas possuem declividade positiva, o que significa que há um aumento na remoção de material associado a uma piora no acabamento superficial.

A análise de variância dos resultados do procedimento chamado Experimento 2 é apresentada na Tabela 5.2. Os resultados mostram que, para o intervalo de confiança usado ( $\alpha=0,05$ ), todas as fontes possuem influência significativa. Em relação aos efeitos de interação, a única a não causar diferenças significativas é a referente à combinação entre rotação e proporção de elemento aglutinante (fonte BD). Porém, apesar desta interação não ser significativa considerando-se todas as fontes avaliadas, ao menos um óleo lubrificante (PBS33) a demonstra, conforme discutido anteriormente.

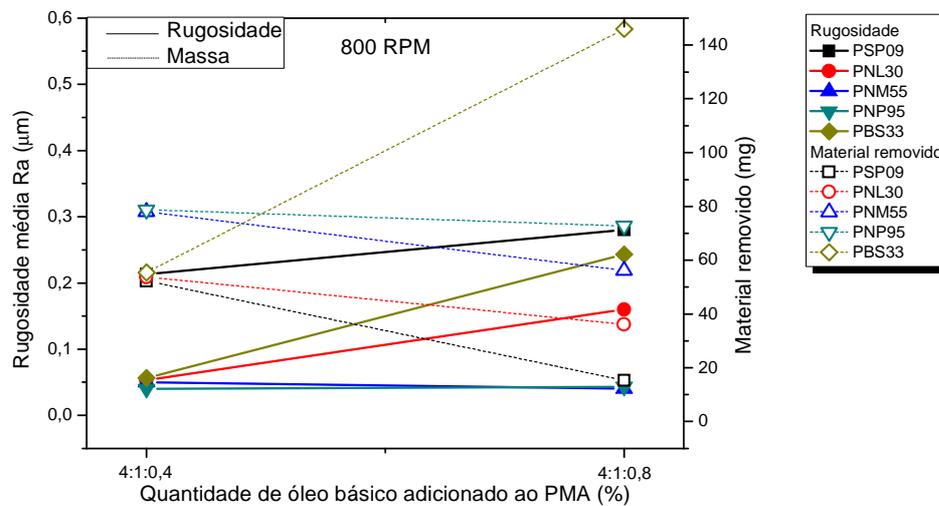


Figura 5.20 – Resultados combinados de rugosidade e remoção de material (800 RPM).

Tabela 5.2 – Análise de variância para o Experimento 2.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média Quadrática	F calc.	F tab.	≠ Significativa?
Óleo (A)	0,379	4	0,095	117,60	2,61	<b>SIM</b>
Rotação (B)	0,017	1	0,017	21,50	4,09	<b>SIM</b>
Proporção (D)	0,079	1	0,079	98,19	4,09	<b>SIM</b>
SQAB	0,032	4	0,008	9,86	2,61	<b>SIM</b>
SQAD	0,019	4	0,005	5,8	2,61	<b>SIM</b>
SQBD	0,000	1	0,000	0,07	4,09	<b>NÃO</b>
SQABD	0,054	4	0,013	16,69	2,61	<b>SIM</b>
Erro	0,032	40	0,001			
Total	0,613	59	$\alpha = 0,05$			

Inicialmente, considerou-se que a piora se devesse à maior força de corte, devido à maior força de adesão. Porém, o que se observou foi menor força de corte, evidenciada pela

menor remoção de material, em especial a baixas velocidades de corte. Esta força de corte mais baixa se deve a uma combinação de fatores, a saber:

- menor permeabilidade magnética do PMA, devido aos filmes lubrificantes de maior espessura e mais distribuídos, impedindo ou dificultando o contato metal-metal;
- menor adesão devido às forças de menisco, uma vez que a quantidade de fluido é demasiada, gerando, na prática, menos meniscos;
- maior lubrificação da zona de corte, permitindo maior movimentação entre as partículas abrasivas, com consequente aumento no rolamento e deslizamento destas;

A execução do processo com velocidades de corte mais elevadas permite um aumento na eficiência do processo, tanto no que diz respeito a acabamento superficial quanto à remoção de material. Isto porque, devido à maior força viscosa causada pelo aumento na taxa de cisalhamento, a tendência de rolamento e deslizamento das partículas abrasivas é sensivelmente reduzida. Esta .

Os óleos menos viscosos e de menor tensão superficial tendem a apresentar menores taxas de remoção de material e, conseqüentemente, piores acabamentos superficiais em intervalos curtos de tempo. O motivo para tanto se deve à menor adesão entre as partículas magnéticas e abrasivas, devido à combinação de forças de menisco e viscosas de menor intensidade, e a menores forças de cisalhamento viscosas. O aumento da rotação causa o aumento das componentes referentes à força viscosa necessárias para separar duas superfícies, como pode indicar as equações 2.28 a 2.30, e de cisalhamento. Desse modo, em velocidades de corte mais elevadas, há um aumento expressivo na coesão entre partículas, causando maior remoção de material.

## 6. CONCLUSÕES

De modo geral, o presente trabalho consistiu em um estudo sobre o processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo, iniciando com o desenvolvimento dos equipamentos utilizados na execução deste e evoluindo ao estudo da influência de diferentes parâmetros sobre os resultados através dele obtidos. Em particular, avaliaram-se as características tribológicas relacionadas ao pó magnético-abrasivo, em especial as propriedades do óleo lubrificante adicionado a este como elemento aglutinante (viscosidade cinemática, índice de viscosidade e tensão superficial) e sua proporção, em massa.

Através da execução de duas séries de testes (Experimento 1 e 2), avaliaram-se os efeitos de características até então consideradas de pequena importância relacionadas ao processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo sobre suas variáveis de resposta, a saber, acabamento superficial e remoção de material, avaliados através da rugosidade média Ra e da pesagem dos corpos de prova. A análise dos resultados obtidos permite as seguintes conclusões, corroboradas pela teoria e pela análise de variância:

- O tipo de elemento aglutinante, no caso o óleo adicionado ao pó magnético-abrasivo influencia significativamente os resultados do processo. Uma vez que os elementos adicionados ao PMA são óleos básicos, sem adição de aditivos que possam alterar suas características, isto significa haver influência de suas propriedades, em especial da viscosidade cinemática, sobre os resultados do processo.
- As características tribológicas dos elementos aglutinantes contribuem com a força de corte, através do aumento da adesão entre as partículas magnéticas e abrasivas e do aumento da força de cisalhamento viscosa. Desse modo, o efeito da temperatura de usinagem sobre os óleos de baixo índice de viscosidade e viscosidade elevada causa a variação de seu comportamento ao longo do tempo de usinagem, de modo que os PMAs preparados com elementos que possuam estas características (no caso, o óleo *bright stock*) necessitam, em especial a baixas rotações, de um período inicial, no qual ocorre baixa remoção de material aliada a maiores rugosidades, até que o elemento lubrificante entre em regime. Desse modo, o mesmo elemento pode gerar componentes com elevada rugosidade a baixas rotações (ou curtos intervalos de usinagem) e baixa rugosidade em velocidades de corte mais elevadas (ou maiores tempos de processamento).

- Verifica-se uma interação entre a viscosidade do elemento aglutinante e a rotação imposta à peça, bem como o tempo de usinagem. Esta interação é mais forte nos extremos testados de viscosidade, de modo que estes elementos são mais suscetíveis ao efeito do comprimento efetivo de corte.
- Foi observada relação direta entre quantidade de material removido e acabamento superficial, com maiores taxas de remoção de material associadas a melhores acabamentos superficiais. Uma exceção é feita para o caso de óleos de viscosidade elevada, adicionados em maiores concentrações e a velocidades de corte elevadas, que geram alta remoção de material aliada com elevada rugosidade.
- O aumento da quantidade de óleo básico adicionado ao PMA gerou resultados diretamente relacionados às demais condições de usinagem. Em baixas velocidades de corte, este aumento causa a perda de qualidade do acabamento superficial, aliada à redução na remoção de material. No entanto, a altas rotações, apesar da piora observada nos resultados relativos aos óleos de mais baixa viscosidade (PSP09 e PNL30), há, para os óleos PNM55 e PNP95, pouco ou nenhum efeito significativo sobre o acabamento superficial. O óleo PBS33 se comporta de maneira diferente: apesar de permitir melhor acabamento superficial em maior concentração na rotação inferior, há um forte aumento na rugosidade obtida a 800 RPM. O aumento na quantidade deste elemento sempre gera maior remoção de material.
- Em geral, o aumento da concentração de óleo lubrificante no PMA resultou em queda no desempenho, tanto na remoção de material quanto na obtenção de melhores acabamentos superficiais. Novamente, é feita uma exceção o óleo de viscosidade mais elevada (*Bright stock*), que permite maior remoção de material e obtenção de menor rugosidade na velocidade de corte mais baixa. Na rotação mais elevada, no entanto, há efetiva deterioração no acabamento superficial, associada a maior remoção de material. Isto se deve à maior força adesiva causada por este, em detrimento da força magnética, prejudicada pela maior espessura e distribuição do filme fluido, resultando em uma remoção irregular de material.
- Em relação aos elementos adicionados ao pó magnético-abrasivo como aglutinante, as principais características a serem consideradas correspondem à

viscosidade (relacionada à classe do material), concentração (proporção, em massa ou percentual, adicionada ao PMA) tensão superficial e índice de viscosidade.

- O uso de óleos de baixa viscosidade resulta na obtenção de piores acabamentos superficiais, bem como em menor taxa de remoção de material, devido à menor força adesiva resultante entre as partículas magnéticas e abrasivas.
- Em relação ao acabamento superficial, melhores resultados são obtidos através do uso de óleos de viscosidade cinemática intermediária. Via de regra, menores rugosidades são obtidas para os óleos PNM55 e PNP95 (viscosidades cinemáticas iguais a 50,8 e 71,8 cSt a 40°C). Em condições específicas, bons acabamentos são também obtidos com o uso dos demais óleos lubrificantes.
- Os resultados obtidos, longe de esgotar o assunto, demonstram a influência das características tribológicas do elemento aglutinante sobre o resultado do processo de acabamento magnético-abrasivo, e a sensibilidade do ajuste dos parâmetros a estas relacionados.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através da realização do presente estudo, foram desenvolvidas as seguintes sugestões para estudos futuros, cuja execução permitiria a obtenção de dados complementares aos já obtidos.

- a) Avaliação da influência da adição de óleo sobre a permeabilidade magnética do PMA

Uso de histeresímetro de entreferro variável e bobina exploratória para a avaliação das características magnéticas de uma mistura confinada em recipiente de forma e dimensões conhecidas.

- b) Avaliação da influência da tensão superficial do elemento aglutinante sobre o acabamento magnético-abrasivo

Uso de óleos básicos com adição de elementos visando reduzir a tensão superficial com o mínimo dano à viscosidade.

- c) Avaliação das características topográficas das superfícies geradas

Aplicação de técnicas de microscopia eletrônica e de força atômica para avaliar a influência dos parâmetros de processo sobre a topografia dos componentes gerados.

- d) Desenvolvimento de dispositivos para a execução do processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico interno e de acabamento magnético-abrasivo frontal

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altareva, G.I.; Vorob'eva, L. A.; Gafarov, R. R.; Efremov, V. D.; Skvorcheskii, N. A.; Kalina, V. N. Use of magnetic abrasive machining for sharpening of medical instrument blades, **Biomedical Engineering**, v. 26, p. 148-152, 1992.

Amorim, H.J.; Cândido, L. H. A.; Lorini, F. J., 2006. Influência da granulometria do pó de ferro e de alumina, da rotação e do tempo de processamento no acabamento magnético-abrasivo cilíndrico de aços médio carbono. **Anais do CONEM 2006**, Recife, 2006.

Amorim, H.J.; Gomes, M. S.; Lorini, F.J. Parametric Evaluation of Cylindrical Magnetic Abrasive Finishing Process, **Proceedings of COBEM 2007**, Brasília, 1997.

Agência Nacional do Petróleo. Regulamento técnico ANP nº004/99. **Portaria ANP nº 129/1999**, Brasília, 1999.

Bhushan, B. **Introduction to Tribology**. John Wiley & Sons, New York, 2002.

Bhushan, B. Adhesion and stiction: mechanisms, measurement techniques, and methods for reduction. **Journal of Vacuum Science & Technology**, v. B 21(6), p. 2262-2296, 2003.

Ferreira, J.P.M. Tensão superficial – sua natureza e efeitos. **Boletim da Sociedade Portuguesa de Química**, nº 93. Vila do Conde, p. 43-48, 2004.

Chang, G.W.; Yan, B.H.; Hsu, R.T. Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbounded magnetic abrasives. **International Journal of Machining Tools and Manufacture**, v. 42. Londres, p. 575-583, 2002.

Gogaev, K.A.; Nepomnyashchii, V.V.; Mosina, T.V.; Neshpor, I.P.; Leonowicz, M. Special Features of the Magnetic Abrasive Machining. **Refractories and Industrial Ceramics**, v. 47, Nº 1, p. 53-55, 2006.

Gomes, M.S. **Desenvolvimento de um dispositivo para a execução do processo de acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo auxiliado por vibração**. Trabalho de diplomação, DEMEC/UFRGS. Porto Alegre, 2007.

Groeff, J.L.E. **A B C du graissage**. Ed. Technip, Paris, 1961.

Groover, M.P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes, and systems** – 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons Inc., EUA, 2006.

Jain, V.K.; Kumar, P.; Behera, P.K.; Jayswal, S.C. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process, **Wear**, v. 250, Londres, p. 384-390, 2001.

Ko, S. L.; Baron, Y. M.; Park, J. I. Micro deburring for precision parts using magnetic abrasive finishing method, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 187-188, p. 19-25, 2007.

Kremen, G. Z.; Elsayed, E. A.; Ribeiro, J. L. Machining time estimation for magnetic abrasive processes. **International Journal of Production Research**, v. 32, Issue 12, p. 2817-2825, 1994.

Kremen, G.Z.; Elsayed, E.A.; Rafalovich, V.I. Mechanism of material removal in the magnetic abrasive process and the accuracy of machining. **International Journal of Production Research**, v. 34, Issue 9, Pages 2629-2638, 1996.

Leonhart, C. **Desenvolvimento e estudo do processo de acabamento por abrasão eletromagnética**. Trabalho de diplomação, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2003.

Leonhart, C.; Amorim, H. J. Desenvolvimento e estudo do processo de acabamento por abrasão eletromagnética. **Anais do CONEM 2004**, Belém, 2004.

Matthewson, M.J.; Mamin, H.J. Liquid-mediated adhesion of ultra-flat solid surfaces. **Proc. Mat. Res. Soc. Symp**, 119, p. 87-92, 1988.

Mcfarlane, J. S.; Tabor, D. Adhesion of solids and the effects of surface films. **Proc. Roy. Soc. Lond. Série A**, 202. Londres, p. 224-243, 1950.

Montgomery, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. Ed. Wiley, 2004.

Mori, T.; Hirota, K.; Kawashima, Y. Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143-144, p. 682-686, 2003.

Newale, M. J. **The Tribology Handbook (2<sup>nd</sup> ed.)**. Butterworth-Heinemann. Oxford, 1995.

Singh, D.K.; Jain, V.K.; Raghurama, V.; Komanduri, R. Analysis of surface texture generated by a flexible magnetic abrasive brush. **Wear**, v. 259, p. 1254-1261, 2005.

Shinmura, T.; Takazawa, K.; Hatano, E.; Aizawa, T. Study on Magnetic finishing Process – Finishing Characteristics. **Bull Japan Society of Precision Engineering**, v. 18, n<sup>o</sup>4 p. 347-348, 1984.

Shinmura, T.; Takazawa, K.; Hatano, E.; Aizawa, T. Study on Magnetic finishing Process – Process Principle and Finishing Possibility. **Bull Japan Society of Precision Engineering**, v. 19, n<sup>o</sup>3, p. 54-55, 1985.

Shinmura, T.; Takazawa, K.; Hatano, E.; Aizawa, T. Study on Magnetic finishing Process – Application to Edge Finishing. **Bull Japan Society of Precision Engineering**, v. 19, n<sup>o</sup>3, p. 218-220, 1985.

Shinmura, T.; Takazawa, K.; Hatano, E. Study on Magnetic finishing Process – Effects of Machining Fluid on Finishing Characteristics. **Bull Japan Society of Precision Engineering**, v. 20, n<sup>o</sup>1, p. 52-54, 1986.

Shinmura, T.; Takazawa, K.; Hatano, E. Study on Magnetic finishing Process – Effects of Various Types of magnetic Abrasives on Finishing Characteristics. **Bull Japan Society of Precision Engineering**, v. 21, n<sup>o</sup>2, p. 139-141, 1987.

Shinmura, T. Development of a Unit System Magnetic Abrasive Finishing Apparatus Using Permanent Magnets. **Bull Japan Society of Precision Engineering**, v. 23, n°4, p. 313-315, 1989.

Stachowiak, G.W.; Batchelor, A.W. **Engineering Tribology (2nd ed.)**. Butterworth-Heinemann, Austrália, 2000.

Stepanova, O.V.; Uvarova, I.V. Effect of magnetic-abrasive treatment on wear resistance of hard alloy inserts with diffusion coatings based on TiC. **Poroshk. Metall.**, n°. 11-12, p. 21-28, 2002.

Stepanova, O.V.; Uvarova, I.V.; Smirnov, V.P.; Timofeeva, I. I.; Rogozinskaya, A.A. Effect of Magnetic Abrasive finishing on the Chemical and Phase composition of TiC coatings on VK8 Alloy. **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, v. 44, n°. 9-10, p. 451-454, 2002.

Yamaguchi, H.; Shinmura, T. Study of the surface modification resulting from an internal magnetic abrasive finishing process. **Wear**, v. 225-229, p. 246-255, 1999.

Yamaguchi, H.; Shinmura, T.; Kobayashi, A. Development of an internal magnetic abrasive finishing process for non-ferromagnetic complex shaped tubes. **JSME International Journal**, v. 44, n° 1, p 275-281, 2001.

Yamaguchi, H.; Shinmura, T. Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process, **Precision Engineering**, v. 28, p. 135-142, 2003.

Yan, B.H.; Chang, G. W.; Cheng, T. J.; Hsu, R. T. Electrolytic magnetic abrasive finishing. **International Journal of Machining Tools and Manufacture**, v. 43, p. 1355-1366, 2003.

Yin, S.; Shinmura, T. A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing. **International Journal of Machining Tools and Manufacture**, v. 44, pp. 1297-1303, 2004.

Yin, S.; Shinmura, T. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy. **International Journal of Machining Tools and Manufacture**, v. 44, p. 383-390, 2004.

## **PUBLICAÇÕES GERADAS POR ESTE TRABALHO**

Amorim, H. J.; Lorini, Flávio J. The influence of lubricant properties in magnetic abrasive finishing. **Proceedings of COBEM 2009 - 20th International Congress of Mechanical Engineering**, 2009.

Amorim, H. J.; Lorini, Flávio J. Estudos sobre o processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo. **Anais do Usinagem 2008 – Feira e Congresso**, 2008.

Amorim, H.J.; Gomes, M.S.; Lorini, F. J. Parametric evaluation os cylindrical magnetic abrasive finishing process. **Proceedings of COBEM 2007 - 19th International Congress of Mechanical Engineering**. 2007.

Gomes, M.S.; Amorim, H.J.; Wiedenhof, A.G.; Lorini, F. J. Estudo da influência da frequência de vibração no processo de acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo. **Anais do CIBIM 8 - Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**, 2007.

Amorim, H.J.; Cândido, L.H.A.; Lorini, F.J. Influência da granulometria dos pós de ferro e de alumina, da rotação e do tempo de processamento no acabamento magnético-abrasivo de aços médio carbono. **Anais do CONEM 2006 - IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2006.

Leonhart, C.; Amorim, H.J. Desenvolvimento e estudo do processo de acabamento por abrasão eletromagnética. **Anais do CONEM 2004 - Congresso Nacional de engenharia Mecânica**, 2004.

## APÊNDICE A – TESTES PRELIMINARES

Nesta seção são apresentados experimentos realizados nos estágios iniciais de pesquisa, e que constituem conhecimento fundamental para a realização de testes exploratórios para o entendimento de parâmetros específicos. No procedimento experimental descrito a seguir, foram estudados os efeitos de diversos parâmetros de processo sobre o acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo, permitindo a definição de condições adequadas à realização dos ensaios apresentados no corpo da tese.

### A.1 Procedimento Experimental

O procedimento experimental adotado para a definição dos parâmetros de processo utilizados no trabalho foi dividido em quatro fases, nas quais foram testadas condições referentes a características do pó magnético-abrasivo, a fim de avaliar a influência dos elementos abrasivos e aglutinantes utilizados, e ensaios de tempo de renovação de partículas.

Os testes foram executados em seqüência, com os resultados obtidos em um ensaio sendo aplicados nos experimentos seguintes. Desse modo, o primeiro teste realizado definiu a partícula abrasiva usada nos demais, com o segundo definindo o elemento aglutinante. No teste seguinte foi determinada a quantidade ideal deste elemento, com o último ensaio avaliando a influência do tempo de renovação do pó magnético-abrasivo no resultado do processo.

O parâmetro avaliado em todos os testes realizados foi o acabamento superficial, através da medição da rugosidade média  $Ra$ . A medição do acabamento superficial foi feita com a utilização de um rugosímetro digital *Mitutoyo*, modelo *Surftest SJ-201*. As medições foram executadas em regiões equidistantes  $120^\circ$  no corpo de prova, localizadas próximas ao comprimento central da área usinada.

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de uma única barra retificada de aço ABNT 1045, de diâmetro igual a 25 mm e comprimento de 98 mm. Para a proteção do corpo de prova na sua fixação na placa do torno utilizou-se uma bucha de nylon, impedindo contato entre as partes metálicas. Para uma rugosidade média original do material igual a  $0,58 \mu m Ra$ , com desvio padrão de  $0,04 \mu m$ , ensaiaram-se apenas corpos de prova cujas médias de rugosidade  $Ra$  se situaram até um desvio padrão acima ou abaixo desta média.

Os parâmetros adotados neste estudo baseiam-se em estudos anteriormente realizados (Leonhart e Amorim, 2004; Leonhart, 2003; Amorim et al., 2006; Amorim et al., 2007). Os parâmetros de vibração foram adotados com base no estudo realizado por Gomes, 2007.

#### A.1.1 Definição do elemento abrasivo

Estes testes visam determinar o material abrasivo mais adequado para uso no acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo. Dois diferentes materiais, com diferentes granulometrias foram utilizados, de acordo com a Tabela A.1. A proporção entre a quantidade, em massa, dos materiais magnético, abrasivo e aglutinante foi mantida constante, e a partícula magnética utilizada foi pó de ferro fundido, com tamanho médio de grão igual a 180,58  $\mu\text{m}$ . A Tabela A.2 ilustra as condições de operação adotadas ao longo do experimento.

Tabela A.1 – Materiais abrasivos testados.

Material	Granulometrias médias ( $\mu\text{m}$ )
Alumina calcinada	88,32; 41,74
Alumina eletrofundida	92,55; 27,59

Tabela A.2 – Parâmetros de processo.

Parâmetro	Valor
Rotação (RPM)	400
Entreferro (mm)	1
Elemento lubrificante/aglutinante	Óleo SAE 20W40
Proporção da mistura (Fe:abrasivo:lubrificante)	4:1:0,4
Intervalo de tempo (min)	5
Tempo total de usinagem (min)	15
Quantidade de pó magnético-abrasivo (g)	6
Frequência de vibração (Hz)	5
Amplitude de vibração (mm)	1

#### A.1.2 Definição do elemento aglutinante

Nestes testes, procurou-se identificar o grau de influência do elemento aglutinante adicionado ao PMA sobre o processo de acabamento magnético-abrasivo. Foram realizados ensaios com seis diferentes tipos de lubrificante (três sólidos e três óleos), além de um corpo de prova de referência, usinado com o uso de pó magnético-abrasivo não-ligado (sem adição de elemento aglutinante).

Os testes foram executados de acordo com projeto fatorial de experimentos, com sete níveis de lubrificante e dois de velocidades de corte, totalizando quatorze repetições. Os parâmetros mantidos a níveis fixos foram o tempo de ensaio, frequência e amplitude de vibração, voltagem aplicada ao eletroímã e a proporção ferro/alumina/lubrificante no pó magnético-abrasivo (4:1:0,4). Os ensaios foram realizados na presença de vibrações, com os parâmetros de processo representados na Tabela A.3. A Tabela A.4 apresenta os elementos aglutinantes testados.

Tabela A.3 – Parâmetros para testes de definição do elemento aglutinante.

Parâmetro	Valores
Rotação (RPM)	400; 800
Vc (m/s)	0,52; 1,04
Tempo de ensaio (min)	5 min
Granulometria média do pó de ferro	180,58 $\mu\text{m}$
Granulometria média do pó de alumina	88,32 $\mu\text{m}$
Frequência de vibração (Hz)	5
Amplitude de vibração (mm)	1

Tabela A.4 – Elementos aglutinantes testados.

Condição	Elemento aglutinante
A	Não adicionado
B	Talco
C	Stearato de Zn ( $\text{C}_{36}\text{H}_{70}\text{ZnO}_4$ )
D	Stearato de Ca ( $\text{C}_{36}\text{H}_{70}\text{CaO}_4$ )
E	Óleo SAE 20W40
F	Óleo multiuso
G	Óleo ISO VG32

A Tabela A.5 mostra as características de cada óleo lubrificante testado, de acordo com dados informados pelos fabricantes. Óleos com características semelhantes foram usados por Jain et al., 2001 (óleo lubrificante com índice de viscosidade a 40°C de 11-14 cst), e Chang et al., 2002 (óleo SAE 30W). O uso de óleo automotivo SAE 20W40 foi adotado em trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Usinagem da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Leonhart e Amorim, 2004; Leonhart, 2003; Amorim et al., 2006; Amorim et al., 2007).

Tabela A.5 – Características dos óleos lubrificantes testados.

Óleo	Classificação	Densidade	Viscosidade a 40°C	Viscosidade a 100°C
E	SAE 20W40	-	126 cSt	16,3 cSt
F	-	0,8504 $\text{kg/m}^3$ a 20°C	9,6 cSt	-
G	ISO VG32	0,876 $\text{kg/m}^3$ a 40°C	32,1cSt	5,1cSt

### A.1.3 Testes para definição da quantidade de elemento aglutinante

Estes testes têm como objetivo avaliar a influência da quantidade de elemento aglutinante adicionada ao pó magnético-abrasivo no acabamento superficial dos corpos de prova ensaiados. Os parâmetros adotados foram os mesmos dos testes para avaliação do elemento aglutinante (Tabela A.3), com o óleo hidráulico (G), definido através do procedimento descrito na seção A.1.2. A proporção de óleo lubrificante adicionada ao pó magnético-abrasivo foi definida em função da quantidade de óxido de alumina presente na mistura. Desse modo, a condição 4:1:0,4 significa que para cada parte de alumina, quatro de pó de ferro e 0,4 de óleo lubrificante foram adicionadas. A Tabela A.6 mostra a proporção, em massa, dos componentes do pó magnético-abrasivo.

Tabela A.6 – Proporção, em massa, dos diferentes componentes do PMA.

Condição	Proporção da mistura Fe:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Lubrificante
A	4:1:0,0
B	4:1:0,2
C	4:1:0,4
D	4:1:0,6
E	4:1:0,8

### A.1.4 Tempo de parada e renovação do pó magnético-abrasivo

Nestes testes foi feita uma comparação relativa ao tempo de renovação do pó magnético-abrasivo. Considerando-se que as partículas abrasivas estão sujeitas ao desgaste, o objetivo é avaliar seu comportamento com diferentes taxas de reposição, e se há, realmente, necessidade de reposição em taxas maiores que as até então utilizadas.

Duas diferentes abordagens foram adotadas: na primeira, três diferentes tempos de reposição foram utilizados (1, 2,5 e 5 min), a duas rotações (400 e 800 RPM), buscando avaliar possíveis efeitos de interação, esperados uma vez que o desgaste por abrasão é, em teoria, diretamente proporcional à velocidade do movimento relativo. As características do pó magnético-abrasivo são as definidas nas seções anteriores (Tabela A.7). Os parâmetros de processo, à exceção dos tempos de renovação do PMA, são dados pela Tabela A.3. Devido aos diferentes intervalos de tempo utilizados, a comparação foi realizada na única parada comum a todos os testes, após 5 minutos de usinagem.

Tabela A.7 – Características do pó magnético abrasivo.

Parâmetro	Valores
Material Ferromagnético	Ferro fundido cinzento
Granulometria do pó magnético	180,58 $\mu\text{m}$
Material abrasivo	$\text{Al}_2\text{O}_3$ calcinada
Granulometria media do pó abrasivo	88,32 $\mu\text{m}$
Elemento lubrificante	Óleo ISO VG32
Proporção Fe: $\text{Al}_2\text{O}_3$ :Lub	1:4:0,4

A segunda abordagem foi adotada devido à necessidade de comparação entre os resultados ao longo do tempo de usinagem do material, e consiste na comparação entre os experimentos realizados com intervalo de 1 minuto e um teste do tipo *split-plot*, no qual diferentes corpos de prova foram usinados durante intervalos de tempo crescentes, com intervalos de 1 minuto. Desse modo, foi possível a avaliação do comportamento ao longo do tempo sem que houvesse necessidade de interromper o processo. A aplicabilidade deste tipo de ensaio depende da uniformidade da condição inicial dos corpos de prova.

## A.2 Resultados e discussão

A seguir são apresentados os resultados obtidos através da execução do procedimento experimental descrito no Apêndice A, com as devidas discussões e análises estatísticas.

### A.2.1 Resultados Experimentais - Material Abrasivo

A Tabela A.8 mostra a análise de variância dos ensaios para definição do elemento abrasivo, com intervalo de confiança  $\alpha$  igual a 0,05. Este procedimento de análise estatística avalia a influência de um parâmetro sobre o resultado obtido através da comparação entre a constante  $F$  de *Fischer* calculada em função dos resultados experimentais (média quadrática e erro) e a constante tabelada em função das características do experimento (graus de liberdade das fontes e da componente do erro) para cada fonte. A fonte  $A$  é a granulometria usada, classificada como grossa ( $A_1$ ) ou fina ( $A_2$ ), uma vez que não foi possível usar sempre a mesma granulometria para diferentes materiais. A Fonte  $B$  é o material, e  $C$  o tempo de processamento. Os resultados mostram que, para os parâmetros testados, todas as fontes geram diferenças estatisticamente significativas para o intervalo de confiança usado e que o único efeito de interação significativo ocorre entre o elemento aglutinante e sua granulometria.

Tabela A.8 – Análise de variância dos testes de abrasivo.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média Quadrática	F calc.	F tab.	≠ Significativa
Granulometria (A)	0,03	1	0,032	9,76	4,26	SIM
Abrasivo (B)	0,50	1	0,499	150,44	4,26	SIM
Tempo (C)	0,03	2	0,014	4,10	3,40	SIM
SQAB	0,02	1	0,017	5,09	4,26	SIM
SQAC	0,02	2	0,008	2,38	3,40	NÃO
SQBC	0,00	2	0,001	0,20	3,40	NÃO
SQABC	0,01	2	0,005	1,45	3,40	NÃO
Erro	0,08	24	0,003			
Total	0,68	35		$\alpha=0,05$		

Os resultados de rugosidade média  $Ra$  em função do tempo para todos os diferentes abrasivos são mostrados na Figura A.1. A análise dos dados experimentais mostra que melhores acabamentos superficiais são obtidos através do uso de alumina calcinada como elemento abrasivo e que a granulometria mais fina permite a obtenção de melhores resultados (principalmente para os testes realizados com alumina eletrofundida). Também se verifica tendência, em especial no caso do óxido de alumínio calcinado, de promover melhora acentuada durante os primeiros minutos de corte, encaminhando o processo a um nível de saturação após certo intervalo de tempo.

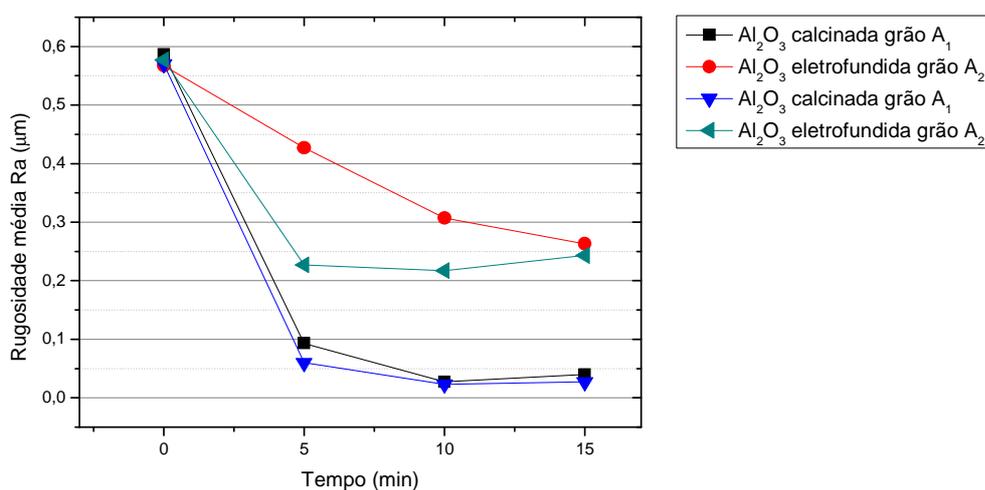


Figura A.1 – Resultados em função do tempo para diferentes abrasivos.

A Figura A.2a apresenta os resultados de rugosidade  $Ra$  em função da granulometria para diferentes abrasivos. O melhor desempenho foi obtido com o uso de alumina calcinada como elemento abrasivo. Grãos mais finos ( $A_2$ ) permitiram melhores acabamentos superficiais. A alumina eletrofundida apresentou piores resultados em ambas as

granulometrias avaliadas. A Figura A.2b mostra os mesmos resultados, porém, em termos da variação na rugosidade média  $Ra$ .

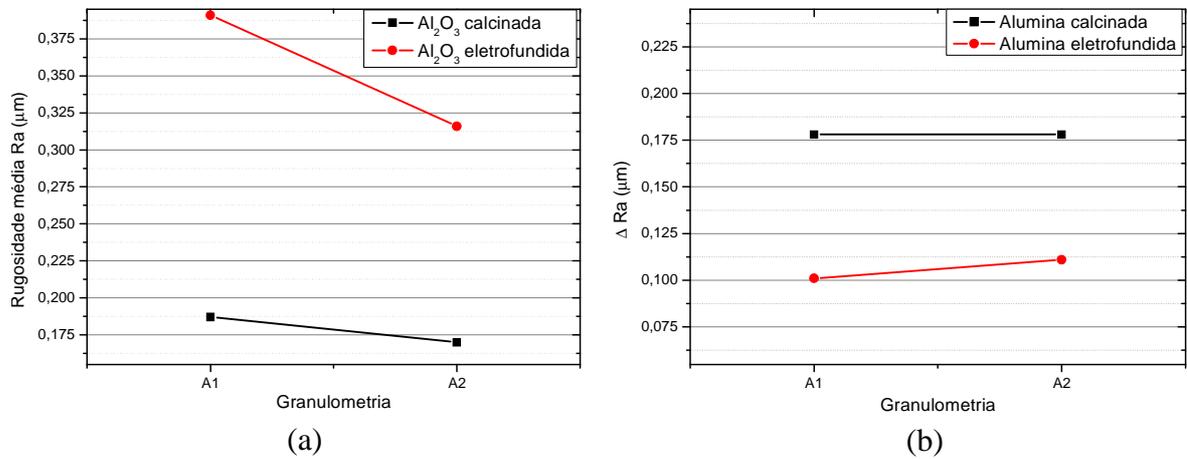


Figura A.2 – Resultados em função da granulometria para diferentes abrasivos.

A Figura A.3 ilustra os resultados obtidos em função do tempo para as diferentes faixas de granulometria testadas. Observa-se, além da tendência à saturação do processo com o decorrer do ensaio, um deslocamento das curvas de rugosidade (Figura A.3a) com o uso de grãos abrasivos mais finos. Este comportamento concorda com o verificado na literatura [Shinmura et al., 1984; Chang et al., 2002; Jain et al., 2001].

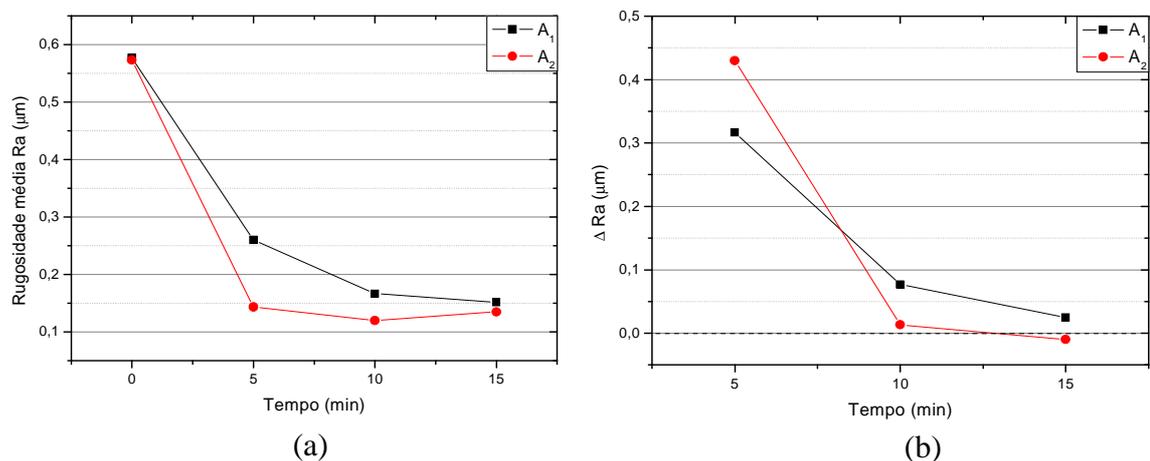


Figura A.3 – Resultados em função do tempo para diferentes granulometrias.

A Figura A.4 ilustra o comportamento de diferentes grãos abrasivos ao longo do tempo de processamento, sem considerar a granulometria usada. Há uma tendência clara de saturação nos ensaios realizados com ambos os materiais. Também sob esta análise a alumina calcinada se mostrou mais eficiente, com maiores ganhos em qualidade superficial.

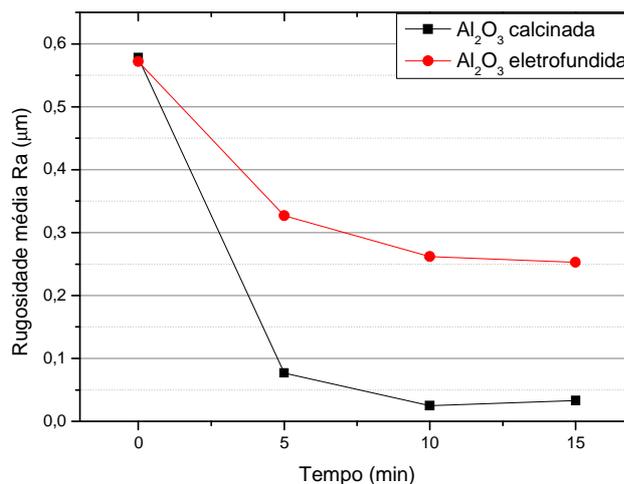


Figura A.4 – Resultados em função do tempo para diferentes abrasivos.

A comparação múltipla de médias realizada mostrou diferença significativa entre os resultados obtidos para grãos de diferentes tamanhos no caso da alumina eletrofundida, porém, não indicou que os diferentes tamanhos de grão possuem influência significativa para os testes realizados com o uso de alumina calcinada.

#### A.2.2 Resultados Experimentais - Elemento Lubrificante

A Tabela A.9 apresenta a análise de variância feita para os testes de avaliação de elementos lubrificantes. Esta análise mostra que tanto o tipo de lubrificante/aglomerante (Fonte A) quanto a rotação utilizada (Fonte B) produzem efeitos estatisticamente significativos, além da interação entre ambos.

Tabela A.9 – Análise de variância dos testes para definição do elemento aglutinante.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média Quadrática	F calc.	F tab.	≠ Significativa?
<b>Aglutinante (A)</b>	0,44	6	0,074	65,68	2,45	<b>SIM</b>
<b>Rotação (B)</b>	0,03	1	0,030	27,11	4,20	<b>SIM</b>
<b>SQAB</b>	0,20	6	0,034	30,26	2,45	<b>SIM</b>
<b>Erro</b>	0,03	28	0,001			
<b>Total</b>	0,71	41	$\alpha=0,05\%$			

A Figura A.5 ilustra os resultados obtidos para os pós magnético-abrasivos testados com diferentes elementos aglutinantes. Através de sua análise observa-se que o melhor desempenho, em ambas as rotações, foi obtido pelo pó magnético-abrasivo com adição de óleo hidráulico.

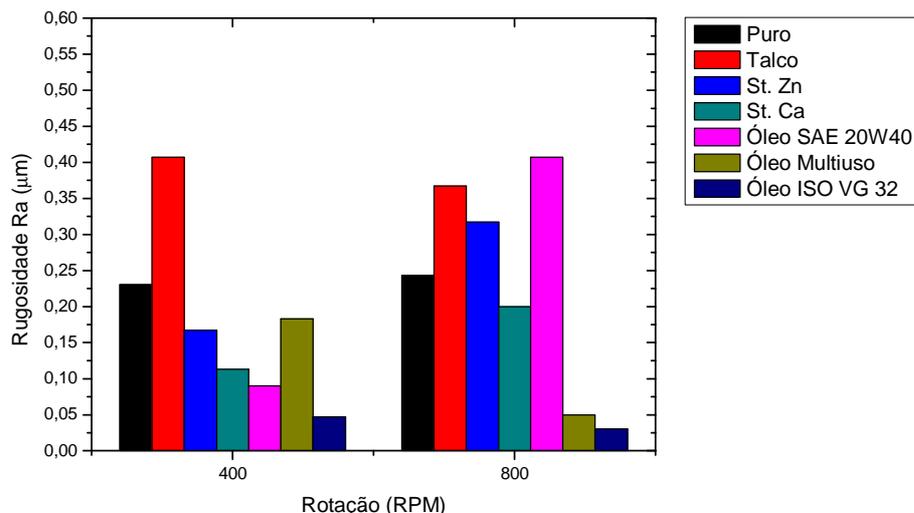


Figura A.5 – Rugosidade obtida com diferentes elementos aglutinantes a diferentes rotações.

Os resultados obtidos indicam ainda não ser adequado o uso de lubrificantes sólidos no processo de acabamento magnético abrasivo. Além do fraco desempenho, estes elementos não exercem sobre as partículas uma ligação suficientemente forte, de modo que parte do pó abrasivo tende a se dispersar, enfraquecendo a ação do processo e causando um potencial dano aos elementos móveis do equipamento usado. Os pós magnético-abrasivos ligados com lubrificante-aglutinante sólidos apresentam ainda uma queda em seu desempenho quando processados a uma rotação mais elevada, o que é esperado, uma vez que o aumento da velocidade tangencial contribui para o espalhamento de seus constituintes.

Um fator importante a ser considerado diz respeito ao efeito da rotação sobre o processo. A Figura A.6 apresenta a comparação múltipla de médias dos resultados obtidos para os pós magnético-abrasivos testados com diferentes elementos aglutinantes em função da rotação aplicada na peça. Os resultados estatisticamente similares apresentam-se sob um mesmo traço horizontal. Estes efeitos são verificados para os pós magnético-abrasivos puros e com adição de talco e óleo hidráulico. As demais misturas apresentaram comportamentos diferentes a diferentes rotações.

Para os ensaios realizados a uma rotação de 400 RPM, o material que mostrou melhor desempenho foi o óleo hidráulico, seguido pelo óleo automotivo. Não houve diferença estatisticamente significativa entre ambos. O pior resultado foi obtido com o uso de talco, enquanto o óleo multiuso apresentou um resultado estatisticamente similar ao de referência. Porém, o efeito de interação verificado entre a velocidade e o elemento lubrificante cria um cenário diferente nos ensaios realizados a 800 RPM. O aumento da velocidade de corte afetou de forma significativa os testes realizados com elementos aglutinantes, à exceção dos ensaios

com óleo hidráulico ISO VG32 e talco. Também o ensaio de referência, manteve seu comportamento dentro dos limites de significância adotados. Enquanto os pós magnético-abrasivos com adição de stearato de zinco, stearato de cálcio e óleo automotivo apresentaram queda em seu desempenho (interação negativa), a mistura preparada com óleo multiuso mostrou forte melhora (interação positiva), equiparando-se ao óleo hidráulico como o melhor resultado obtido nos ensaios realizados, o que evidencia a forte interação entre o elemento lubrificante e a rotação usada.

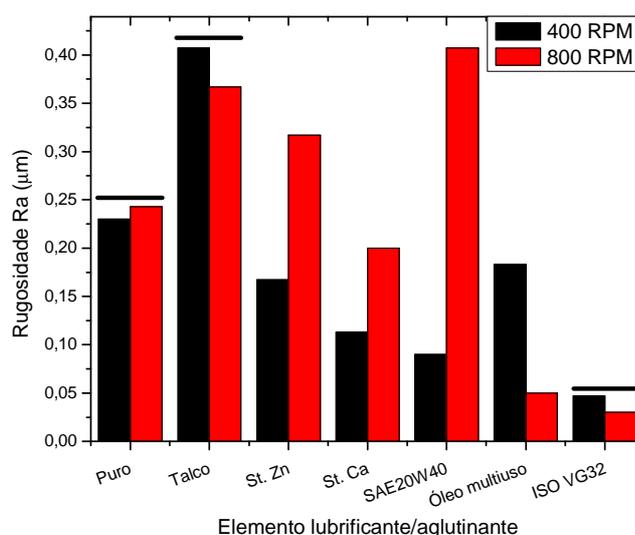


Figura A.6 – Comparação múltipla de médias para diferentes rotações.

Em relação aos óleos lubrificantes, o efeito da rotação sobre o acabamento superficial (Figura A.7) exige maior atenção, uma vez que o efeito da interação entre rotação e aditivo variou entre positivo, negativo e nulo. Enquanto o óleo de máquina mostrou melhora em seu desempenho a altas rotações, o automotivo apresentou forte queda, apresentando o pior resultado 800 RPM, ainda que, a 400 RPM, seu resultado tenha sido o melhor (junto com o óleo hidráulico, segundo a comparação múltipla de médias). Após o processo, verificou-se na superfície gerada uma coloração levemente amarelada, o que sugere a degradação deste óleo. Também o óleo multiuso, que a 800 RPM mostrou resultado estatisticamente similar ao do óleo hidráulico, teve fraco desempenho à velocidade mais baixa. Este efeito pode ser devido à menor viscosidade deste óleo, com pouco poder aglutinante. A melhora a altas rotações pode, assim, ser atribuída ao efeito de aumento na velocidade relativa (taxa de cisalhamento entre as superfícies), que compensaria a viscosidade mais baixa, criando uma maior força viscosa, além de aumentar o comprimento efetivo de corte. Além disso, a menor viscosidade permitiria maior movimentação das partículas, resultando em menor aquecimento e renovação das arestas de corte.

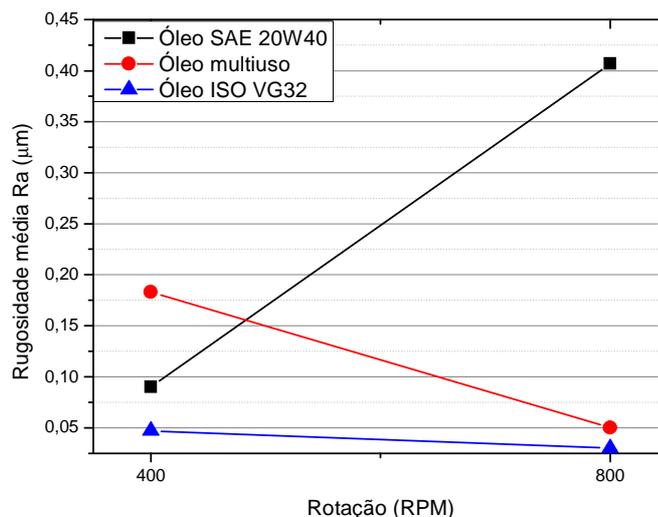


Figura A.7 – Resultados obtidos para os óleos lubrificantes em função da rotação.

Uma hipótese para o fraco desempenho do óleo SAE 20W40 a altas rotações é que este fenômeno se deva a uma viscosidade elevada a altas temperaturas, restringindo a liberdade de movimentação das partículas abrasivas, impedindo sua substituição por outras. Assim, o pó em contato com a peça sofreria mais fortemente os efeitos da abrasão, resultando na degradação do óleo, que se evidencia pelo aspecto amarelado deixado na superfície. Porém, outra hipótese bastante provável é a do comportamento pseudoplástico, segundo o qual há redução na viscosidade aparente do óleo lubrificante com o aumento na taxa de cisalhamento. Esta suposição se mostra bastante plausível, uma vez que se trata de um óleo multiviscoso, classe bastante sujeita a este fenômeno devido à adição, em teores elevados, de elementos plastificantes. Além disso, em diferentes testes, óleos de viscosidade mais baixa também resultaram em superfícies amareladas, porém, com melhores resultados.

No caso do óleo menos viscoso (multiuso), verifica-se um comportamento contrário. Desse modo a aplicação de determinado óleo lubrificante deve ser condicionada à faixa de rotações utilizada.

A Tabela A.9 apresenta a análise de variância feita para os testes realizados em função da quantidade, em massa, de óleo de classificação ISO VG32 adicionada ao pó magnético-abrasivo. O uso deste óleo se deve a seu melhor desempenho nos ensaios para definição de material lubrificante. De modo geral, a ANOVA mostra que tanto a fração de óleo hidráulico adicionado (fonte A) quanto a rotação utilizada (fonte B) possuem efeitos significativos sobre o resultado do processo, e que há efeito significativo de interação entre ambos.

Tabela A.10 – Análise de variância dos testes de quantidade de elemento lubrificante.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média Quadrática	F calc.	F tab.	≠ Significativa?
Proporção de óleo (A)	0,484	4	0,121	129,19	2,87	SIM
Rotação (B)	0,009	1	0,009	9,62	4,75	SIM
SQAB	0,065	4	0,016	17,35	2,87	SIM
Erro	0,019	20	0,0009			
Total	0,577	29				

A Figura A.8 expõe a comparação múltipla de médias obtida através da análise estatística, em função da rotação utilizada. Resultados estatisticamente similares são encontrados para os pós magnético-abrasivos com proporções de óleo lubrificante iguais a 40 e 60% da massa de óxido de alumínio, em ambas as rotações. À rotação mais elevada, observa-se uma diferença não-significativa entre os testes realizados sem adição de óleo e com uma proporção de 20%.

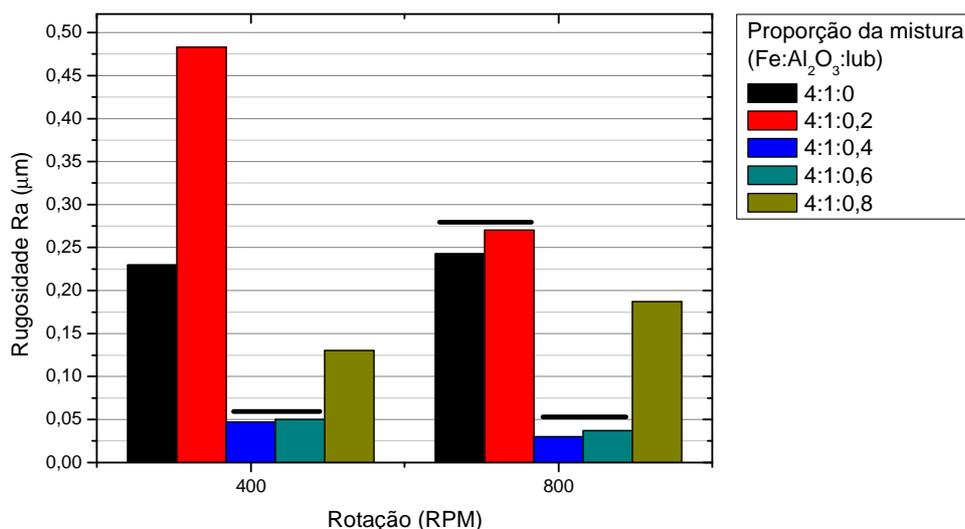


Figura A.8 – Resultados obtidos para os óleos lubrificantes em função da rotação.

Os resultados de rugosidade em função da quantidade de óleo adicionado ao pó magnético-abrasivo são mostrados, na Figura A.9, para as diferentes rotações utilizadas. O comportamento observado demonstra a existência de um intervalo onde o uso do óleo lubrificante resulta em melhoria no acabamento superficial. De acordo com os resultados obtidos, este intervalo corresponde à faixa entre 40 e 60% da quantidade, em massa, de alumina. Fora deste intervalo, a tendência é de piora no acabamento superficial, sendo que, para a velocidade de corte mais baixa, o uso de 20% de óleo lubrificante resulta em pior desempenho frente ao teste realizado sem lubrificante. A comparação múltipla de médias

feitas em relação às rotações utilizadas indica diferenças significativas apenas entre os resultados dos testes realizados com 20 e 80% de óleo lubrificante.

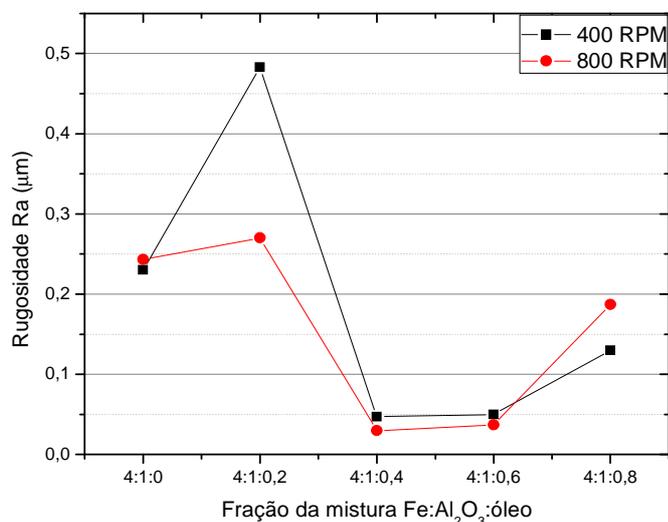


Figura A.9 – Resultados obtidos em função da proporção de óleo lubrificante.

### A.2.3 Intervalo de renovação do pó magnético-abrasivo

A avaliação dos resultados dos testes para avaliação do tempo de renovação do pó magnético-abrasivo foi feita através da análise de variância dos resultados. Sendo a medição da rugosidade média *Ra* realizada apenas durante as paradas para troca do PMA, evitando-se a interrupção do processo durante estes procedimentos, a comparação dos ensaios somente pode ser feita no intervalo máximo de tempo, igual a 5 minutos, onde tanto a rotação aplicada ao corpo de prova quanto o intervalo de renovação do pó magnético abrasivo produzem resultados estatisticamente similares. A Figura A.10 mostra os resultados obtidos para os três intervalos de renovação de pó magnético-abrasivo estudados. A análise das curvas sugere que a zona utilizada para fins de comparação (5 minutos) situa-se próxima à saturação das curvas, o que, neste caso, gera resultados tendenciosos. Apesar de muito próximos nos testes realizados com intervalos de reposição de 2,5 e 5 minutos, as curvas apresentam diferenças significativas quando o pó magnético-abrasivo é repostado a cada minuto. Desse modo, torna-se importante uma comparação minuto a minuto, a fim de determinar a real influência da taxa de reposição.

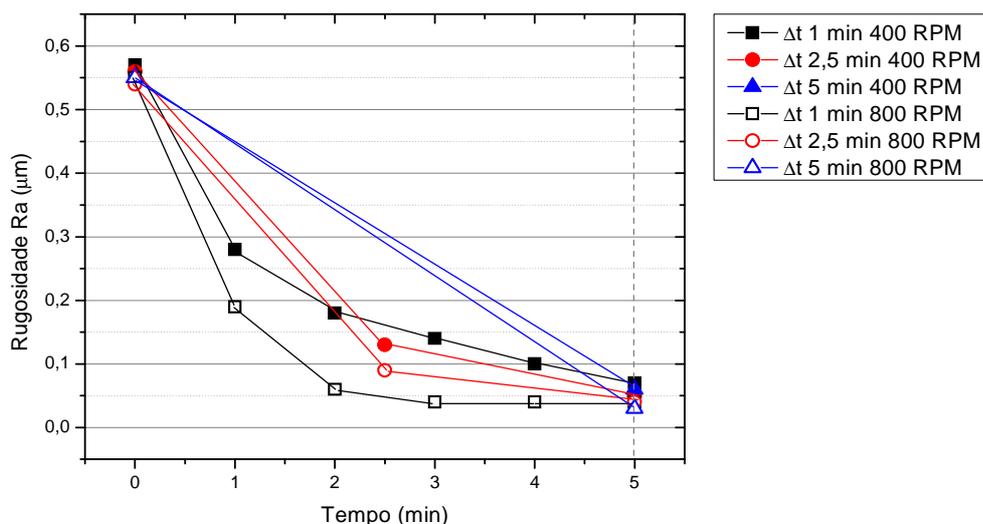


Figura A.10 – Efeito do intervalo de renovação de PMA sobre o acabamento superficial.

O real efeito decorrente do uso de um intervalo de reposição de 1 minuto em relação com um processo sem interrupções foi avaliado através da comparação entre estes resultados e um experimento do tipo *split-plot*, onde diferentes corpos de prova foram utilizados, com o intuito de simular uma operação contínua de acabamento magnético-abrasivo. A Tabela A.11 mostra a análise de variância realizada para estes resultados. Enquanto a rotação aplicada (fonte A) e o tempo de processamento (fonte C) causam um efeito significativo, o intervalo de reposição (fonte B), bem como quaisquer interações a ele relacionadas não possui influência estatisticamente relevante. Apesar de não serem observados efeitos significativos de interação, a fonte AC (rotação e tempo de processamento) se mostra próxima ao limite, podendo ser significativa para intervalos de confiança maiores.

Tabela A.11 – Análise de variância dos testes de reposição de PMA.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrada	F calculado	F tabelado	≠ Significativa?
SQA	0,078	1	0,078	62,96	4,08	SIM
SQB	0,003	1	0,003	2,16	4,08	NÃO
SQC	0,216	4	0,054	43,76	2,61	SIM
SQAB	0,001	1	0,001	0,78	4,08	NÃO
SQAC	0,013	4	0,003	2,56	2,61	NÃO
SQBC	0,002	4	0,001	0,48	2,61	NÃO
SQABC	0,002	4	0,001	0,47	2,61	NÃO
Erro	0,049	40	0,001			
Total	0,364	59				

Na Figura A.11 são indicados os resultados em função do tempo de processamento obtidos com e sem renovação periódica de pó magnético-abrasivo. Os resultados do processo

contínuo foram obtidos através da utilização de diferentes corpos de prova, um para cada ponto de comparação, em um experimento do tipo *split-plot*. Os resultados verificados em relação ao tempo de processamento esclarecem a aparente contradição entre os dados apresentados, onde a comparação múltipla de médias não acusou diferenças significativas entre os ensaios realizados com grãos abrasivos de maior e menor diâmetro, e a literatura, que sugere que menores grãos abrasivos permitem a obtenção de melhores acabamentos superficiais, mostrando que após 5 minutos de aplicação do processo, atinge-se uma faixa de saturação, onde são necessários intervalos cada vez maiores para produzir diferenças significativas.

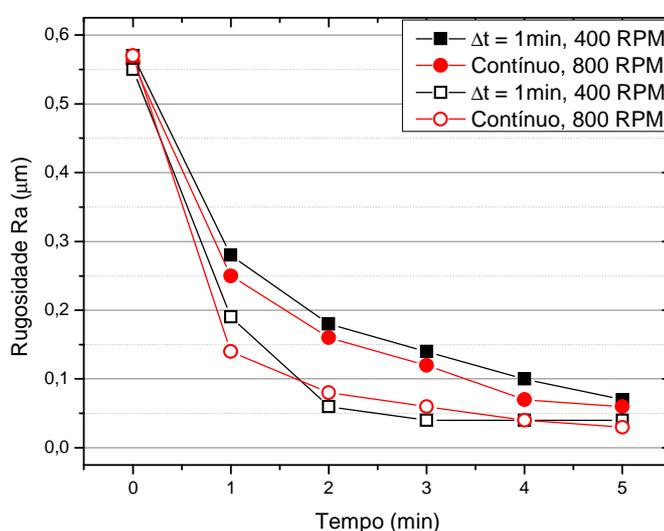


Figura A.11 – Rugosidade ao longo do tempo de renovação de PMA.

### A.3 Conclusões parciais

Através dos estudos preliminares descritos neste apêndice, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Há influência significativa tanto do material abrasivo quanto de sua granulometria sobre o resultado do processo. O resultado obtido para a granulometria concorda com o verificado na literatura, sendo grãos mais finos passíveis de obter melhores acabamentos. Esta diferença, porém, não é significativa para as condições avaliadas para a mistura contendo óxido de alumínio calcinado. Em parte, atribui-se a adoção de intervalos muito longos de tempo, de modo que a saturação da variável de resposta ocorre antes da medição.

- Dentre os materiais abrasivos avaliados, o óxido de alumínio calcinado se mostrou mais eficiente.
- O uso de lubrificantes sólidos como elemento de ligação no pó magnético-abrasivo, além de não produzir bons resultados, é potencialmente danoso às partes móveis do dispositivo, uma vez que, ao não prover ligação suficiente entre as partículas ferromagnéticas e abrasivas, permite o espalhamento das últimas. Este efeito é mais pronunciado em rotações mais elevadas.
- Dentre os óleos lubrificantes, a escolha deve ser feita com cuidado. Devido a uma forte interação existente entre o elemento a ser adicionado e a rotação, o mesmo lubrificante pode gerar bons resultados a determinada rotação e ruins em outra. O melhor desempenho em ambas as velocidades testadas foi obtido com o óleo hidráulico SAE W32.
- O controle da quantidade de óleo lubrificante adicionado ao pó magnético-abrasivo é fundamental para a obtenção de um bom resultado. Uma faixa considerada ideal foi encontrada entre as frações Fe:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:óleo de 4:1:0,4 e 4:1:0,6.
- Variações no tipo e na quantidade de elemento lubrificante afetam fortemente os resultados obtidos no processo de acabamento magnético-abrasivo, podendo estar associados às discrepâncias encontradas em diferentes trabalhos.
- Nos intervalos de tempo estudados, não se verificou influência da taxa de renovação do pó magnético-abrasivo sobre o acabamento superficial dos corpos de prova submetidos ao processo.
- Através dos testes realizados, foi possível a obtenção de rugosidades de até 0,027  $\mu\text{m}$  *Ra* em poucos minutos, de modo que o processo pode ser recomendado para a geração de superfícies de alta qualidade superficial.
- O uso de lubrificantes comerciais introduz como fonte de incerteza a real composição deste elemento. A avaliação correta do efeito das características do elemento aglutinante adicionado ao pó magnético-abrasivo deve buscar minimizar este efeito sempre que possível. A adoção de elementos conhecidos como óleos básicos constitui o cenário ideal para a determinação de sua influência sobre o processo.

#### A.4 Referências bibliográficas

Amorim, H.J.; Gomes, M.S.; Lorini, F. J. Parametric evaluation os cylindrical magnetic abrasive finishing process. **Proceedings of COBEM 2007 - 19th International Congress of Mechanical Engineering**. 2007.

Amorim, H.J.; Cândido, L.H.A.; Lorini, F.J. Influência da granulometria dos pós de ferro e de alumina, da rotação e do tempo de processamento no acabamento magnético-abrasivo de aços médio carbono. **Anais do CONEM 2006 - IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2006.

Chang, G.W.; Yan, B.H.; Hsu, R.T. Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbounded magnetic abrasives. **International Journal of Machining Tools and Manufacture**, v. 42. Londres, p. 575-583, 2002.

Gomes, M.S.; Amorim, H.J.; Wiedenhof, A.G.; Lorini, F. J. Estudo da influência da frequência de vibração no processo de acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo. **Anais do CIBIM 8 - Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**, 2007.

Jain, V.K.; Kumar, P.; Behera, P.K.; Jayswal, S.C. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process, **Wear**, v. 250, Londres, p. 384-390, 2001.

Leonhart, C. **Desenvolvimento e estudo do processo de acabamento por abrasão eletromagnética**. Trabalho de diplomação, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2003.

Leonhart, C.; Amorim, H.J. Desenvolvimento e estudo do processo de acabamento por abrasão eletromagnética. **Anais do CONEM 2004 - Congresso Nacional de engenharia Mecânica**, 2004.

Shinmura, T.; Takazawa, K.; Hatano, E.; Aizawa, T. Study on Magnetic finishing Process – Finishing Characteristics. **Bull Japan Society of Precision Engineering**, v. 18, n°4 p. 347-348, 1984.

# 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](#)