

RODRIGO NOGUEROL CORREA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE ULTRASSOM EM PROCESSOS DE POLIMENTO  
DE CAVIDADES DE MOLDES DE INJEÇÃO EM AÇO P20**

JOINVILLE - SC

2009

RODRIGO NOGUEROL CORREA

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE ULTRASSOM EM PROCESSOS DE POLIMENTO  
DE CAVIDADES DE MOLDES DE INJEÇÃO EM AÇO P20

Dissertação apresentada ao Programa de  
Mestrado em Engenharia de Processos, na  
Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE  
para a obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia de Processos.  
Orientador: Prof. Dr. Rogério de Almeida Vieira

JOINVILLE - SC

2009

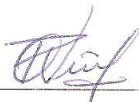
## Termo de Aprovação

### “Estudo da utilização de ultrassom em processos de polimento de cavidades de moldes de injeção em aço P20”


por

Rodrigo Noguerol Correa

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.



Prof. Dr. Rogério de Almeida Vieira  
Orientador (UNIVILLE)

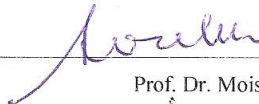


Profa. Dra. Noeli Sellin  
Coordenadora do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

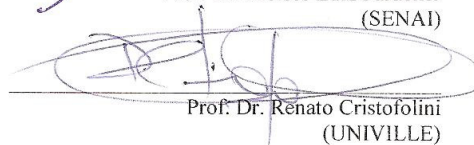
#### Banca Examinadora:



Prof. Dr. Rogério de Almeida Vieira  
Orientador (UNIVILLE)



Prof. Dr. Moisés Luiz Parucker  
(SENAI)



Prof. Dr. Renato Cristofolini  
(UNIVILLE)

Joinville, 28 de agosto de 2009.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais Amador e Ilvia, que me pautaram de valores aos quais me referencio em todas as minhas ações e me proporcionaram condições de ter uma boa formação.

A minha esposa Sue, fiel companheira em todos os momentos e que diversas vezes abriu mão de muitas coisas em virtude de minha carreira profissional.

Aos meus irmãos Amador e Gerson, duas pessoas muito especiais na minha vida, pela participação muito forte em minha educação.

A todos os professores, sem exceção, que contribuíram para a minha formação em todos os níveis que venho galgando.

Um agradecimento especial ao professor Dr. Rogério de Almeida Vieira, que acreditou no tema desenvolvido e sempre me atendeu com competência, dedicação e confiança me ajudando a solucionar as dificuldades encontradas.

Aos meus companheiros de trabalho Carlos César Fusinato, Daniel de Aviz, José Mario Paiva, Ronaldo Scoz Duarte que estiveram sempre prestativos e dando apoio com palavras de ânimo.

A Arotec, Hottec, Metalab e Centrustec, empresas que fomentaram insumos e serviços nesta pesquisa.

Aos alunos da primeira turma de Mestrado em Engenharia de Processos pelos bons momentos de convívio.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente participaram dessa grande etapa a minha vida.



*Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor,  
seria como o metal que soa ou como o sino que tine.  
E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a  
ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes,  
e não tivesse amor, nada seria.  
E ainda que distribuísse toda a minha fortuna para sustento dos pobres, e ainda que  
entregasse o meu corpo para ser queimado, e não tivesse amor,  
nada disso me aproveitaria.  
O amor é sofredor, é benigno; o amor não é invejoso; o amor não trata com  
leviandade, não se ensoberbece.  
Não se porta com indecência, não busca os seus interesses,  
não se irrita, não suspeita mal;  
Não folga com a injustiça, mas folga com a verdade;  
Tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta.  
O amor nunca falha; mas havendo profecias, serão aniquiladas; havendo línguas,  
cessarão; havendo ciência, desaparecerá;  
Porque, em parte, conhecemos, e em parte profetizamos;  
Mas, quando vier o que é perfeito, então o que o é em parte será aniquilado.  
Quando eu era menino, falava como menino, sentia como menino, discorria como  
menino, mas, logo que cheguei a ser homem, acabei com as coisas de menino.  
Porque agora vemos por espelho em enigma, mas então veremos face a face; agora  
conheço em parte, mas então conhecerei como também sou conhecido.  
Agora, pois, permanecem a fé, a esperança e o amor, estes três, mas o maior  
destes é o amor.*

## RESUMO

Atualmente, o processo de polimento de moldes, representa o segundo maior tempo do processo de fabricação, acarretando alto custo de fabricação, pois na grande maioria das vezes o processo é manual e artesanal. Internacionalmente, muitos pesquisadores estão realizando estudos de automatização de polimento, visando a redução dos padrões de rugosidade ou deste tempo. Estes métodos classificam-se basicamente em: com ou sem contato de ferramenta com a peça a ser polida. Métodos de polimento com contato possuem como característica básica a utilização de ferramenta, que pressionada contra o material a ser polido, com e sem a adição de abrasivo melhoram o acabamento da superfície. Cabe registrar que a grande maioria gera encruamento da superfície e aumento de dureza superficial. Polimentos sem contato tem ocorrido com jatos de abrasivos ou laser, também gerando respectivamente, encruamento ou alterações microestruturais devido à temperatura. Este estudo foi realizado com máquinas de limpeza por ultrassom e abrasivos comercialmente utilizados no polimento de moldes de injeção e aço P20. Foram analisadas as variáveis de frequência dos equipamentos, tipos de abrasivos, granulometrias da alumina e comportamento da temperatura dos fluídos abrasivos durante o processo. Os resultados apresentam as curvas de redução de rugosidade em função do tempo, definindo o tempo limite de processo para diversas frequências e abrasivos com variadas granulometrias. Resultados como a redução do tempo de polimento sem efeitos de endurecimento superficial e incrustações indesejadas estão apresentados detalhadamente.

Palavras-chave: polimento, ultrassom, ultrassônico, P20, molde, rugosidade, velocidade de polimento, superfície.

## ABSTRACT

Currently, the process of polishing a mold, is the second longest in the manufacturing process, resulting in high manufacturing cost, because in most cases the process is manual and craft. Internationally, many researchers are studying for automation of polishing, in order to reduce the standards of roughness or this time. These methods fall generally: with or without contact with the tool part to be polished. Methods of polishing contact with, have as a feature to use tool, which pressed against the material to be polished, with and without the addition of abrasive improve the surface finish. It is worth mentioning that the vast majority generates hardening the surface and increase surface hardness. Polishing there has been no contact with abrasive jet or laser, also generating respectively, hardening or microstructural changes due to temperature. This study was carried out with machines and ultrasonic cleaning abrasive commercially used in polishing molds and steel P20. The variables of frequency of equipment, types of abrasive particle sizes of alumina and the temperature behavior of abrasive fluids during the process. The results show the curves of reduction of roughness as a function of time, setting the timeout process to different frequencies and with various abrasive particle sizes. Results such as reducing the polishing time without the effects of hardening and unwanted inlays are presented in detail.

Key words: Polishing, burnishing, ultrasound, P20, mould, roughness, velocity of polishing, surface.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Análise de custo de um polímero injetado.....	15
Figura 2 - Aços ferramenta e suas características.....	21
Figura 3 - Perfil de superfície.....	22
Figura 4 - Métodos representação esquemática da superfície de uma peça.....	23
Figura 5 - Perfil efetivo da peça.....	24
Figura 6 - Sistemas de usinagem.....	26
Figura 7 - Rugosidades obtidas por diferentes processos de usinagem.....	29
Figura 8 - Versatilidade do raio do inserto de ferramentas de corte.....	30
Figura 9 - Processo de usinagem convencional X HSC.....	31
Figura 10 - Comportamento do processo HSC.....	31
Figura 11 - Alteração da trajetória da ferramenta.....	32
Figura 12 - Processos de polimento a) rebolo abrasivo b) disco com de tecido com material abrasivo.....	33
Figura 13 - Tempo de processo na produção de moldes e matrizes.....	35
Figura 14 - Métodos de polimento de moldes em três diferentes países.....	36
Figura 15- Exemplo de lapidação e polimento envolvendo peça, ferramenta, fluido, grânulo e movimento relativo.....	36
Figura 16 - Tendência do esmerilhamento em relação à dureza do aço.....	37
Figura 17- Tendência do polimento em relação à dureza do aço.....	38
Figura 18 - Tendência da rugosidade superficial em comparação com o tempo de duração do polimento.....	39
Figura 19 - Classificação de novos processos de polimento por acabamento de superfície e material removido.....	39
Figura 20 - Método de polimento por espiral.....	41
Figura 21 - Equipamentos utilizados na confecção dos corpos de prova.....	42
Figura 22 - Equipamento de polimento com contato através de esfera ou rolete sobre superfície cilíndrica rotativa.....	43
Figura 23 - Tipo de interação mecânica entre peça-ferramenta.....	44
Figura 24 - Tipo de tratamento mecânico.....	44
Figura 25 - Rugosidade x pressão com raio da esfera igual 0,2mm e	

rotação=0,05mm/rev.....	45
Figura 26 - Efeito dos parâmetros do regime de tratamento na rugosidade superficial.....	45
Figura 27 - Esquema de um laser focalizado na peça.....	46
Figura 28 - Gerador e motor com elemento piezoelétrico.....	48
Figura 29 - Modo de vibração para os formatos comuns de cristais.....	49
Figura 30 - Disco ressonante "simples mas efetivo projeto para limpeza ultrassônica.....	50
Figura 31 - Variação do diâmetro das bolhas em função da frequência do ultrassom.....	51
Figura 32 - Geração de cavitação e abundância.....	52
Figura 33 - Produtos utilizados, (a) pasta de diamante Abratec, (b) diluente Diamond e alumina Arotec.....	55
Figura 34 - Equipamentos de ultrassom utilizados nos ensaios.....	56
Figura 35 - Equipamentos utilizados na confecção dos corpos de prova, (a) Torno Romi, (b) Retífica Clever.....	57
Figura 36 - Rugosímetro de fabricação alemã marca Mahl – Modelo M4Pj.....	58
Figura 37 - Termovisor marca Irisys.....	59
Figura 38 - Microcópico Leika.....	60
Figura 39 - Microscópio eletrônico de varredura.....	60
Figura 40 - Comprimentos de amostragem de rugosidade para medições de Ra.....	62
Figura 41 - Equipamentos de ultrassom trabalhando paralelamente com controle de tempo.....	63
Figura 42 - MEV de corpo de prova antes do polimento – Corpo A8.....	65
Figura 43 - Macrografia com microscopia ótica de corpo de prova antes do polimento.....	66
Figura 44 - Rugosidade em função do tempo.....	67
Figura 45 - Macroscopia da degradação acelerada do corpo de prova A7.....	68
Figura 46 - Rugosidade em função do tempo.....	69
Figura 47 - Comportamento da rugosidade em função do tempo com variação da granulometria – Ultrassom com frequência de 28 kHz.....	70
Figura 48 - Macroscopia do polimento e degradação por <i>pits</i> do corpo de prova	

A0.....	71
Figura 49 - Macroscopia do polimento e degradação por <i>pits</i> do corpo de prova	
A2.....	71
Figura 50 - Macroscopia do polimento e degradação por <i>pits</i> do corpo de prova	
A4.....	72
Figura 51 - Comportamento da rugosidade em função do tempo com variação da granulometria – Ultrassom com frequência de 40 kHz.....	73
Figura 52 - Macroscopia do polimento e degradação por <i>pits</i> do corpo de prova	
A1.....	73
Figura 53 - Macroscopia do polimento e degradação por <i>pits</i> do corpo de prova	
A3.....	74
Figura 54 - Macroscopia do polimento e degradação por <i>pits</i> do corpo de prova	
A5.....	74
Figura 55 - Influência do tipo de abrasivo em função do tempo – Ultrassom com frequência de 28 KHz.....	75
Figura 56 - Macroscopia do polimento e degradação por <i>pits</i> do corpo de prova	
A6.....	76
Figura 57 - Influência da frequência do ultrassom em função do tempo para alumina de 1,0 $\mu\text{m}$ .....	77
Figura 58 - Influência da frequência do ultrassom em função do tempo para alumina de 0,3 $\mu\text{m}$ .....	77
Figura 59 - Influência da frequência do ultrassom em função do tempo para alumina de 0,05 $\mu\text{m}$ .....	78
Figura 60 - Influência da frequência do ultrassom em função do tempo para pasta de diamante de 1,0 a 2,0 $\mu\text{m}$ .....	78
Figura 61 - Alteração da textura da alumina em forma de “pasta”.....	79
Figura 62 - Curva do comportamento da temperatura dos abrasivos em função do tempo.....	80
Figura 63 - Termografia de controle de temperatura dos abrasivos.....	81
Figura 64 - MEV de corpo de prova após o polimento.....	83
Figura 65 - Microscopia do corpo de prova A0 após os ensaios.....	84
Figura 66 - Microscopia do corpo de prova A7 após os ensaios.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exportações catarinenses por capítulos da NCM em 2006 e 2007....	17
Tabela 2 - Classificação de materiais por grau de conhecimento científico.....	20
Tabela 3 - Codificação dos corpos de prova.....	57
Tabela 4 - Distribuição de corpos de prova.....	61
Tabela 5 - Medições do dos corpos de prova antes do processo de polimento..	64
Tabela 6 - Medição de dureza HRc momento inicial.....	65
Tabela 7 - Controle de temperatura dos fluídos abrasivos.....	80
Tabela 8 - Controle de dureza dos corpos de prova.....	82

## LISTA DE SIGLAS

- RAIS - Relação Anual de Informações Setoriais
- NCM - Nomenclatura Comum do Mercosul
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- NBR - Norma Técnica Brasileira
- ISO - International Standardization Organization
- Ra - Desvio médio aritmético dos valores das ordenadas de rugosidade no comprimento de uma amostra
- $\bar{Ra}$  - Média dos valores de Ra medidos em um corpo de prova
- PIB - Produto Interno Bruto
- CAD - Computer Aided Designer
- CAE - Computer Aided Engineering
- CAM - Computer Aided Manufacturing
- HSC - High Speed Cutting
- MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 Desenvolvimento tecnológico .....	14
1.2 Mercado nacional e estadual metalmeccânico.....	16
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1 Aços utilizados para a ferramentaria de moldes de injeção .....	19
2.2 Rugosidade superficial .....	21
2.3 Medição da rugosidade superficial .....	22
2.3.1 Desvio médio aritmético .....	24
2.3.2 Benefícios de baixas rugosidades superficiais .....	25
2.4 Processos de fabricação .....	25
2.4.1 Processos de usinagem tradicionalmente utilizados na fabricação de moldes	26
2.4.2 Acabamentos superficiais dos processos de fabricação tradicionais .....	28
2.4.3 Desenvolvimento de novos processos de usinagem.....	29
2.5 Processos de polimento .....	32
2.5.1 Processos tradicionais de polimento .....	33
2.5.2 Polimento de molde de injeção .....	34
2.5.3 Automatização de processos de polimento .....	35
2.5.4 Principais linhas de estudo de processos de polimento automatizados .....	40
2.5.4.1 Polimentos internos de furos e tubos com abrasivos .....	40
2.5.4.2 Polimentos de superfícies externas com abrasivos.....	41
2.5.4.3 Polimentos de superfícies externas com uso de laser assistido.....	46
2.5.4.4 Outros processos de polimento.....	47
2.6 Polimento por ultrassom.....	47
2.6.1 Cerâmicas piezoelétricas e ultrassom.....	48
2.6.2 Processo de limpeza por ultrassom.....	50
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>53</b>
3.1 Levantamento de dados de mercado .....	53
3.2 Materiais.....	53
3.3 Agentes abrasivos.....	54
3.4 Equipamento de ultrassom.....	55
3.5 Fabricação de corpos de prova .....	56

3.6 Técnicas de caracterização utilizadas .....	57
3.7 Controles metrológicos.....	58
3.8 Controles visuais .....	59
3.9 Séries de polimento.....	61
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>64</b>
4.1 Caracterização inicial .....	64
4.2 Resultados obtidos.....	67
4.3 Estudo da influência do tempo em relação à rugosidade .....	67
4.4 Estudo da influência da granulometria da alumina em relação à rugosidade.....	70
4.5 Avaliação da influência do tipo de abrasivo no processo .....	75
4.6 Avaliação da influência da frequência do ultrassom no processo .....	76
4.7 Avaliação de eficácia do processo em campos de difícil acesso .....	79
4.8 Avaliação da temperatura dos abrasivos.....	79
4.9 Avaliação da variação da dureza superficial .....	81
4.10 Estudo da superfície final com microscopia eletrônica de varredura.....	82
4.11 Estudo da superfície final com micrografia transversal .....	83
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>87</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>92</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, retrata-se o desenvolvimento do mercado de plásticos, dando enfoque não somente às mudanças culturais da população, mas a caracterização do potencial do mercado estadual, nacional e internacional.

O mercado de plásticos caracteriza-se pela facilidade de processamento da matéria-prima a ser transformada em produto, tornando-os atrativos e competitivos em seu custo.

Os produtos plásticos têm ocupado posições muito importantes em diversos segmentos de mercado, entre eles, a linha branca e automotiva.

As geometrias dos produtos têm sido projetadas com maior complexidade para manufatura dos moldes de injeção, sendo adotadas soluções como máquinas e equipamentos com CNC e estações de computador com CAD/CAM, entretanto, o grande desafio de manufatura passa a ser o acabamento destes ferramentais, pois as cavidades em sua grande maioria precisam ser polidas.

O processo de polimento atualmente acarreta grandes tempos de processo e imprecisão nos resultados obtidos, pois normalmente são realizados manualmente.

Desta forma, o estudo de polimento automatizado torna-se um desafio de grande importância para a sustentação de toda a cadeia produtiva.

## 1.1 Desenvolvimento tecnológico

A globalização e os fatos que surgem geram novas necessidades de planejamento estratégico, não só métodos de produção, mas de evolução de materiais e de produtos devido à grande competitividade dos mercados mundialmente abertos.

Analisando-se historicamente as relações entre consumidor e produtor, no início estas relações eram desenvolvidas com produção manufaturada, onde o artesão confeccionava o produto sob medida para que se adaptasse da melhor maneira aos requisitos do cliente.

No século XIX, com o advento da Revolução Industrial, esse panorama mudou; o foco principal era o desenvolvimento de produtos padronizados de forma que atendessem de forma satisfatória a um grande número de pessoas, tornando possível a produção em massa e a redução de custos.

Durante a década de 90, o consumidor tornou-se mais exigente, e as empresas devem produzir produtos personalizados com *design* adequado para cada necessidade do cliente, porém com custos de produção de alta escala.

A indústria moderna, empenhada cada vez mais em produzir artigos bons, bonitos e baratos, está orientada em substituir materiais tradicionais por materiais sintéticos que, além de manterem a eficiência e a estética, resultam bens mais econômicos (PROVENZA, 1976).

Conforme Boujeulbene *et al.* (2004), 30% do custo de um produto fabricado pela injeção de plástico é relativo à manufatura do molde, e apenas 5% do custo deste produto é relativo ao aço utilizado, como detalha a Figura 1.

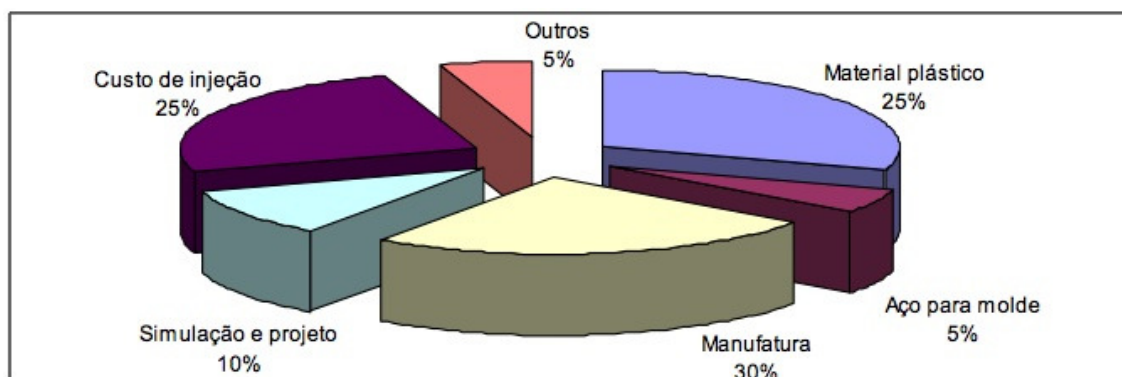


Figura 1 – Análise de custo de um polímero injetado  
Fonte: Bojeulbene (*et al.*, 2004).

A flexibilização das linhas de produção adotando novos processos e materiais, entre eles destacando-se o crescimento do uso de polímeros e tecnologias de produção com alto grau de eficiência como *Computer Aided Designer* - CAD, *Computer Aided Engineering* - CAE, *Computer Aided Manufacturing* - CAM torna-se necessária para o atendimento do atual mercado de consumo.

Conforme Rigby (1996, *apud* SOUZA, 2004), durante uma avaliação de custos da indústria automobilística, constatou-se que o custo do processo de acabamento manual em moldes e matrizes, consome 38% dos custos totais do trabalho. Isto demonstra que as tecnologias que auxiliem na produção destes

ferramentais reduzindo as etapas manuais de acabamento terão um futuro promissor.

Neste contexto, encontram-se na cadeia produtiva as empresas do segmento internacional de ferramentaria e moldes, e a crescente necessidade de otimização de processos de fabricação que atendam a confecção de geometrias complexas e excelentes níveis de acabamento e materiais de alta resistência.

## 1.2 Mercado nacional e estadual metalmeccânico

Segundo dados da RAIS (2007), o cenário nacional do setor metalmeccânico é composto por 61.392 empresas, com 1.820.148 trabalhadores e o catarinense por 5.322 empresas com 118.460 trabalhadores.

O setor de plásticos representa juntamente com o setor metalmeccânica 31,8% das empresas catarinenses e empregam 23,6% dos trabalhadores do setor industrial de Santa Catarina.

Na Tabela 1 estão apresentadas as exportações catarinenses por capítulos da NCM - Nomenclatura Comum do Mercosul em 2006 e 2007, destacados os segmentos relacionados e o total das exportações do setor metalmeccânico, somados ao setor de plásticos e de eletrodomésticos. Estes setores somados representam 29,4% do total das exportações catarinenses.

Tabela 1 - Exportações catarinenses por capítulos da NCM em 2006 e 2007

Discriminação	Valor (US\$ FOB)		
	2007	2006	% Total 2007
Carnes e miudezas, comestíveis	1.673.180.906	1.145.139.271	22,67
Reat. Nucleares, caldeiras, máquinas, etc. mecânicos <sup>1</sup>	1.148.375.994	987.645.972	15,56
Máquinas, aparelhos e material elétrico, suas partes <sup>2</sup>	658.465.069	520.456.633	8,92
Madeira, carvão vegetal e obras de madeira	620.318.698	647.052.518	8,4
Fumo (tabaco) e seus sucedâneos manufaturados	534.483.174	465.897.534	7,24
Móveis, mobiliário médico-cirúrgico, colchões etc.	378.033.545	378.570.794	5,12
Prepar. de carne, de peixes ou de crustáceos, etc.	332.766.460	230.174.730	4,51
Sementes e frutos oleaginosos, grãos, sementes etc.	306.389.698	48.213.203	4,15
Veículos automóveis, tratores etc. e suas partes	217.639.394	194.769.337	2,95
Produtos cerâmicos	203.343.559	227.173.946	2,75
Papel e cartão, obras de pasta de celulose, de papel etc.	202.166.253	200.907.322	2,74
Artefatos têxteis conf., sortidos etc.	135.008.587	154.547.890	1,83
Obras de ferro fundido, ferro ou aço	85.285.325	80.602.090	1,16
Vestuário e acessórios, de malha	71.923.677	83.405.357	0,97
Gorduras, óleos e ceras animais ou vegetais etc.	61.650.503	40.642.358	0,84
Plásticos e suas obras	60.075.461	52.437.716	0,81
Ferro fundido, ferro e aço	55.275.321	27.637.328	0,75
Frutas, cascas de cítricos e de melões	52.403.849	31.740.208	0,71
Instr., aparelhos de óptica, fotografia	45.138.029	36.726.003	0,61
Cereais	43.416.875	9.301.561	0,59
Produtos químicos inorgânicos	42.719.269	30.017.023	0,58
Outros	453.779.831	389.053.117	6,15
Total das exportações do setor metalmeccânico somado ao setor de plástico	2.169.841.243	1.835.911.748	29,40
Total das exportações de SC	7.381.839.477	5.982.111.911	100

<sup>1</sup>Motocompressores, blocos de cilindros, cabeçotes etc. de explosão, refrigeradores etc.

<sup>2</sup>Motores e geradores elétricos, conversores, condutores etc.

Fonte: SC em dados (2008).

Neste contexto destaca-se o município de Joinville como o mais populoso e industrializado de Santa Catarina, estado que detém o segundo PIB industrial per capita do país e ocupa o quinto lugar no ranking das exportações nacionais, com uma fatia de 5,52% do total brasileiro. O parque fabril do município, com mais de 1.500 indústrias, emprega 58 mil funcionários e cresce em média 5,67% ano.

Terceiro pólo industrial da região Sul, com volume de receitas geradas aos cofres públicos, inferior apenas às capitais Porto Alegre (RS) e Curitiba (PR), Joinville figura entre os quinze maiores arrecadadores de tributos e taxas municipais, estaduais e federais. A cidade concentra grande parte da atividade econômica na indústria - que gera um faturamento industrial de US\$ 14,8 bilhões por ano - com destaque para os setores metalmeccânico, têxtil, plástico, metalúrgico, químico e farmacêutico.

O Produto Interno Bruto per capita de Joinville também é um dos maiores do país, em torno de US\$ 8.456/ano. Se comparado aos demais municípios do Sul do País com PIB superior a 0,5%, Joinville aparece em primeiro lugar.

Em relação às exportações, o município de Joinville detém um alto percentual de participação em relação ao Estado, sendo que o maior percentual, de 24%, confere às empresas com faturamento em exportações acima de 50 milhões, com foco no setor metalmeccânico e plástico.

Assim, em virtude da importância deste segmento de mercado na região de Joinville, com importância estratégica, estadual e nacionalmente, estebeleceu-se como objetivo geral deste trabalho estudar a utilização de ultrassom em processos de polimento de aço P20 visando à otimização do processo de polimento de cavidades de moldes de injeção.

Para atingir o objetivo proposto, estabeleceram-se os objetivos específicos:

- a) reduzir o tempo de processo;
- b) estudar a compatibilidade dos principais agentes abrasivos utilizados comercialmente;
- c) atingir polimento em regiões com curvas suaves, bordas ou cantos vivos;
- d) redução do volume de consumo de abrasivo;
- e) redução de impactos ambientais;
- f) identificar fatores que permitam a otimização deste processo.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem o objetivo fundamentar o processo de polimento de uma cavidade de molde de injeção de plásticos, abordando os processos tradicionais e pesquisados atualmente, os materiais e insumos utilizados, e o método de controle da rugosidade.

### 2.1 Aços utilizados para a ferramentaria de moldes de injeção

Historicamente o homem vem desenvolvendo soluções para os problemas de sua era. A tecnologia vem sendo desenvolvida baseado-se na maioria das vezes, em atender as necessidades da humanidade. Assim, os materiais seguem esta mesma dinâmica de desenvolvimento.

Segundo Harada, Suzuki e Ishi (1977, *apud* Padilha e Guedes, 1994), a classificação dos materiais pode ser elencada em quatro níveis, conforme o grau de conhecimento científico utilizado em seu desenvolvimento, podendo ser representada na Tabela 2.



Tabela 2 – Classificação de materiais por grau de conhecimento científico

Nível de desenvolvimento tecnológico	Caracterização	Exemplos
1	Materiais naturais	Pedra, cobre, meteorito, madeira, couro, borracha, diamante
2	Materiais desenvolvidos empiricamente praticamente sem conhecimento científico prévio	Bronze, aço, latão, ferro fundido, vidro, concreto
3	Materiais desenvolvidos com auxílio de conhecimentos científicos	Al e ligas, Ti e ligas, Mg e ligas, metal duro, aços inoxidáveis, termoplásticos, durômeros, elastômeros, cerâmicas vítreas, ferrite
4	Materiais projetados, desenvolvidos quase que exclusivamente a partir de fundamentos científicos	Superligas, ligas de efeito memória, aços de alta resistência, cerâmicas do tipo SiAlON, cerâmicas de corte $Al_2O_3$ e $ZrO_2$ , semicondutores, alguns materiais para conter reatores nucleares ( $UO_2$ , ligas de urânio, ligas de Ag-Cd, In, ligas de zircônio

Fonte: Padilha e Guedes (1994).

Observando-se as necessidades de desempenho e durabilidade dos moldes de injeção, foram identificados diversos requisitos que o material do mesmo deveria atender.

Os materiais para moldes devem apresentar as seguintes propriedades (PROVENZA, 1976; BARBOSA, 2001):

- a) resistência à ruptura;
- b) resistência a abrasão;
- c) resistência à corrosão;
- d) facilidade de usinagem; e
- e) capacidade de alcançar e manter alto polimento superficial.

Segundo Chiaverini (1986), existem diversas opções de ligas de aços-ferramenta, sendo a maioria delas fruto da adição de cromo, níquel e molibdênio, visando o atingir dos requisitos das propriedades acima citadas.

Acearias em todo o mundo desenvolvem ligas padronizadas, Figura 2, para o atendimento de diversas necessidades do mercado.

AISI / DIN	Resistência	Tenacidade	Usinagem	Polimento	Texturização
P20 (2738 mod)	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■ ■
2738	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■ ■
2311	■ ■	■	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
2711	■ ■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ ■	■ ■
420	■ ■	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■
VP50	■ ■ ■	■ ■	■ ■ ■	■ ■	■ ■

Figura 2 – Aços ferramenta e suas características  
Fonte: (Diferro, 2009).

Em virtude do desenvolvimento tecnológico dos processos de fabricação, entre eles, máquinas e equipamentos, e a cada vez maior produção em massas, ligas específicas tem sido desenvolvidas para atender o mercado de forma otimizada.

Pode-se observar que existem outros aços com propriedades de polimento e resistência superiores, mas a dificuldade de usinagem do mesmo torna o P20 mais atrativo para uso, sendo a opção mais utilizada pela indústria de fabricação de moldes.

Este aço, conforme pode se visualizar na Figura 2, apresenta suas as propriedades de resistência, usinabilidade e polimento com características bem balanceadas, garantindo ao mesmo tempo qualidade no ferramental produzido e trabalhabilidade nos processos de fabricação.

Este material possui padronização da composição química definida pela norma ASTM A 681-94 (2004), com a seguinte composição: 0,4%C - 1,6%Mn - 5%Mn - 1,9% Cr - 0,2%Mo para que o mesmo tenha as características citadas.

## 2.2 Rugosidade superficial

O acabamento superficial de uma superfície, ou seja, a isenção de imperfeições em sua superfície intitula-se rugosidade superficial.

Existem diversos métodos para medição da rugosidade superficial, métodos óticos, de contato ou até mesmo por comparação manual.

Diversos parâmetros podem ser avaliados durante os estudos de rugosidade, porém o parâmetro mais utilizado pelos fabricantes de moldes e empresas de polimento é o desvio médio aritmético, sendo este o parâmetro avaliado neste estudo.

### 2.3 Medição da rugosidade superficial

A medição de rugosidade merece um cuidado especial que muitas vezes é relevado em benefício de outras grandezas envolvidas, entre elas o custo de processamento.

Para a medição de rugosidade, estaremos utilizando como referência o método do perfil. Segundo a NBR ISO 4287 (2002, p.3), o perfil resultante da superfície é resultante da intersecção da superfície real com um plano específico, conforme apresenta a Figura 3.

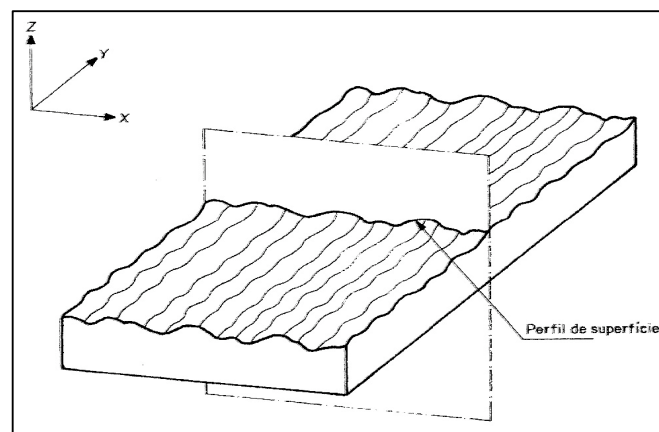


Figura 3 - Perfil de superfície  
Fonte: NBR ISO 4287 (2002, p. 3).

Os parâmetros escolhidos para representá-la, muitas vezes representam uma caracterização incompleta do perfil ou da superfície que se deseja analisar.

Os parâmetros de rugosidade resistentes são valores numéricos resultantes de integrações ou de operações matemáticas simples de perfis amostrais de

superfícies. Logo, são representações sujeitas a diversos erros de medição e interpretação.

Entretanto, sua praticidade é inegável: é extremamente útil dispor de valores numéricos para comparação e análise de superfícies, seja para resumir diversas informações contidas em uma superfície tridimensional, ou mesmo para separar e classificar superfícies distintas, geradas por diferentes processos de fabricação.

Inicialmente, é interessante esclarecer que a rugosidade, ou perfil linear de uma superfície que é designado por este nome, é normalmente representado em escalas (para ampliação ou redução) distintas para a direção vertical e horizontal. Isso para evidenciar a mudança de perfil de maior interesse para análise de uma superfície, já que as escalas de variação para dimensões perpendiculares a superfície analisada são, em geral, menores que as para as dimensões paralelas à superfície.

Desta forma, como em grande parte das vezes deseja-se saber mais sobre a variação do perfil perpendicular à superfície, é comum ampliar as variações de um perfil de rugosidade nesta direção, e em escala menor de ampliação às variações na direção paralela à superfície.

Este conceito pode ser melhor compreendido ao se observar a Figura 4, pois a mesma representa de forma mais clara a metodologia prevista na NBR ISO 4287 (2002, p.3).

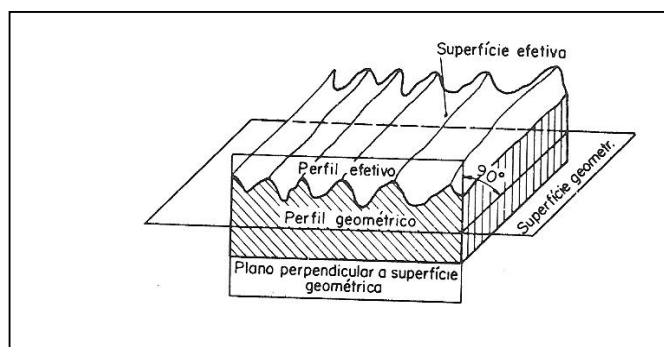


Figura 4 - Métodos Representação esquemática da superfície de uma peça  
Fonte: Ferraresi (2003).

Diversos parâmetros podem ser controlados numa medição de rugosidade superficial. Alguns demonstram a rugosidade máxima da superfície, ou seja, a maior diferença encontrada entre o maior pico e o menor vale.

A quantificação de rugosidade de forma estatística pode ser mensurada através de uma média das variações de altura em um determinado comprimento desta superfície.

Diversas informações podem ser obtidas em planos de corte transversais para análise e compreensão geométrica de uma superfície, conforme se pode observar na Figura 5.

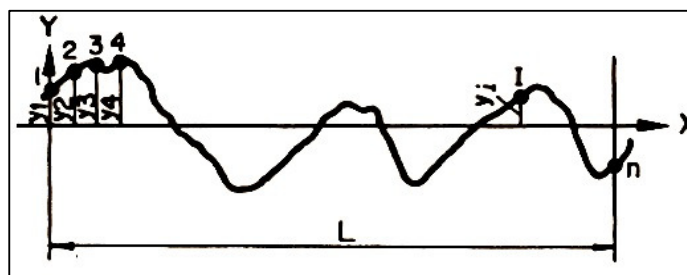


Figura 5 - Perfil efetivo da peça  
Fonte: Ferraresi (2003).

Conforme nomenclaturas padronizadas na NBR ISO 4287 (2002, p.5) as cotas acima do perfil geométrico são intitulados picos e os situadas abaixo desta linha média vales do perfil.

### 2.3.1 Desvio médio aritmético

O desvio aritmético médio,  $Ra$ , segundo NBR ISO 4288 (2008, p.9) é representado pela soma dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média, num comprimento de amostragem, matematicamente representada por:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| \cdot dx \quad \text{Equação do desvio médio aritmético}$$

Existem métodos mais avançados para controle de rugosidade como o controle de rugosidade através de imagens digitais de superfícies. Este método utiliza-se de câmeras digitais de alta definição para análise a refração de feixes de

laser refletidos pela rugosidade da superfície da peça (RÚBIO, FILHO e SANTOS, 2006).

Porém o método mais utilizado nos fabricantes de ferramentas ainda é através do tradicional rugosímetro de medição por contato, desta forma, manteve-se o mesmo critério neste trabalho.

### 2.3.2 Benefícios de baixas rugosidades superficiais

A busca constante por baixas rugosidades superficiais é um desafio para diversos segmentos de produtos.

Conforme apresentado em estudos de desempenho de materiais, rugosidades mais baixas garantem ao material melhor desempenho à fadiga, redução da probabilidade de geração de micro trinca, melhor resistência ao atrito e dissipação de calor (BEER e JOHNSTON JUNIOR, 2007).

Desta forma estes benéficos são constantemente buscados nos diversos processos de fabricação utilizados atualmente.

## 2.4 Processos de fabricação

Para confecção de moldes de injeção, são necessários um ou mais processos de fabricação. Os mais tradicionais conformam o material através da remoção de cavaco, ou seja, uma ferramenta retira material da peça através de um gume afiado, sendo a ferramenta ou a peça movimentada durante o processo.

### 2.4.1 Processos de usinagem tradicionalmente utilizados na fabricação de moldes

A definição dos processos que serão utilizados, depende diretamente da geometria que se deseja formatar ao aço bruto, inicialmente com dimensões retangulares e com faces planas.

Os principais sistemas de usinagem utilizados estão retratados na Figura 6, a qual demonstra o tipo de movimento da ferramenta de corte ou do material a ser conformado, apresentado abaixo como peça.

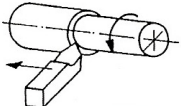
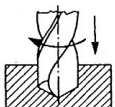
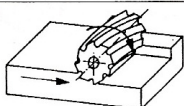
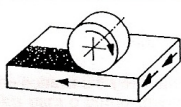
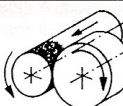
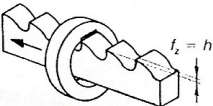
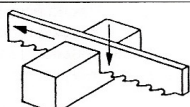
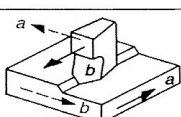
Tornear		CIRCULAR	Peça	LINEAR	Ferramenta
Furar			Ferramenta		Ferramenta
Fresar			Ferramenta		Peça
Retífica Plana			Ferramenta		Peça
Retífica cilíndrica			Ferramenta		Peça
Brochadeira			Ferramenta (a)		Nenhum
Serra			Ferramenta		Ferramenta ou peça
Plainas			Peça (a) Ferramenta		Ferramenta(a) Peça (b)
		LINEAR	m/min <sup>-1</sup>	LINEAR	mm/rpm
			m/min <sup>-1</sup>		mm/rpm
			m/min <sup>-1</sup>		mm/min
			m/s		mm/min
			m/s		min <sup>-1</sup>
			m/min <sup>-1</sup>		mm/curso
			m/min <sup>-1</sup>		mm/dente
			m/min <sup>-1</sup>		mm/curso

Figura 6 - Sistemas de usinagem  
Fonte: White (1998).

O primeiro processo citado, torneamento, existe movimentação de rotação da peça e a ferramenta retira material radialmente, conformando-a principalmente de forma cilíndrica.

Através do processo de furação, uma ferramenta de corte rotacionando em torno do seu próprio eixo e adentrando na peça, usinando furos cilíndricos na mesma.

O processo de fresamento pode ser explicado através de uma ferramenta rotacionando em torno do seu próprio eixo e deslocando-se longitudinal ou transversalmente em um plano da peça, que é movimentada promovendo através da extensão dimensional da ferramenta e do deslocamento da peça a remoção de cavaco. Neste processo, o formato geométrico da ferramenta, intitulada fresa, pode dar conformações diferentes à peça.

Brochamento, serragem e plainamento, normalmente não estão associados à processos de fabricação de cavidades de moldes e por isto não serão abordados.

Equipamentos como serra e plaina podem ser utilizados pelo fornecedor de matéria-prima apenas para fornecer a empresa de moldes e matrizes os materiais próximos das dimensões nominais de usinagem.

Processos mais específicos como eletro-erosão, que remove material através de descargas elétricas promovidas por uma ferramenta de material condutor, com a geometria final que se deseja gravar no material encostando na peça e a conformando através de arcos elétricos, e usinagem de alta velocidade onde a ferramenta trabalha com altas velocidades de corte da ferramenta, são comuns, mas nem sempre utilizados dependendo das geometrias do molde a ser confeccionado. Estes processos podem gerar melhores acabamentos superficiais, mas são processos com maior custo e normalmente menos utilizados.

O processo de acabamento que fornece à peça rugosidade mais baixa e baixo desvio padrão mais utilizado é conhecido como retificação. Este processo consiste da utilização de uma ferramenta constituída de material abrasivo, normalmente óxidos e diamantes, intitulada como rebôlo, que rotaciona e fica em contato com a peça a ser trabalhada. Este processo será abordado de forma mais aprofundada no item 2.5.



## 2.4.2 Acabamentos superficiais dos processos de fabricação tradicionais

Segundo Ferraresi (2003), a qualidade das superfícies é caracterizada pelo processo de acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial. Estas propriedades são modificadas pelo processo de usinagem devido, aos seguintes fatores:

- a) pressão da ferramenta contra a peça;
- b) atrito da superfície de incidência da ferramenta com a peça;
- c) atrito interno na região de deformação plástica;
- d) calor gerado no processo de corte;
- e) fenômenos específicos do processo de formação do cavaco;
- f) trepidação da ferramenta e da máquina.

Os processos tradicionais de fabricação apresentam acabamentos superficiais diferenciados. Cabe registrar que existe uma relação direta entre o custo do processo utilizado para a confecção de uma peça e o seu acabamento. Neste sentido, diversos processos estão sendo estudados para conseguir-se desempenho superior com custos competitivos.

Processos metalúrgicos e de conformação, como fundição, laminação e forjamento possuem rugosidades mais altas que processos que conformam a peça através de remoção de material como a usinagem.

Podem-se observar na Figura 7 os processos de fabricação e respectiva faixa de tolerância de rugosidade que pode ser conseguida através dos mesmos.



Diversos estudos têm sido desenvolvidos neste sentido e no que tange o aspecto acabamento superficial, mas merece destaque adicional o processo de HSC – *High Speed Cutting*. Este processo tem apresentado excelentes resultados, porém, todo processo de usinagem com remoção de cavaco por ferramenta de corte deixa deformidades superficiais no trajeto da ferramenta como pode ser visualizado na Figura 8.

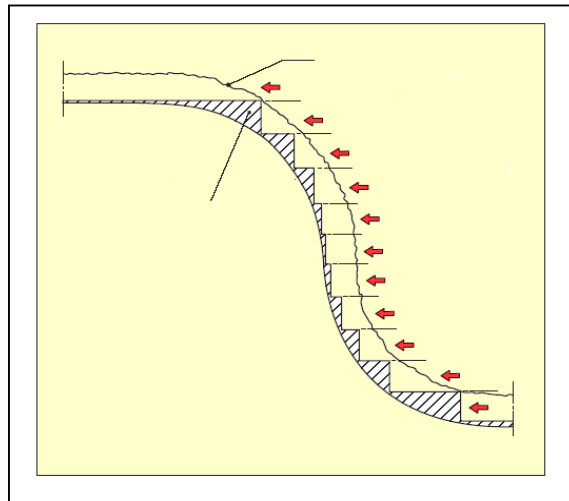


Figura 8 - Versatilidade do raio do inserto de ferramentas de corte  
Fonte: Sandvick (2008).

Conforme Finzer (1998 *apud* SOUZA, 2004), o processo de usinagem de alta velocidade produz em relação aos processos tradicionais, redução significativa nos tempos de usinagem.

Pode-se observar que os tempos de usinagem foram reduzidos, incluindo os manuais, devido à maior velocidade de corte, maiores avanços e menores passos da ferramenta, através dos quais, geram-se degraus superfícies do trajeto da ferramenta bem menores que os processos tradicionais. Cabe registrar que apesar desta melhora de desempenho, a Figura 9 ainda demonstra polimento manual com tempo significativo.

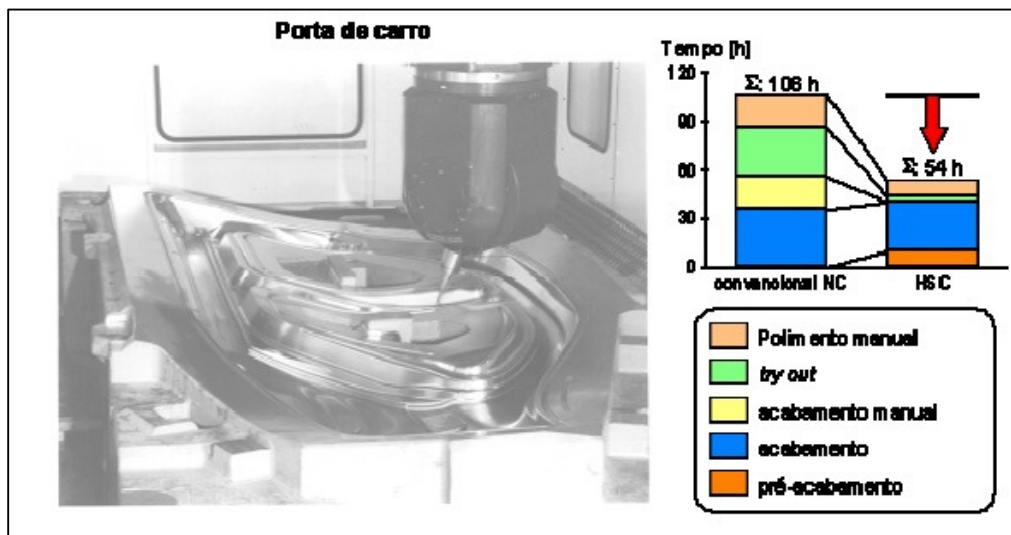


Figura 9 - Processo de usinagem convencional X HSC  
Fonte: Souza (2004).

Existem também limitações de desempenho de ferramentas, vários obstáculos têm sido identificados na aplicação da técnica HSM e na usinagem de materiais endurecidos, tal como alto desgaste da ferramenta, a necessidade de usar ferramentas caras, rígido balanceamento da ferramenta, suporte da ferramenta preciso, bem como máquinas-ferramentas e sistemas de controle dispendiosos.

Assim, conforme Schulz (1996), as principais características do HSC podem ser retratadas na Figura 10.

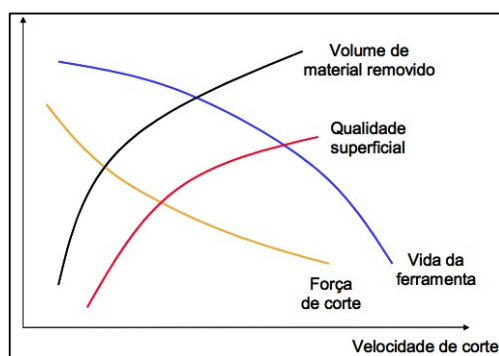


Figura 10 - Comportamento do processo HSC  
Fonte: Schulz (1996).

As altíssimas velocidades de corte são benéficas à dissipação de calor e saída de cavacos, porém em materiais macios o mesmo torna-se ineficiente.

Este processo em virtude de altas rotações, em torno de 180.000rpm, necessita ferramentas muito bem balanceadas e com arestas de corte sem imperfeições, devido às vibrações geradas nesta rotação, apesar de acarretar altos custos, reduz os degraus de usinagem (Figura 8), pois necessitam de avanços e profundidades de corte menores, reduzindo assim as imperfeições.

Conforme orientações do renomado fabricante de pastilhas de usinagem, Sandvick, a alteração da trajetória da ferramenta, ainda vem a somar na redução de material a ser acabado em processos posteriores como apresentado na Figura 11.

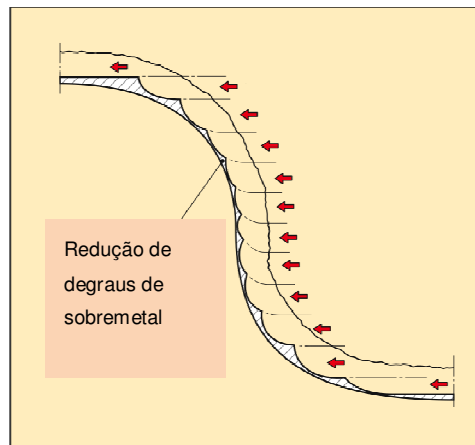


Figura 11 - Alteração da trajetória da ferramenta  
Fonte: Sandvick (2009).

Assim, levando-se em consideração que as cavidades de moldes de injeção são em grande maioria concebidos através de processos de torneamento e fresamento e que mesmo com os desenvolvimentos de ferramentas, máquinas e softwares que possibilitem melhorar os degraus de usinagem, o acabamento de polimento ainda torna-se necessário.

## 2.5 Processos de polimento

Com o objetivo de dar melhor acabamento em processos de fabricação anteriormente abordados, neste item, serão abordados processos de polimento.

### 2.5.1 Processos tradicionais de polimento

Segundo Ferraresi (2003), os processos mais utilizados de polimento são realizados através de equipamento rotativo com ferramenta abrasiva conforme apresentado na Figura 12.

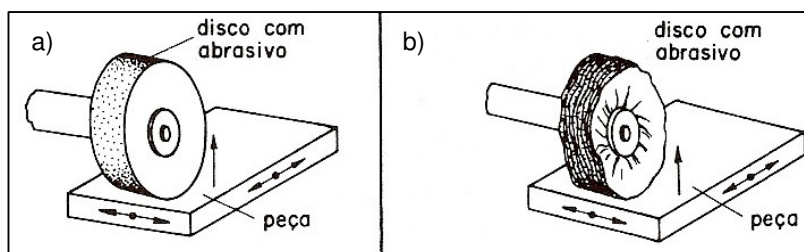


Figura 12 - Processos de polimento a) rebolo abrasivo b) disco com de tecido com material abrasivo  
Fonte: Ferraresi (2003).

Observe na Figura 12 a, que em processos de retificação, existe um disco com material abrasivo. No segundo, Figura 12 b, existem feltros com a adição de agentes abrasivos no mesmo.

Cabe ressaltar que estes processos tradicionais de polimento têm restrições de uso devido à geometria da ferramenta, rebolo ou feltro. Dependendo da geometria da peça a ser polida, os mesmos não atendem todas as necessidades, pois não conseguem adaptar-se à geometria da peça, de forma flexível, garantindo resultados homogêneos.

Segundo Souza (2004), operações manuais de acabamento são realizadas por artesãos, com instrumentos como: lixas, pedras, esmerilhadeiras manuais, etc.

Os polimentos manuais são realizados com adição do agente abrasivo, aluminas e pasta de diamante, fricção manual de feltros ou com auxílio de politrizes (SORS, BARDDÓCZ, RADNÓTI, 2002).

Estes processos desperdiçam e poluem o meio ambiente, pois as superfícies são frequentemente enxaguadas e o abrasivo desperdiçado. Desta forma, estes processos podem ser considerados de baixa repetibilidade e não garantem acabamento homogêneo em toda a peça, agredindo ainda o meio ambiente.

A poluição ambiental pode ser entendida como a adição ou lançamento de qualquer substância ou fonte de energia ao meio ambiente em quantidades que

resultem em concentrações maiores que as naturalmente encontradas (DANSEREAU, 1978 *apud* MORETTI, 2002, LINDNER, 2002).

Desta forma, a automatização do processo manual, torna-se um desafio importante, pois o desenvolvimento de processo automatizado reduziria o desperdício de abrasivos e lançamento de resíduos de polimento, pois o processo passa a ser de uso contínuo e os resíduos podem ser tratados mais facilmente.

Quanto ao acabamento superficial dos moldes, cavidades com problemas de polimento na sua confecção ou com desgaste natural de uso, durante o processo de injeção revelam na peça injetada problemas de aparência na superfície, como manchas ou linhas.

Durante a injeção, o escoamento heterogêneo do material plástico, devido à diferença de atrito em regiões distintas gerado pela baixa repetibilidade do processo manual, pode acarretar mal preenchimento, empenamentos, desbalanceamento ou mesmo excesso de matéria-prima no produto, em virtude da necessidade de se aumentar a pressão de injeção do mesmo.

Assim, processos automatizados que possibilitem o polimento de geometrias complexas e melhores acabamentos são cada vez mais estudados.

## 2.5.2 Polimento de molde de injeção

No segmento de moldes e matrizes, as empresas nacionais competem diretamente com sistemas de produção mais desenvolvidos como Alemanha, Japão e Estados Unidos.

Como citado anteriormente, este tempo torna-se bastante relevante, pois os custos de processo de confecção de molde são incorporados no próprio produto. Cabe ainda o registro, que não somente na confecção, mas moldes de injeção com cavidades polidas necessitam de polimento periódico de suas cavidades para garantirem o perfil de saída da peça, sendo assim uma necessidade constante durante todo o tempo de vida do molde.

Conforme Ramos e Machado (*apud* FALLBOHNER *et al.*, 1996), na fabricação de moldes e matrizes uma significativa porção do tempo de processo é

despendida nas operações de polimento (até 32 % do tempo total de fabricação), estatística esta apresentada na Figura 13.

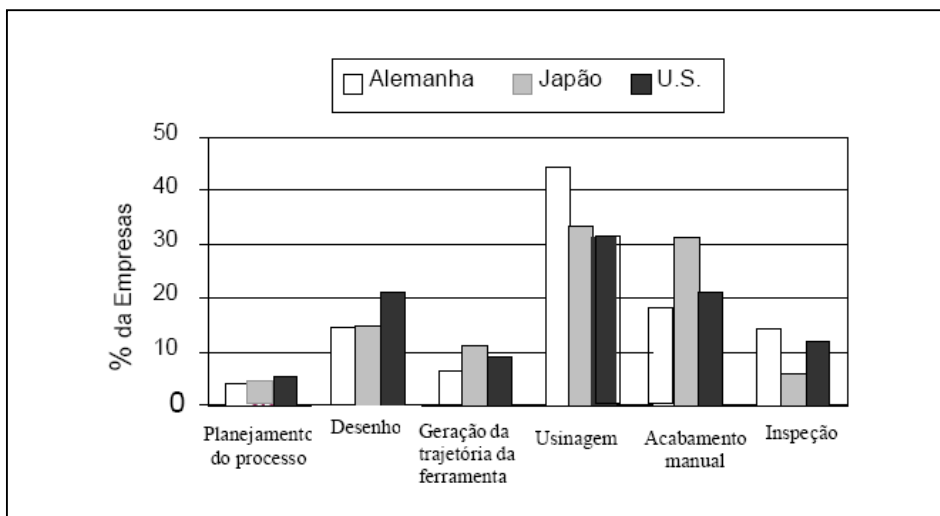


Figura 13 - Tempo de processo na produção de moldes e matrizes  
Fonte: Fallbohner *et al.* (1996).

O desenvolvimento de processos automatizados torna-se um diferencial competitivo com menor tempo de processo e conseqüente custo de fabricação.

Cabe ressaltar que esta fase do processo incorpora o segundo maior tempo de fabricação.

### 2.5.3 Automatização de processos de polimento

Segundo Ramos e Machado (*apud* FALLBOHNER *et al.*, 1996), 70% das oficinas de moldes e matrizes dos Estados Unidos e Japão fazem polimento manualmente, conforme Figura 14.



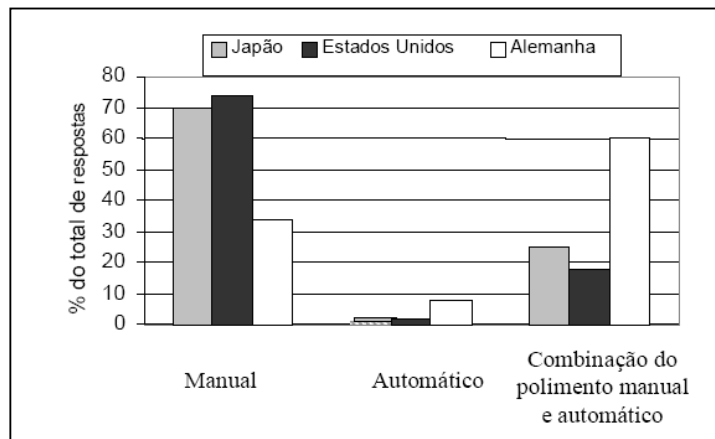


Figura 14 - Métodos de polimento de moldes em três diferentes países  
Fonte: Fallbohner *et al.* (1996).

Os processos de polimento visam a obtenção de parâmetros Ra na faixa de 0,20 a 0,05  $\mu\text{m}$  conforme Figura 7 ou inferiores.

Segundo Evans *et al.* (2007, web), os quatro componentes do processo de polimento são: a ferramenta da máquina, o fluido, a granulometria e a frequência com a qual o grânulo é atritado com a superfície conforme Figura 15.

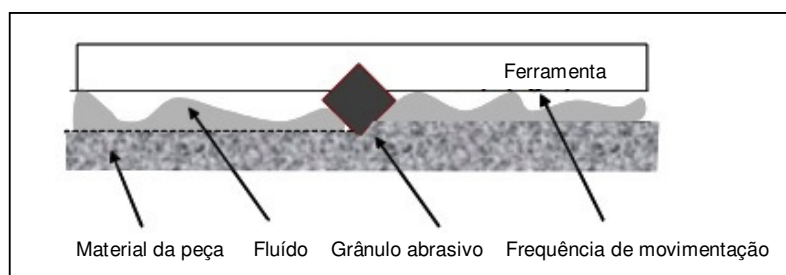


Figura 15- Exemplo de lapidação e polimento envolvendo peça, ferramenta, fluido, grânulo e movimento relativo  
Fonte: Evans *et al.* (2007, web).

O estudo apresentado por Evans *et al.* (2007, web) demonstra as diversas variáveis envolvidas, desenvolvimentos de materiais e ferramentas de contato visando a interação com a superfície da peça e até a deposição de filmes na mesma.

Os fluidos podem ser apenas o material de condução do abrasivo ou também possuir características abrasivas. Os grânulos abrasivos podem possuir diversas composições químicas, entre as mais utilizadas comercialmente aluminas e pasta de diamante, sendo a granulometria média e sua distribuição, fatores que influenciam

na abrasão à superfície a ser polida, e finalmente, o movimento relativo da ferramenta e peça a serem polidas com o abrasivo.

As interações entre as variáveis demonstradas por Evans *et al.* (2007, web) demonstram reações químicas de deposição entre o fluido e/ou abrasivo e a peça, entre o grânulo e abrasivo com aglomeração do mesmo, atração ou deposição sobre a peça e também a variação de temperatura em função da variação da ferramenta de contato (feltro) do polimento.

Segundo Crichino (2006) o controle volume de fluido adicionado ao processo de polimento é importante e interfere nos resultados da rugosidade de processos de polimento. Resultados obtidos por ele demonstram que o fluido de polimento possui importância na lubrificação e dissipação de calor na superfície da peça, assim, deve-se observar em processos com adição de fluídos o fluxo mínimo necessário para que a temperatura não cause efeitos indesejados.

Conforme Ribeiro (2007), o acabamento superficial obtido por meio de polimento, depende essencialmente dos seguintes fatores: técnica de polimento, características do aço, tratamento térmico e áreas soldadas.

Segundo Ribeiro (2007), há basicamente duas teorias desenvolvidas recentemente para descrever os efeitos de polimento, o esmerilhamento e o polimento. Os dois métodos removem materiais, mas em quantidades diferentes.

Assim, em processos por esmerilhamento com rebolos abrasivos, com rugosidades entre 1,0 a 0,4  $\mu\text{m}$  quanto maior for a dureza do material, maior o tempo de acabamento, conforme curva apresentada na Figura 16. Neste processo o uso de material abrasivo em materiais com elevada dureza, torna-se uma alternativa para trabalhabilidade, pois com ferramentas de corte esta tarefa seria complicada devido às restrições de resistência da ferramenta aos elevados esforços de corte.

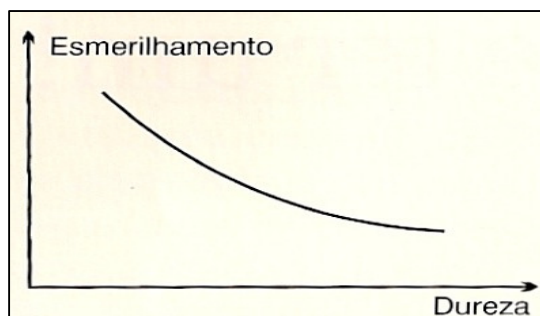


Figura 16 - Tendência do esmerilhamento em relação à dureza do aço  
Fonte: Ribeiro (2007).

Processos de polimento com feltros e adição de material abrasivo, com rugosidades inferiores a  $0,8 \mu\text{m}$ , quanto maior for a dureza do material, menor o tempo de acabamento.

Este comportamento apresentado possui esta característica, pois são muito macios e sua superfície é agredida muito facilmente. Desta forma, a pressão da ferramenta em materiais com menor dureza deve ser menor, buscando não danificar a superfície.

Desta forma, peças com dureza superficial maiores aceitam maior pressão e velocidade no processo de polimento sem a degradação da superfície, tendência esta apresentada graficamente na Figura 17.

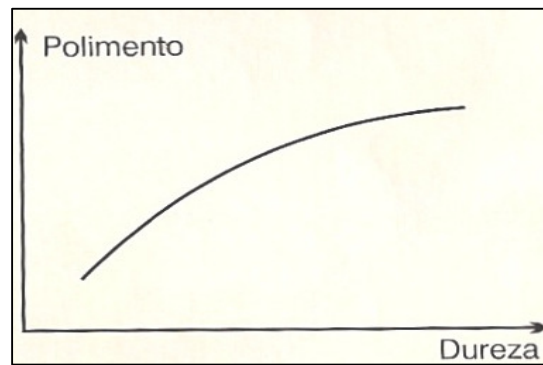


Figura 17- Tendência do polimento em relação à dureza do aço  
Fonte: Ribeiro (2007).

Uma caracterização da influência da rugosidade em função do tempo foi apresentada por Ribeiro (2007), demonstrando que os processos de polimento possuem tempo ótimo, e que após a extrapolação do mesmo, a rugosidade da superfície volta a aumentar em virtude do efeito *pitting* onde são removidas inclusões não-metálicas como sulfetos e óxidos, conforme apresentado da Figura 18.

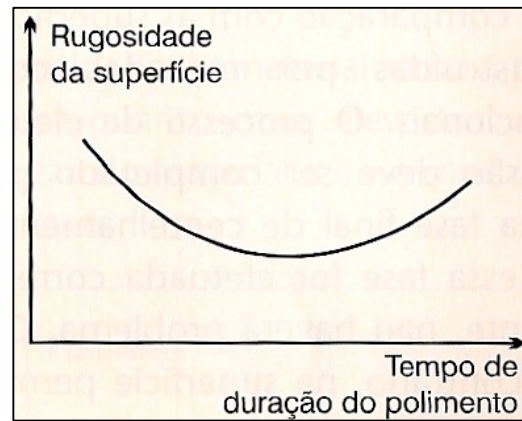


Figura 18 - Tendência da rugosidade superficial em comparação com o tempo de duração do polimento  
 Fonte: Ribeiro (2007).

Conforme representado na Figura 19, pode-se observar um comparativo dos diversos métodos de polimento utilizados. O desempenho de processos químicos apresenta resultados de rugosidade obtida inferiores aos mecânicos. (BRINKSMEIER, RIEMER, GESSENHARTER, 2008, web).

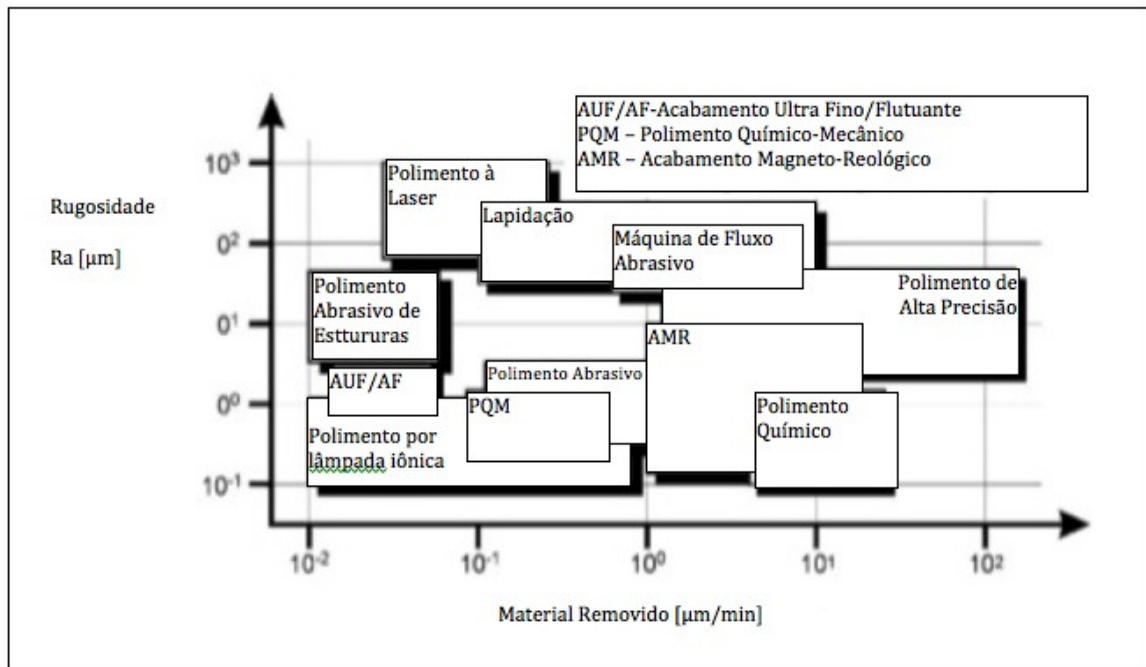


Figura 19 - Classificação de novos processos de polimento por acabamento de superfície e material removido  
 Fonte: Brinksmeier, Riemer, Gessenharter (2008, web).

Processos mecânicos, sem contato ferramenta com a peça, apresentam escalas de desempenho de polimento com rugosidades inferiores aos com contato; o que demonstra a importância do processo de ultrassom, pois nem pressão nem contato serão gerados, acreditando-se que isto trará bons resultados e poucos efeitos indesejados.

#### 2.5.4 Principais linhas de estudo de processos de polimento automatizados

Diversos equipamentos de polimento automatizados foram pesquisados, algumas linhas de pesquisas correlatas estão citadas com análise de particularidades, resultados e efeitos indesejados.

Os métodos desenvolvidos, por serem métodos refinados em sua grande maioria, possuem baixa flexibilidade, desta forma a sua aplicabilidade torna-se na maioria das vezes restrita ao conceito e resultado para o qual o equipamento ou processo foi desenvolvido.

Estudos específicos de polimento com aplicação na área de ferramentaria foram bastante restritos na bibliografia consultada. Os dados da Figura 14 demonstram que poucos métodos são abordados neste segmento, porém, diversos métodos distintos estão abordados para que se possa fazer uma comparação entre as particularidades de cada método e assim, fundamentar a importância do processo com a utilização do ultrassom.

##### 2.5.4.1 Polimentos internos de furos e tubos com abrasivos

O método de polimento espiral, estudado por Yan *et al.* (2007, web), onde uma broca rotacionando conduz materiais abrasivos em seu canal de saída de cavaco, demonstrou também que existe um tempo ótimo de polimento e que após a superação do tempo de 90 minutos, a rugosidade aumenta. Uma ilustração deste método está apresentada na Figura 20.

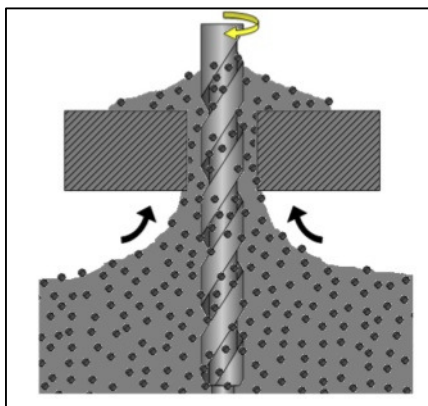


Figura 20 - Método de polimento por espiral  
Fonte: Yan *et al.* (2007).

Este método desenvolvido para polimento interno de furos possui como características limitantes a restrição de atendimento de furos de pequenas dimensões, inferiores à 2mm de diâmetro. Furos com dimensões inferiores apresentam esforços grandes na ferramenta e aumento de temperatura impossibilitando seu uso.

Conforme estudos de Barletta (*et al.*, 2006), através da confecção de equipamento para polimento interno em tubos de alumínio através bombeamento e jateamento interno com abrasivo, os resultados demonstraram que quanto maior a granulometria do abrasivo utilizado, menor a rugosidade obtida.

#### 2.5.4.2 Polimentos de superfícies externas com abrasivos

Um método de jateamento de micro-esferas de materiais como sílica, vidro ou mesmo metais de alta dureza, são lançados contra superfícies a serem tratadas e conseguem-se resultados positivos, veja Figura 21. Quanto maior a força de impacto, menores as rugosidades atingidas. Porém, como todo processo de deformação, o encruamento endureceu a superfície da peça (HASSAN e MOMANI, 2007, web).

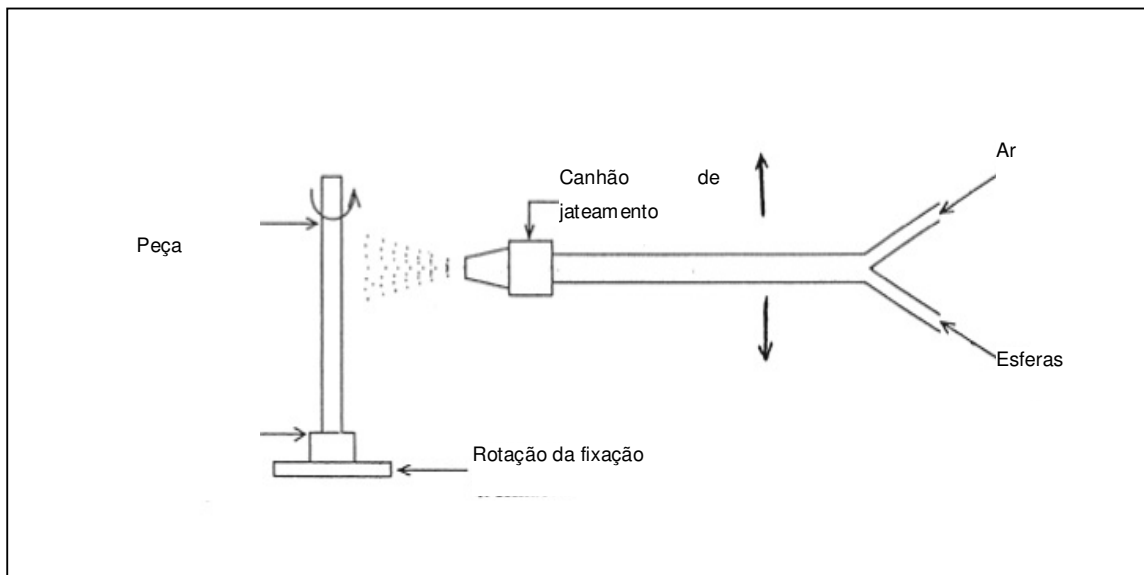


Figura 21 - Equipamentos utilizados na confecção dos corpos de prova  
 Fonte: Hassan e Momani (2000).

Este método apresentou bons resultados, mas o mesmo possibilitava o polimento de peças cilíndricas.

Hamadache *et al.* (2008, web), desenvolveu estudos com métodos de polimento automatizado com contato, através de uma ferramenta com ponta esférica ou rolete impelida pela força de uma mola contra a superfície a ser polida atritava-se com o mesma.

O equipamento desenvolvido está representado na Figura 22, podendo se melhor entendido o método.

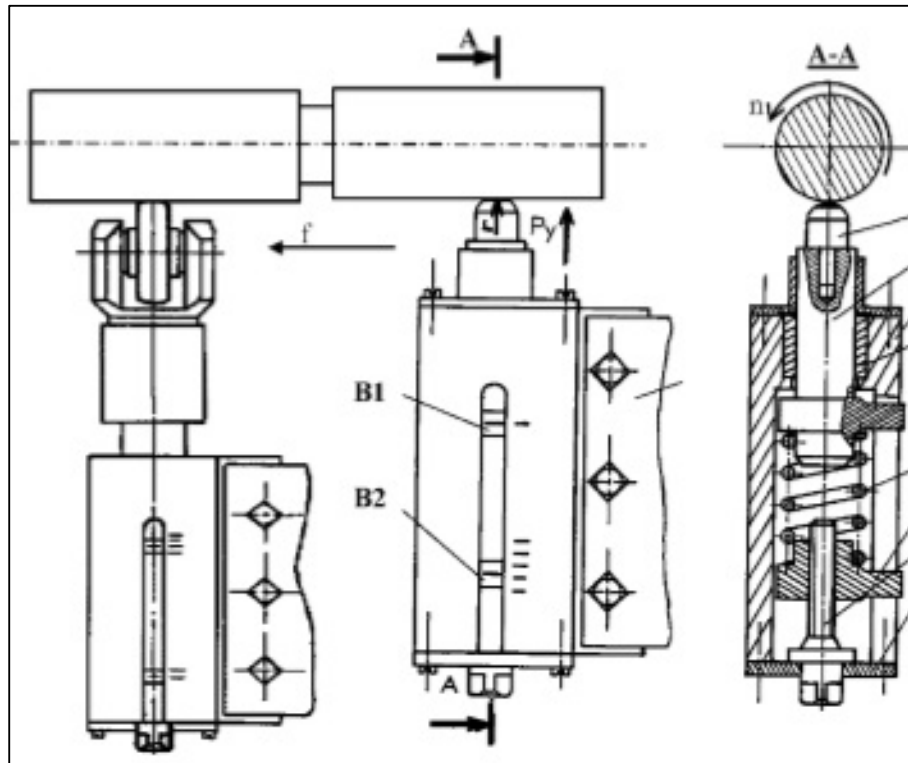


Figura 22 - Equipamento de polimento com contato através de esfera ou rolete sobre superfície cilíndrica rotativa

Fonte: Hamadache *et al.* (2008, web).

Variando a ferramenta, Hamadache *et al.* (2008, web) conseguiu visualizar os resultado final do polimento e a dureza final do material.

Este tipo de processo apresentava diferentes rendimentos. Os dados desta pesquisa demonstraram que a usinagem de aço apenas endurecido apresentava maior rugosidade final que os processos com ferramenta com ponta de contato esférica e cilíndrica respectivamente.

Através dos resultados obtidos, pode-se observar que a diferença de acabamento final é bastante significativa, estando representada na Figura 23.



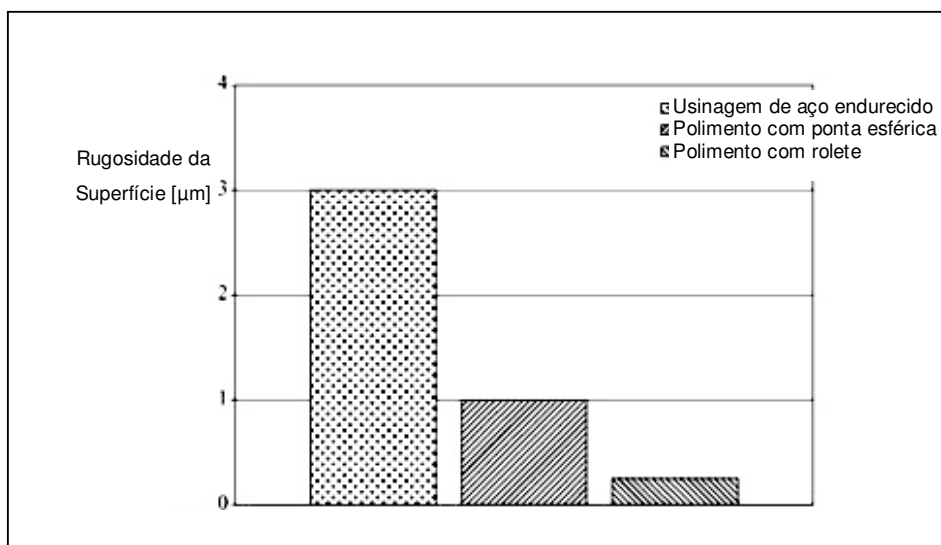


Figura 23 - Tipo de interação mecânica entre peça-ferramenta  
 Fonte: Hamadache *et al.* (2008, web).

Assim, processos automatizados por contato ferramenta-peça, apresentam efeito indesejado de aumento da dureza superficial devido ao encruamento do material conforme representado na Figura 24.

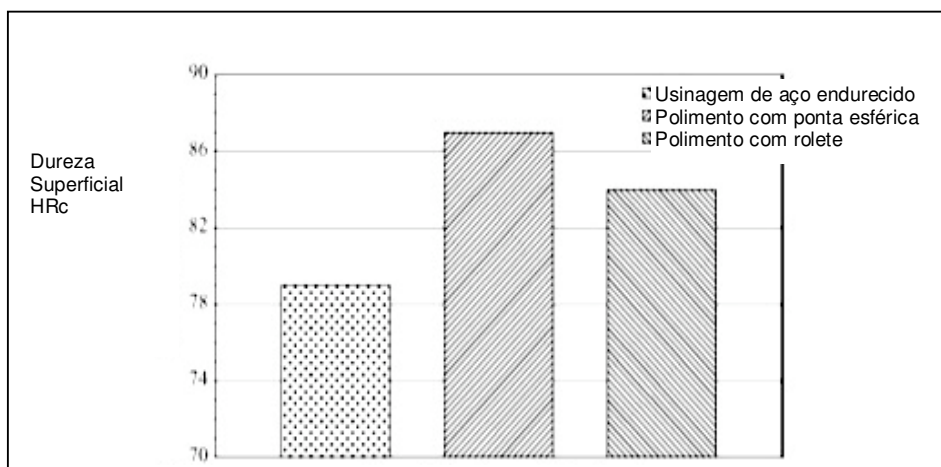


Figura 24 - Tipo de tratamento mecânico  
 Fonte: Hamadache *et al.* (2008, web).

Conforme estudos apresentados por Luca, Neagu-Ventzel, Marinescu (2008, web), foram variadas as forças da ferramenta contra a peça a ser polida. A força da ferramenta ( $f_f$ ) de polimento, com esfera circulante a influenciou na redução da rugosidade, porém com efeitos indesejados de encruamento conforme pode-se visualizar na Figura 25.

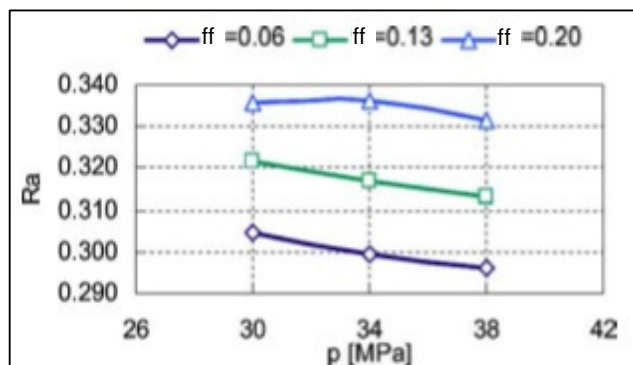


Figura 25 - Rugosidade x pressão com raio da esfera igual 0,2mm e rotação=0,05mm/ver  
Fonte: Luca, Neagu-Ventzel, Marinescu (2008, web).

Estudos realizados com ferramenta com esfera rotativa demonstraram aumento da dureza superficial gerada por microcamada de encruamento (SHIOU e CHEN, 2008, web).

Os resultados referentes à variação de pressão do abrasivo e o ganho no percentual de rugosidade, podem ser comprovados através dos estudos de Hamadache *et al.* (2008, web) e os dados experimentais demonstram que se aumentarmos a pressão da ferramenta sobre a superfície da peça, ocorre um aumento de dureza superficial do material, o que poderia ser um efeito indesejável caso exista necessidade de usinagens posteriores.

O aumento da dureza dificulta processos de usinagem, aumenta a resistência ao corte, necessitando-se de máquinas mais potentes e ferramentas com maior desempenho em relação à tração e temperatura, conforme Figura 26.

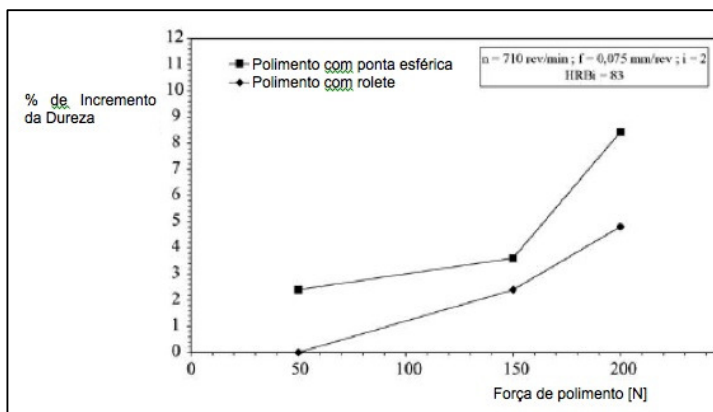


Figura 26 - Efeito dos parâmetros do regime de tratamento na rugosidade superficial  
Fonte: Hamadache *et al.* (2008, web).

### 2.5.4.3 Polimentos de superfícies externas com uso de laser assistido

Conforme Einstein (1916, *apud* Lima *et al.*, 2007), Theodore Maiman inventou o primeiro aparelho de raio laser em 1960 no Hughes National Laboratory Institute. Os princípios de emissão estimulada de luz, parte central da tecnologia a laser, foram teorizado por Albert Einstein.

A tecnologia laser em resumo, ocorre quando um fóton (quantidade de energia luminosa) atravessa um determinado meio, provocando uma transição de fase eletrônica e produzindo um novo fóton. Assim, os fótons vão se multiplicando e excitando outros amplificando a luz, intitulada laser.

Segundo Lima *et al.* (2007), o processo intitulado de texturização a laser é usado para a criação de rugosidades sobre a superfície do material. O processo é bastante preciso e permite obter rugosidades desde alguns nanômetros até centenas de micrômetros.

Um esquema básico de um equipamento com laser assistido focalizando uma peça pode ser melhor entendido na Figura 27.

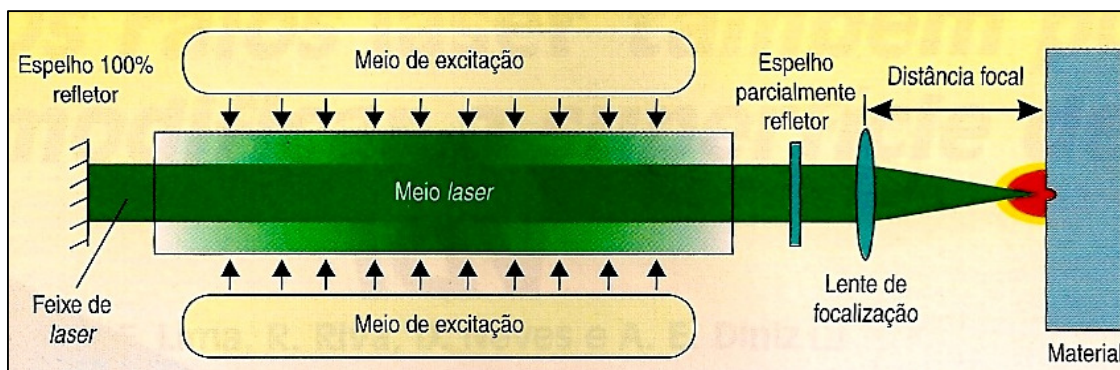


Figura 27 - Esquema de um laser focalizado na peça  
Fonte: Lima *et al.* (2007).

O processo de polimento com o uso de laser assistido possibilita bons resultados de polimento, mas os ganhos de rugosidade têm como contraponto ao método o aumento da dureza superficial e o aparecimento de micro-trincas, o que acarreta falhas por fadiga e conseqüente diminuição da vida útil do produto (TIAN e SHIN, 2007, web).

#### 2.5.4.4 Outros processos de polimento

O Instituto Fraunhofer de Tecnologia de Produção na Alemanha tem desenvolvido processo de polimento de moldes sem a utilização de abrasivos, mas com utilização de membranas de borracha. Este processo tem como vantagens a flexibilidade e garantia de reprodutibilidade necessárias à geometrias e ao perfil da superfície da peça.

Segundo o pesquisador da Instituição, Zunke (2007), a membrana submete à peça a uma distribuição de pressão constante o que garante as condições de processamento da peça.

Processos de deposição de películas metálicas composta de Cromo e Molibdênio na superfície têm sido estudados. Segundo experimentos de Harish *et al.* (2008, web), demonstram redução da rugosidade superficial, mas efeitos indesejáveis como a alteração das características elétricas do material.

Assim, com uma avaliação de diversos métodos, pode-se observar que pressão do abrasivo, temperatura fornecida à superfície da peça, granulometria e o próprio tempo de processo são as variáveis mais importantes estudadas atualmente.

#### 2.6 Polimento por ultrassom

O processo de polimento por ultrassom visa a possibilidade de melhoramento de acabamento em superfícies, externas e internas, das mais variadas geometrias. Sua restrição está relacionada apenas à granulometria do abrasivo, que deve ser adequado às dimensões da peça a serem polidas caso sejam superfícies e rugosidades de difícil acesso.

## 2.6.1 Cerâmicas piezoelétricas e ultrassom

Segundo APC - American Piezo Ceramics Inc (2002), quando minerais cristalinos submetidos à forças externas, tornam-se eletricamente polarizados. Assim, tração e compressão geram diferenças de potencial com polarização, e quando os mesmos são submetidos às tensões elétricas, geram forças mecânicas de tração e compressão com o mesmo comportamento, conforme pode ser observado na Figura 28.

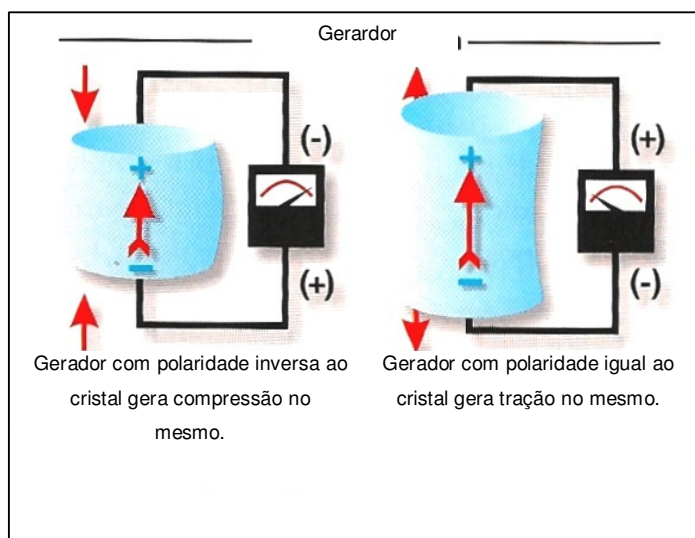


Figura 28 - Gerador e motor com elemento piezoelétrico  
Fonte: APC (2002).

Desta forma, se aplicarmos uma tensão num cristal piezoelétrico o mesmo produz movimento com parâmetros estabelecidos pela composição do cristal.

Segundo a APC, os modos de vibração ou as direções e sentidos das forças emitidas pelo cristal são resultado também da geometria dos mesmos conforme apresentado na Figura 29.


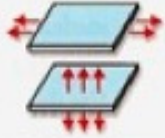



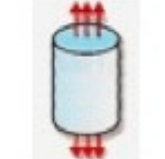
Formato do Cristal	Direção da Vibração
Geometria	
Placa	
Disco	
Anel	
Retangular	
Cilíndrico	

Figura 29 - Modo de vibração para os formatos comuns de cristais  
Fonte: APC (2002).

Desta forma, existem no mercado equipamentos de limpeza através de energia ultrassônica. Estes equipamentos são confeccionados com cristais com diversas frequências naturais que estão disponíveis no mercado.

Com o objetivo de transmitir vibração para um recipiente contendo produtos de limpeza, são confeccionados com a fixação do cristal no recipiente onde fica o objeto submerso e o mesmo é excitado com o objetivo de transferir ao fluido do recipiente as vibrações e conseqüentemente à peça que deve ser limpa.

Um modelo esquemático deste tipo de equipamento pode ser representado, conforme Figura 30.

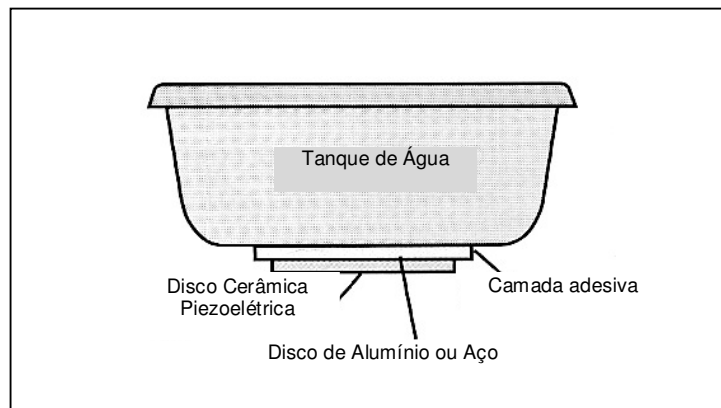


Figura 30 - Disco ressonante "simples, mas efetivo projeto paralimpeza ultrassônica  
Fonte: APC (2002).

Variações na construção deste equipamento podem ser realizadas para atendimento de requisitos de projeto.

Em caso de peças de grande porte e da necessidade da estrutura da cuba suportar grandes cargas, levando ao espessamento da parede do tanque e conseqüentemente ao amortecimento da vibração, o sistema de ultrassom passa a ser fixado em transdutores de imersão ficando imersos dentro da cuba. Desta forma, as dimensões da máquina podem ser estendidas e o número de transdutores passa a ser dimensionado com a potência necessária para agitar o volume do tanque.

## 2.6.2 Processo de limpeza por ultrassom

O processo de limpeza por ultrassom é um processo bastante utilizado atualmente. Em virtude da agitação ultrassônica dos produtos de limpeza em um recipiente, o mesmo intensifica as reações do produto com a superfície a ser livrada de incrustações ou sujidades.

A oscilação dos produtos químicos (flúidos) é gerada através da oscilação dos cristais piezoelétricos com a alternância de polaridade de um gerador elétrico.

Segundo Award (2007, web), as ondas geradas no líquido de limpeza propagam-se perpendicularmente à superfície do cristal ressonante. Estas ondas interagem com o líquido gerando implosões de cavitação. A alta intensidade destas ondas criam bolhas de vapor e vácuo com tamanho proporcional à frequência de ultrassom aplicada.

Esta característica apresenta-se ilustrada na Figura 31.

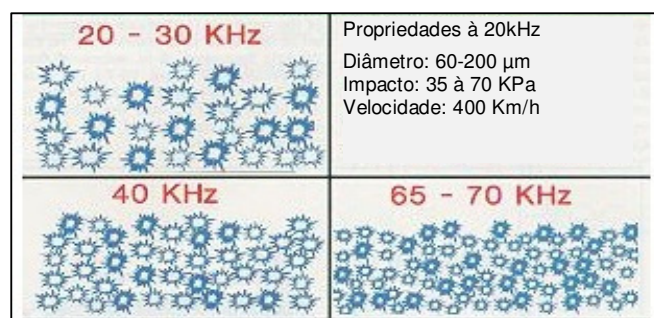


Figura 31 - Variação do diâmetro das bolhas em função da frequência do ultrassom  
Fonte: Award (2007, web).

Segundo Award (2007, web), para ambientes líquidos compostos por água a frequência do transdutor do ultrassom deve trabalhar na faixa de 20 KHz à 40 KHz. Para frequências de 25 kHz as bolhas de vácuo apresentam diâmetros na faixa de 50-150 µm.

Para frequências de 20 kHz, estima-se que a pressão gerada esteja entre 35 e 70kPa e as temperaturas na faixa de 5000°C, com velocidade das ondas de 400Km/h, conforme apresentado na Figura 31.

Desta forma, pode-se ter uma noção das grandezas envolvidas no banho abrasivo com a utilização desta energia para a movimentação de um banho abrasivo de polimento.

Um esquema de funcionamento do processo de limpeza pode referenciar a ação esperada da pressão e velocidade ultrassônica sobre o fluido abrasivo na figura 32.



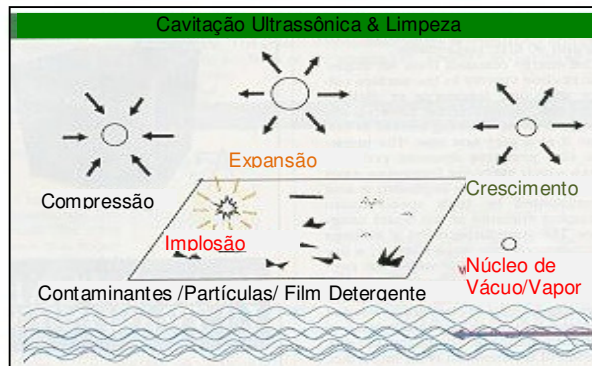


Figura 32 - Geração de cavitação e abundância  
Fonte: Award (2007, web).

### 3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste projeto ocorreu seguindo a metodologia descrita abaixo, com o respectivo detalhamento.

#### 3.1 Levantamento de dados de mercado

Os dados referentes ao potencial de mercado deste processo foram levantados através de pesquisa em bancos de dados de órgãos governamentais e de representação de classe como sindicatos e associações.

Visitas técnicas em empresas da região norte do estado de Santa Catarina foram realizadas, para levantamento das necessidades técnicas e dificuldades encontradas neste tipo de processo, sendo unânime a dificuldade de manter repetibilidade nos resultados de polimento.

As empresas possuem em sua maioria diversos funcionários e torna-se necessário observar qual a habilidade de cada um, para que os serviços sejam distribuídos por habilidade, para que assim se atinjam os requisitos de rugosidade e homogeneidade solicitados pelo cliente.

#### 3.2 Materiais

Os materiais necessários para a execução dos ensaios foram adquiridos com a composição química: C=0,370%, Mn=1,590%, Si=1,590%, P=0,005%, Cr=1,850%, Ni+0,730%, Co=0,020%, Cu=0,090% e Ti+0,005%, conforme atesta o laudo apresentado no Anexo A, atendendo a composição química padronizada para o material P20.

Visando-se o atendimento do estudo desenvolvido, o material adquirido foi escolhido no formato de barra cilíndrica com diâmetro de 1 polegada. Este formato foi definido com o objetivo de facilitar processos de usinagem.

Para garantir a manutenção de variáveis constantes referentes ao material definido, a aquisição do material ocorreu com a aquisição de uma barra de 1000 mm de comprimento, prevendo-se a confecção de corpos de prova em número suficiente para a realização dos ensaios e garantindo uma margem de segurança para eventuais desvios de processo como: falhas de fabricação ou resultados com dispersão que evidenciasse a necessidade de confecção de mais corpos de prova com a mesma composição química.

### 3.3 Agentes abrasivos

Em virtude do método de polimento utilizar-se de energia proveniente de ultrassom, a propagação desta energia e conseqüentemente deslocamento da partícula abrasiva sobre a superfície a ser polida, tem como requisito que o material abrasivo esteja disponível em forma de fluído.

Os agentes de polimento, definidos podem ser encontrados nos principais fornecedores de insumos para metalografia em diversas granulometrias.

Para evidenciar a influência da granulometria do abrasivo nos resultados do polimento, foram utilizadas aluminas com três granulometrias distintas (0,05 $\mu$ m, 0,3 $\mu$ m e 1,0 $\mu$ m), visando o estudo da produtividade e acabamento obtido pelo processo de polimento em questão.

Para estudo da influência do tipo de abrasivo, adotou-se pasta de diamante com granulometria nominal na faixa 1,0 a 2,0  $\mu$ m e um diluente comercial, sendo utilizada para comparação com o óxido de alumínio de 1,0  $\mu$ m.

As aluminas foram adquiridas mantendo o mesmo fabricante nas variações de granulometria e a pasta de diamante e diluente também conforme Figura 33.

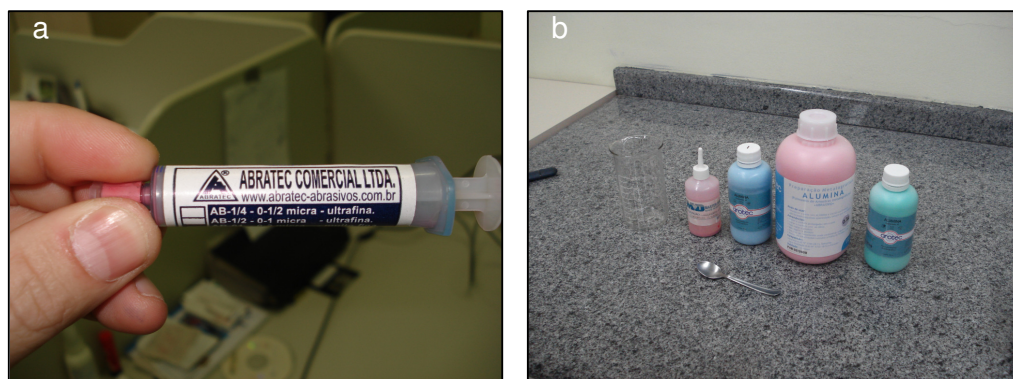


Figura 33 - Produtos utilizados, (a) pasta de diamante Abratec, (b) diluente Diamond e alumina Arotec

### 3.4 Equipamento de ultrassom

Conforme abordado por Award (2007, web), o desempenho ótimo para limpeza de peças ocorre na faixa de 20 à 40 kHz. Como artigos pesquisados de polimento não apresentaram o uso desta tecnologia, utilizou-se esta faixa para definição dos equipamentos também para o processo de polimento.

Foram pesquisados diversos equipamentos de ultrassom disponíveis no mercado brasileiro. Os equipamentos encontrados possuíam em sua totalidade a frequência de vibração constante não sendo possível a alteração de frequência do mesmo equipamento sem a troca do cristal piezolétrico devido a sua frequência fundamental de ressonância.

Assim foram definidas duas frequências distintas para a confecção dos mesmos visando o estudo da influência da frequência nos objetivos propostos.

Como na cidade de Joinville, local onde ocorreram os ensaios, foi identificado fabricante de equipamentos de ultrassom, o mesmo foi selecionado para confecção dos equipamentos.

Para manutenção de variáveis constantes, os equipamentos foram confeccionados nas frequências de 28 e 40 kHz respectivamente, conforme Figura 34, com geometria da cuba que condiciona o líquido a ser agitado, suas dimensões, volume, sistema eletrônico e posicionamento do cristal.



Figura 34 - Equipamentos de ultrassom utilizados nos ensaios

Os cristais piezoelétricos utilizados na base externa da cuba possuem formato cilíndrico promovendo movimentos radiais e perpendiculares à superfície do corpo de prova a ser polida conforme abordado na Figura 29.

### 3.5 Fabricação de corpos de prova

Em virtude da geometria da cuba do equipamento de ultrassom ser cilíndrica, concluiu-se que a geometria apesar de não ser um fator relevante em relação ao plano da superfície a ser polida, mas manteria as forças de pressão radiais lateralmente balanceadas de forma que a possibilidade de descentralização da peça no banho por forças laterais seriam reduzidas.

Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos com face superior planas. As ranhuras em forma espiral deixadas pelo processo de torneamento foram removidas pelo processo subsequente de retificação plana.

Os equipamentos utilizados na confecção dos corpos de prova foram um torno CNC da marca Romi modelo Galaxy 10 e uma retífica plana da marca Clever, conforme Figura 35.

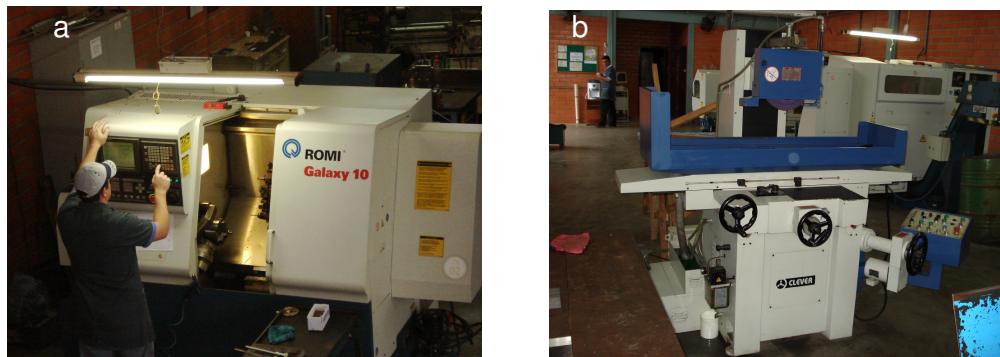


Figura 35 - Equipamentos utilizados na confecção dos corpos de prova, (a) Torno Romi, (b) Retífica Clever

Com o objetivo de garantir os processos de usinagem com o atendimento de requisitos técnicos foram utilizados dois critérios. O primeiro a escolha de uma empresa parceira com competência técnica adequada e certificação dos seus processos com base na norma ISO9001:2000, conforme certificado apresentado no Anexo B. O segundo critério foi a discussão dos parâmetros utilizados e acompanhamento da confecção, sendo adotados parâmetros técnicos recomendados pelos fabricantes das pastilhas e rebolos utilizados.

Com o objetivo de garantir a rastreabilidade dos resultados e excluir a possibilidade de troca de informações, os corpos de prova receberam numeração sequencial e prevendo a necessidade de mais lotes, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Codificação dos corpos de prova

Tipo de Superfície	Processo de acabamento	Lote	Número
Cilíndrica com face plana com riscos microscópicos	Retificação em retífica plana $R\bar{a}=0,24 \mu\text{m}$	A	0 a 15

### 3.6 Técnicas de caracterização utilizadas

Para caracterização inicial das grandezas controladas e acompanhamento durante todo o processo de ensaios, foram estabelecidos equipamentos e métodos para garantir a confiabilidade dos resultados.

Assim, os controles se subdividiram em metrológicos e visuais.

### 3.7 Controles metrológicos

O controle metrológico da rugosidade, foi estabelecido através do rugosímetro Mahr. O equipamento em questão possui duas casas decimais de micrometro, e em seu manual, o mesmo estabelece que a precisão do equipamento esteja na terceira casa apesar de não ser demonstrada no visor do equipamento.

Desta forma, como as rugosidades a serem medidas estão na casa de centésimos de microns, o equipamento atendeu os parâmetros necessários para os ensaios.

A rugosidade foi medida dez vezes para simulação de dez cavidades e com o objetivo de reduzir erros aleatórios de medição.

Uma foto do equipamento utilizado está apresentada na Figura 36.



Figura 36 - Rugosímetro de fabricação alemã marca Mahr – Modelo M4Pj

A dureza superficial também tornou-se, segundo diversos autores citados, um dos parâmetros importantes. Desta forma, adotou-se um durômetro com escala Rocwell para execução das medições.

Para controlar a temperatura do banho abrasivo, utilizou-se de um termovisor, apresentado na Figura 37. A preocupação de controle desta grandeza foi fruto da

temperatura que o fluido pudesse atingir e a respectiva influência dela na superfície, com possibilidade de aumento de dureza.



Figura 37 - Termovisor marca Irisys

A utilização deste tipo de equipamento tornou-se também necessária para avaliar mudanças de textura da alumina durante os ensaios iniciais.

Desta forma, foi possível visualizar os gradientes de temperatura do banho abrasivo e tentar caracterizar a influência da temperatura na densidade dos abrasivos.

### 3.8 Controles visuais

Para controlar visualmente a redução dos degraus de usinagem demonstrados nas Figuras 8 e 11, foram captadas imagens microscópicas.

O registro destas imagens utilizou-se de um microscópio marca Leika, conforme Figura 38, com lentes objetivas com aumento de 10X e oculares com aumentos de 10X, 50X e 100X. Utilizou-se de câmera digital e software Pixelview para captação das imagens eletrônicas.





Figura 38 - Microscópio Leica

Para garantir a confiabilidade das imagens óticas quanto à possíveis distorções devido aos planos inclinados da superfície rugosa e da refletividade luminosa da lâmpada do equipamento, utilizou-se também para o controle final microscopia eletrônica de varredura. Desta forma os resultados das microscopias óticas puderam ser isentados de possíveis distorções.

Uma foto do equipamento utilizado está apresentada na Figura 39.

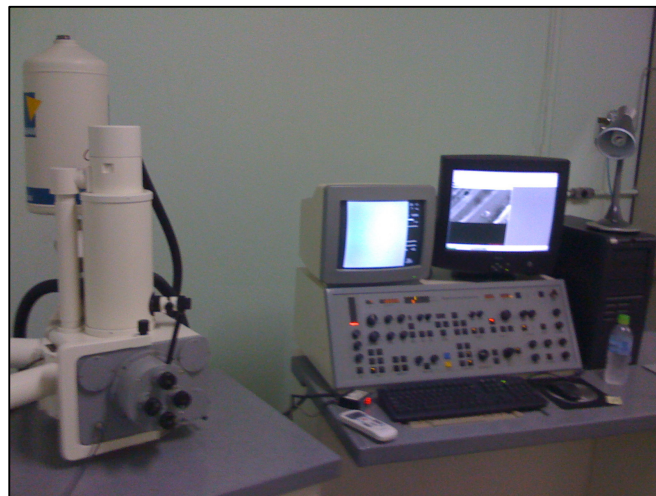


Figura 39 - Microscópio eletrônico de varredura

Também foi uma preocupação a caracterização através de micrografia da superfície transversal à polida, com e sem ataque químico, para visualizar possíveis

alterações superficiais que possam induzir erros de interpretação nos resultados como deposições de abrasivos e alterações granulares.

### 3.9 Séries de polimento

Os ensaios ocorreram através da imersão dos corpos de prova nos meios abrasivos com a energização através de vibração ultrassônica produzindo-se assim uma movimentação do agente abrasivo em contato com as superfícies dos corpos de prova, analisando-se as características propostas.

Para o estudo, foi definida a seguinte distribuição de corpos de prova por abrasivo e frequência conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição de Corpos de Prova

Abrasivo	Alumina						Pasta de Diamante	
	0,05		0,3		1,0		0 à 2	
Granulometria [ $\mu\text{m}$ ]	0,05		0,3		1,0		0 à 2	
Frequência [Hz]	28	40	28	40	28	40	28	40
Identificação do Corpo de Prova Utilizado	A4	A5	A2	A3	A0	A1	A6	A7

Foram utilizados instrumentos e equipamentos de medição, rugosímetro e microscópio ótico, nas avaliações das variações de rugosidade obtidas com os ensaios.

As rugosidades foram medidas utilizando-se os critérios de amostragem e *cut off* estabelecidos pela NBR ISO 4288 (2008, p.6), conforme Figura 40.

$R_a$	Comprimento de amostragem de rugosidade	Comprimento de avaliação de rugosidade
$\mu\text{m}$	$l_r$ mm	$l_n$ mm
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Figura 40 - Comprimentos de amostragem de rugosidade para medições de  $R_a$   
 Fonte: NBR ISO 4288 (2008, p.6).

Os dados foram obtidos realizando-se dez medições iniciais de  $R_a$  em cada corpo de prova. O dobro do mínimo recomendado pela norma NBR ISO 4288 (2008, p.8) à qual faz considerações que o aumento dos pontos produz redução de incerteza de medição e que a prescrita na NBR ISO 12179 (2002). Para a calibração de apalpadores dos instrumentos de medição de contato em condições controladas, somente três.

O  $R_{\bar{a}}=0,24 \mu\text{m}$  para todas as medições iniciais demonstrou a necessidade de um *cut off* de 0,8mm como comprimento da amostra pelo rugosímetro, mesmo assim todos os processos de medição ocorreram com dez pontos e utilizando-se do  $R_{\bar{a}}$  para a caracterização dos resultados de medição ao longo dos ensaios.

Todos os ensaios foram realizados ao longo do tempo (0, 15, 30 e 45 minutos, respectivamente). Com o objetivo de resguardar o equipamento de ultrassom, os ensaios foram realizados de forma incremental em períodos de 15 minutos, ou seja, séries de 15 minutos que somadas apresentam os resultados de 30 e 45 minutos conforme citados.

O desenvolvimento dos ensaios ocorreu com equipamentos, 28 e 40 KHz, trabalhando paralelamente e com cronometragem conforme Figura 41.



Figura 41 - Equipamentos de ultrassom trabalhando paralelamente com controle de tempo

Para manutenção de cobertura homogênea dos corpos de prova em todos os ensaios, manteve-se o volume de abrasivo constante na faixa de 100ml. O controle do abrasivo no início e término dos experimentos comprovou a ausência de evaporação dos fluídos e ficando caracterizada a inexistência de perdas comparando-se ao processo manual.

## 4 RESULTADOS

Os corpos de prova passaram por diversos ensaios para estudo dos objetivos propostos. Uma descrição detalhada da execução dos ensaios e respectivos resultados estão apresentados a seguir.

### 4.1 Caracterização inicial

A etapa inicial dos ensaios ocorreu com a caracterização dos corpos de prova antes que os mesmos fossem submetidos ao processo de polimento por ultrassom.

A rugosidade inicial da superfície plana foi medida em dez pontos aleatoriamente escolhidos através do rugosímetro representado na Figura 36.

Os resultados das medições demonstram que os parâmetros de processo utilizados garantiram estabilidade de rugosidade ao longo da superfície, o que pode ser comprovado pelo baixo desvio padrão das medidas que pode ser visualizado na Tabela 5. Nela estão representados os resultados do  $R\bar{a}$  de cada corpo de prova e dados mais detalhados podem ser avaliados no Anexo C.

Tabela 5 - Medições do  $R\bar{a}$  dos corpos de prova antes do processo de polimento

Corpo Prova	Ra médio t=0min [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio Padrão Inicial [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio Padrão Total [ $\mu\text{m}$ ]
A0	0,23	0,01	0,03
A1	0,23	0,01	0,02
A2	0,24	0,02	0,03
A3	0,23	0,02	0,04
A4	0,27	0,05	0,04
A5	0,25	0,03	0,04
A6	0,24	0,05	0,04
A7	0,21	0,02	0,13
<b>Média</b>	<b>0,24</b>	<b>0,03</b>	<b>0,06</b>

Em virtude do endurecimento superficial ser um efeito indesejado nos processos automatizados citados no item 2.4.4.2 e 2.4.4.3, foram caracterizadas as durezas iniciais na escala Rockwell C.

Os resultados estão representados na Tabela 6.

Tabela 6 - Medição de dureza HRc momento inicial

Nº de medições	Medição de Dureza Superficial [HRc]
	<b>A8</b>
1	32,0
2	32,2
3	30,3
<b>Média</b>	<b>31,5</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,9</b>

A microscopia ótica e eletrônica de varredura foi realizada para comparação em etapas posteriores.

Nas Figuras 42 e 43, pode-se visualizar a caracterização visual dos corpos de prova utilizados antes do processo de polimento com ultrassom.

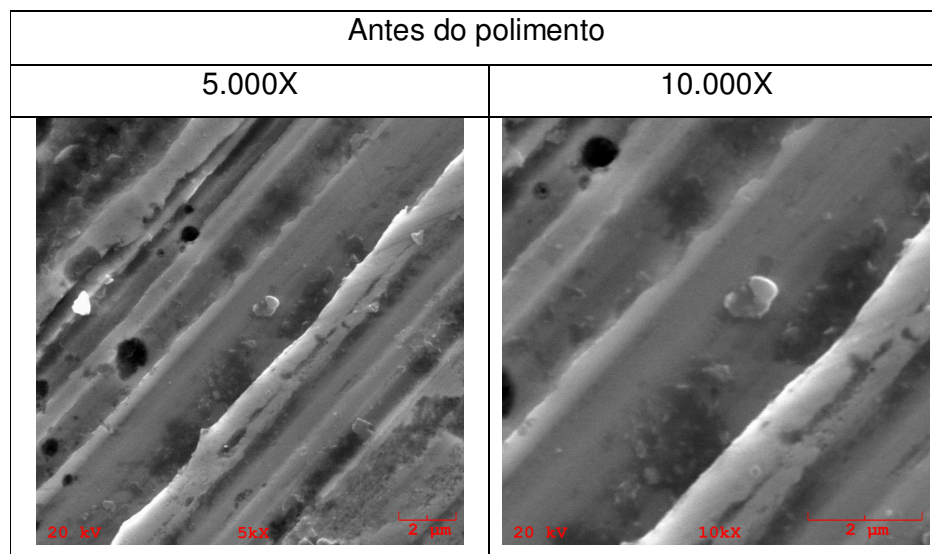


Figura 42 - MEV de corpo de prova antes do polimento – Corpo A8

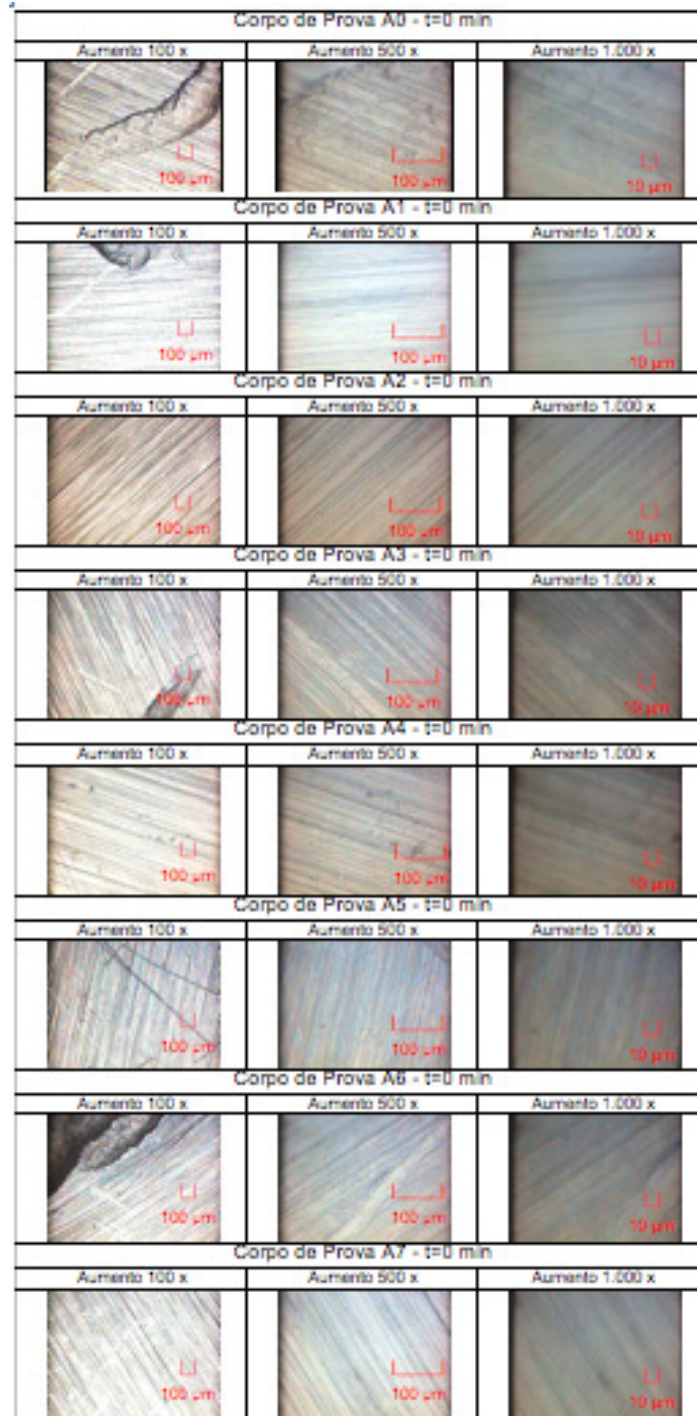


Figura 43 - Macrografia com microscopia ótica de corpo de prova antes do polimento

## 4.2 Resultados obtidos

Para retratar os objetivos propostos os resultados apresentados abaixo estão tabulados graficamente e serão correlacionados às imagens de microscopia sempre que pertinente.

## 4.3 Estudo da influência do tempo em relação à rugosidade

O estudo da influência do tempo na redução da rugosidade superficial tem por objetivo verificar a correlação destas variáveis e pontos ótimos de trabalho.

O comportamento da rugosidade em relação ao tempo pode ser melhor visualizado no gráfico da Figura 44 que apresenta o comportamento geral de todos os ensaios realizados. Todos os resultados numéricos estão apresentados no Anexo C.

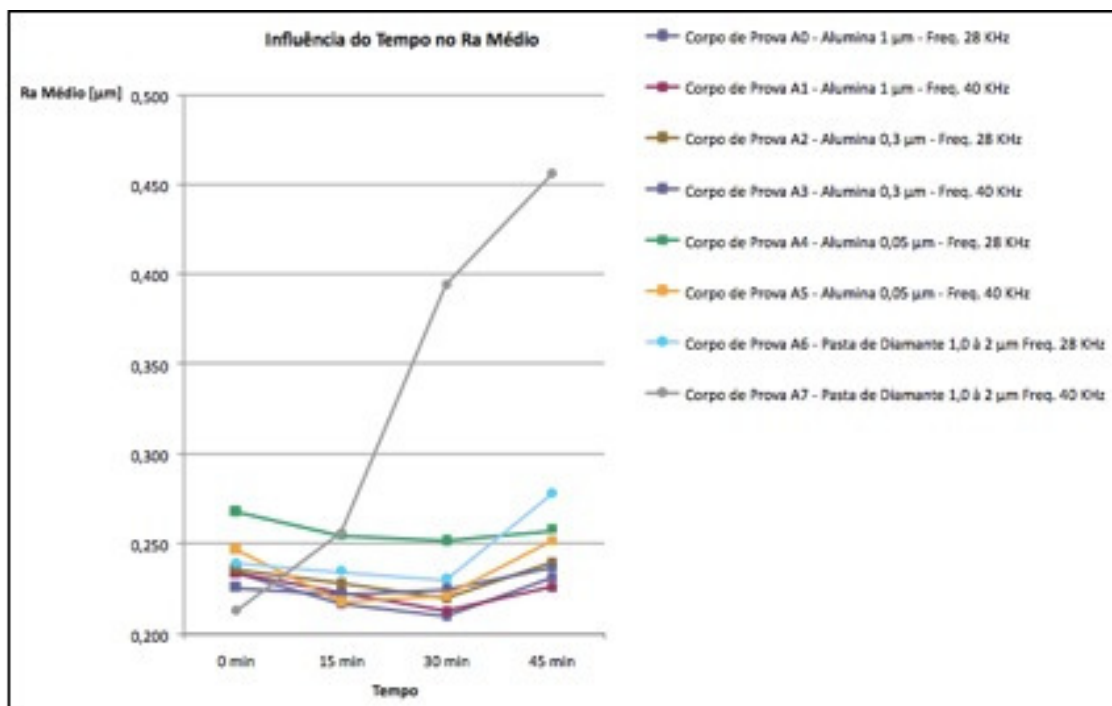


Figura 44 - Rugosidade em função do tempo



Os resultados demonstram que o tempo de exposição ao abrasivo apresenta comportamento com curvas deslocadas em relação ao nível de acabamento das superfícies, mas com perfis similares, todos com decréscimo de rugosidade nos tempos de quinze e trinta minutos e tendência de diminuição no intervalo ensaiado, porém com incremento de rugosidade na série subsequente totalizando os quarenta e cinco minutos.

Conforme apresentado por Ribeiro (2007) na Figura 18, as curvas possuem as mesmas características com exceção do abrasivo pasta de diamante na frequência de 40 kHz.

Esta condição de ensaio apresentou agressividade muito acima das demais, o que demonstra que o mesmo deve ser ensaiado com séries inferiores a quinze minutos, pois apresenta sinais de melhoria superficial, porém o desgaste acelerado foi mais significativo que a melhora da superfície. Este desgaste rápido e excessivo pode ser visualizado claramente na macroscopia da Figura 45.

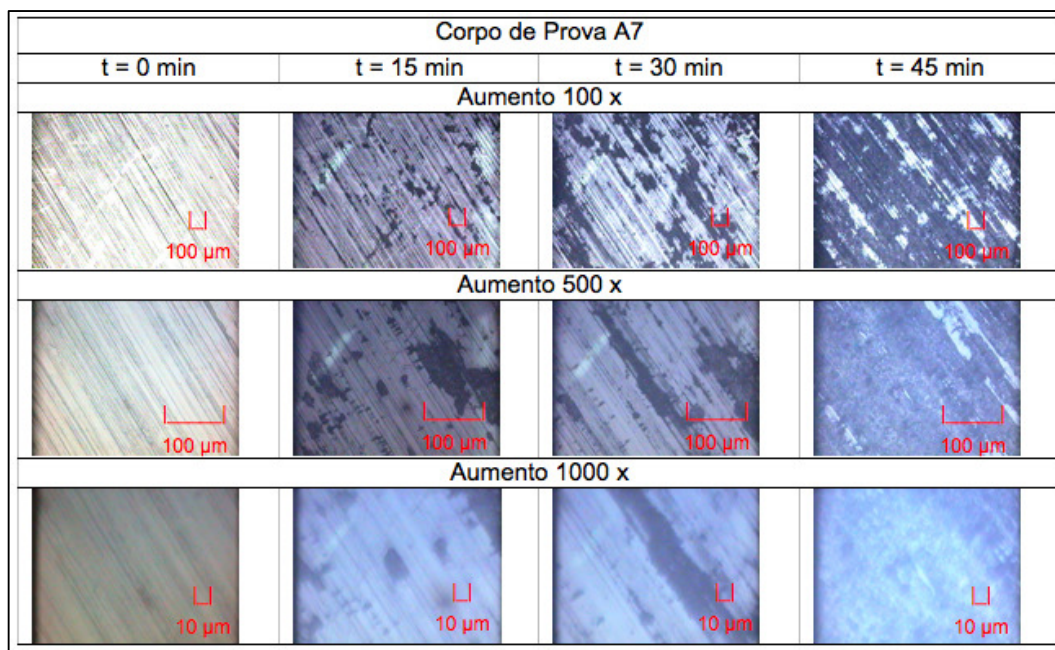


Figura 45 - Macroscopia da degradação acelerada do corpo de prova A7.

Desta forma, manteve-se a metodologia estabelecida, a qual atendeu todos os demais ensaios.

As demais curvas apresentadas na Figura 46 com as respectivas linhas de tendência e equação conforme coloração apresentada na legenda.

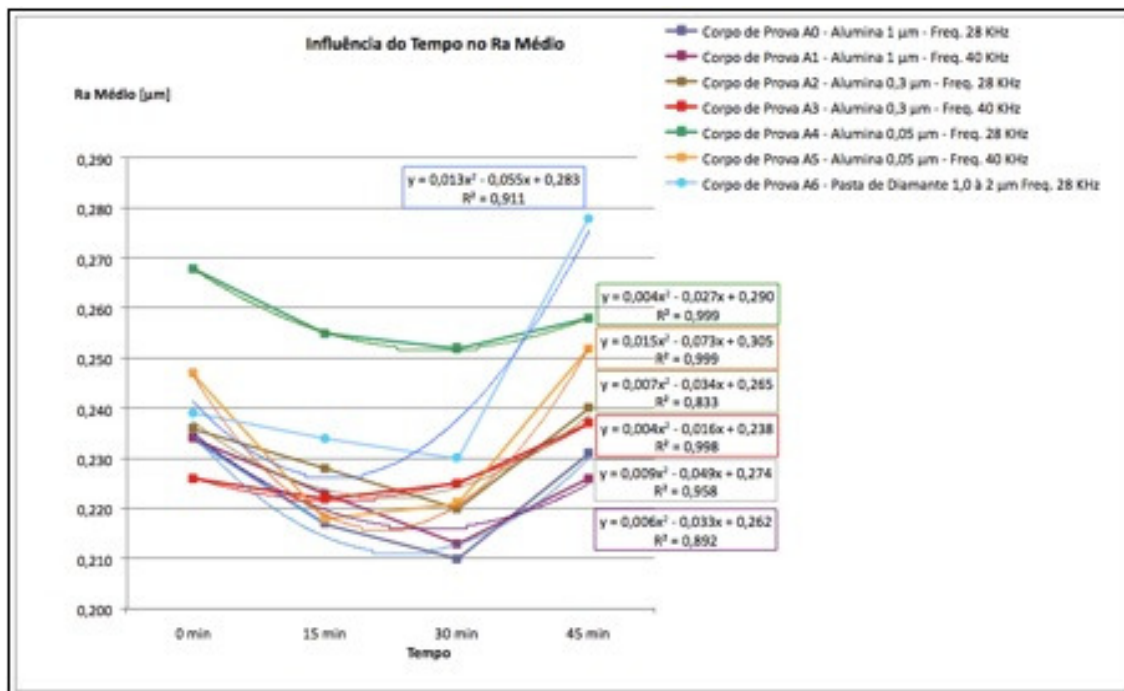


Figura 46 - Rugosidade em função do tempo

Os resultados foram acompanhados com macroscopia em função do tempo para todos os pontos estudados. Os mesmos encontram-se detalhados especificamente avaliados na sequência.

Cada equação apresentou o comportamento específico no tempo de cada combinação. Pode-se observar que rugosidade mais baixa no menor tempo, com alumina de 1,0 µm e frequência de 28 kHz ocorreria na equação teórica na faixa de 15 a 30 minutos. O pior desempenho pode ser avaliado ocorreu com a menor granulometria da alumina (0,05 µm) com frequência de 28 kHz.

Cabe ressaltar que as equações obtidas são de suma importância neste processo estudado, pois pode-se observar que o ponto de inflexão da maioria das curvas, situou-se abaixo de 30 minutos, o que retrata que a confecção de equipamentos para estes abrasivos e frequências devem respeitar tempo máximo de polimento inferior este.

Resultados específicos para cada caso podem ser calculados pelas equações apresentadas.

#### 4.4 Estudo da influência da granulometria da alumina em relação à rugosidade

Com a variação da granulometria da alumina, pode-se evidenciar no gráfico para a frequência de 28 KHz, que o comportamento das curvas demonstra melhor eficiência e menor tempo com abrasivos de maior granulometria (1,0  $\mu\text{m}$ ). As retomadas de rugosidade seguem o mesmo comportamento. Cabe registrar que o tempo ótimo de polimento encontrado nestes ensaios, determina que equipamentos nestas condições devem trabalhar abaixo de trinta minutos, conforme apresentado na Figura 47.

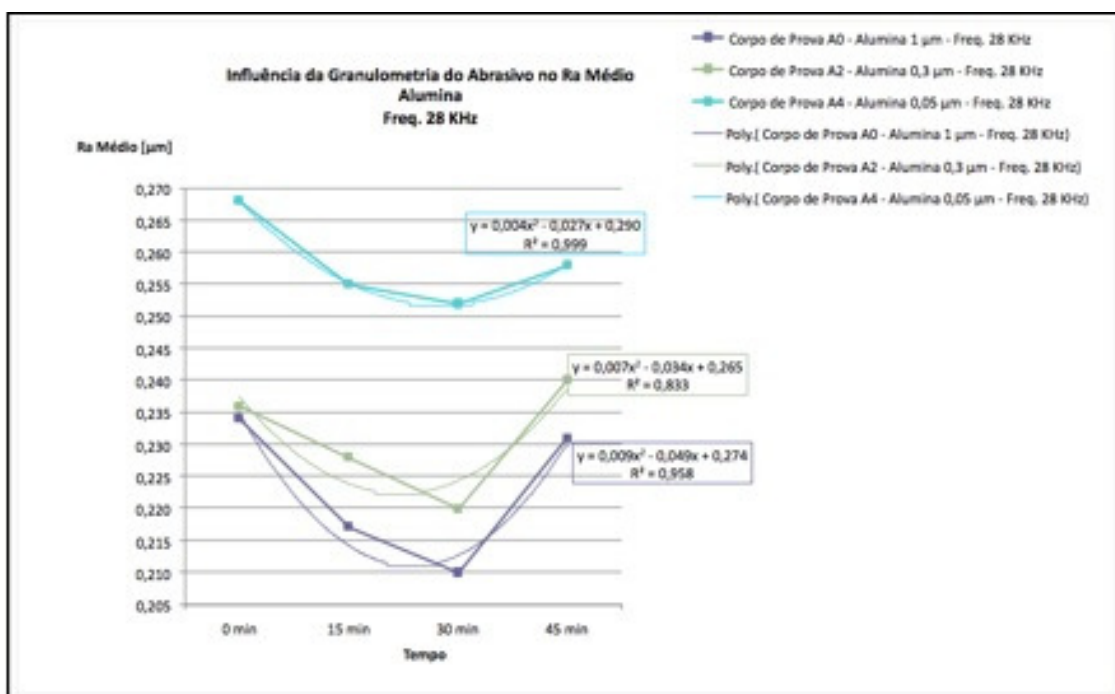


Figura 47 - Comportamento da rugosidade em função do tempo com variação da granulometria – Ultrassom com frequência de 28 KHz

Uma avaliação visual das superfícies ao longo das séries de 15 minutos retrata a degradação superficial, os riscos do processo de usinagem diminuem, mas as variações das alturas dos pontos por *pits* é quem gera incremento na rugosidade. Conforme já citado por Ribeiro (2007), a remoção de partículas mais macias, entre elas óxidos, vai gerando sulcos no material.

Uma visão desta evolução com graus de aumento diferenciados para o corpo de prova A0. Após o tempo de 15 minutos, pode-se observar o surgimento de

cavidades circulares com incremento de ocorrência em 30 minutos. Os riscos de usinagem ficam suavizados com o decorrer do tempo, conforme Figura 48.

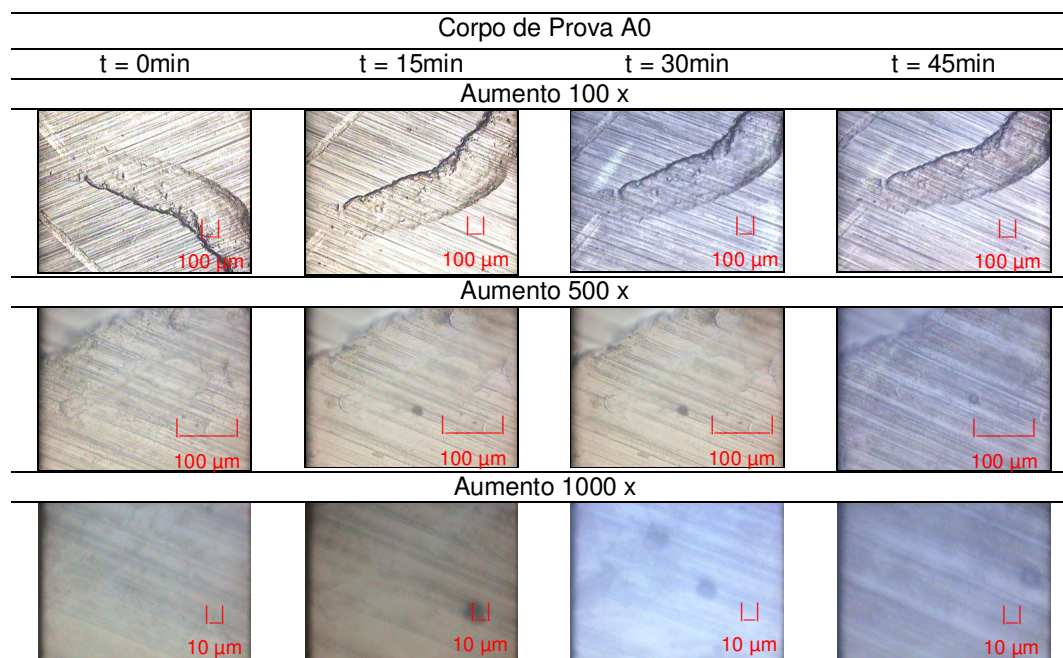


Figura 48 - Macroscopia do polimento e degradação por *pits* do corpo de prova A0

O mesmo comportamento pode ser verificado na Figura 49 para o corpo de prova A2.

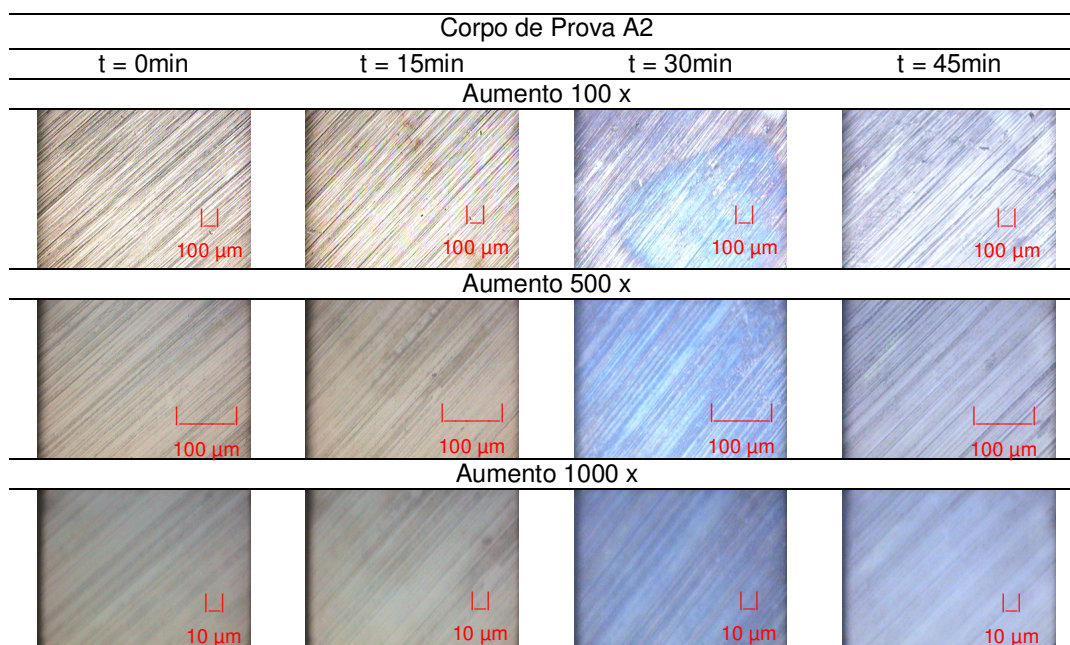


Figura 49 - Macroscopia do polimento e degradação por *pits* do corpo de prova A2



Repetindo-se novamente na Figura 50, para o corpo de prova A4.

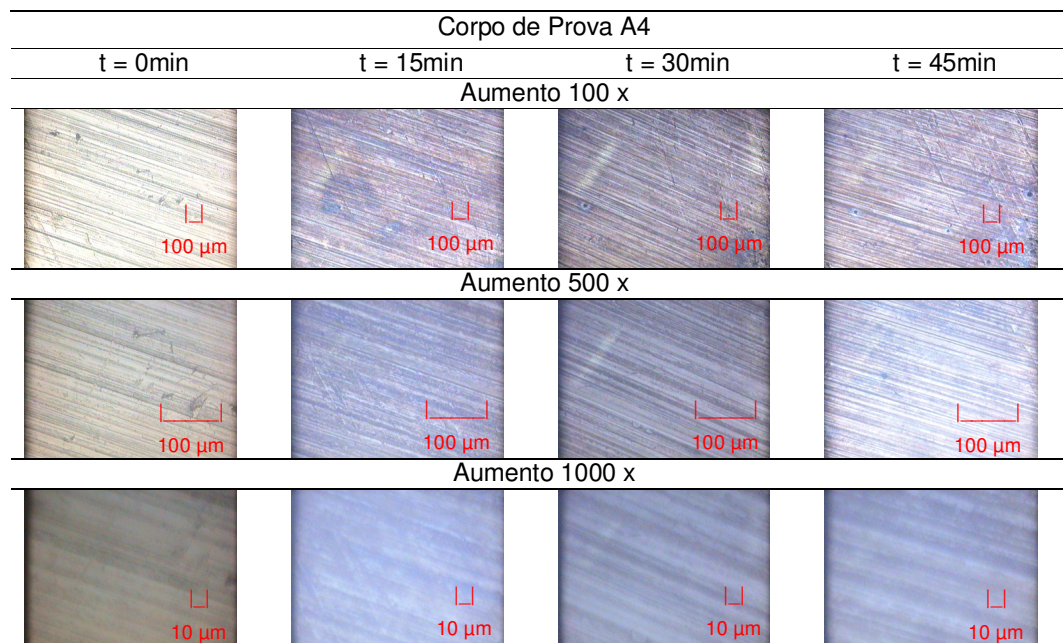


Figura 50 - Macroscopia do polimento e degradação por *pits* do corpo de prova A4

Analisando-se as imagens, as aluminas de menor granulometria demonstraram maior retomada. Na Figura 49, pode-se visualizar uma mancha azulada na superfície. Em virtude desta imagem acompanhamento da temperatura também foi realizado. Os resultados estão representados no item 4.2.6, porém não houve indícios de influência na rugosidade, pois as temperaturas não foram significativas para mudarem a estrutura cristalina do aço e as manchas desaparecerem nas séries posteriores.

Com a variação da granulometria da alumina na frequência de 40 kHz, o comportamento das curvas idêntico, mas ocorre inversão das curvas de 0,5 µm e 0,05 µm no desempenho. Não foi possível a identificação das causas que influenciaram esta inversão.

As retomadas de rugosidade das curvas seguem o mesmo comportamento.

Para a variação da granulometria, utilizou-se apenas alumina na comparação, porém também se fez um comparativo do efeito da frequência que pode ser verificado no gráfico da Figura 51.

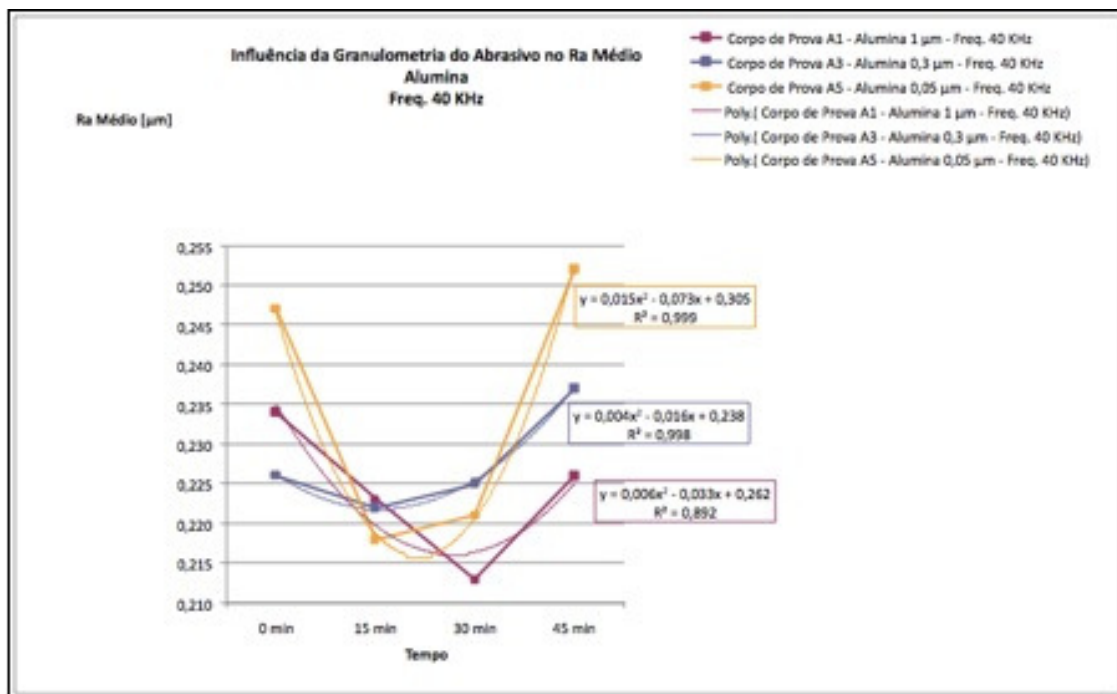


Figura 51 - Comportamento da rugosidade em função do tempo com variação da granulometria – Ultrassom com frequência de 40 kHz

Uma visão desta evolução com graus de aumento diferenciados para o corpo de prova A1, A3 e A5, pode ser visualizada nas Figuras 52, 53 e 54. Os comportamentos foram similares aos citados anteriormente.

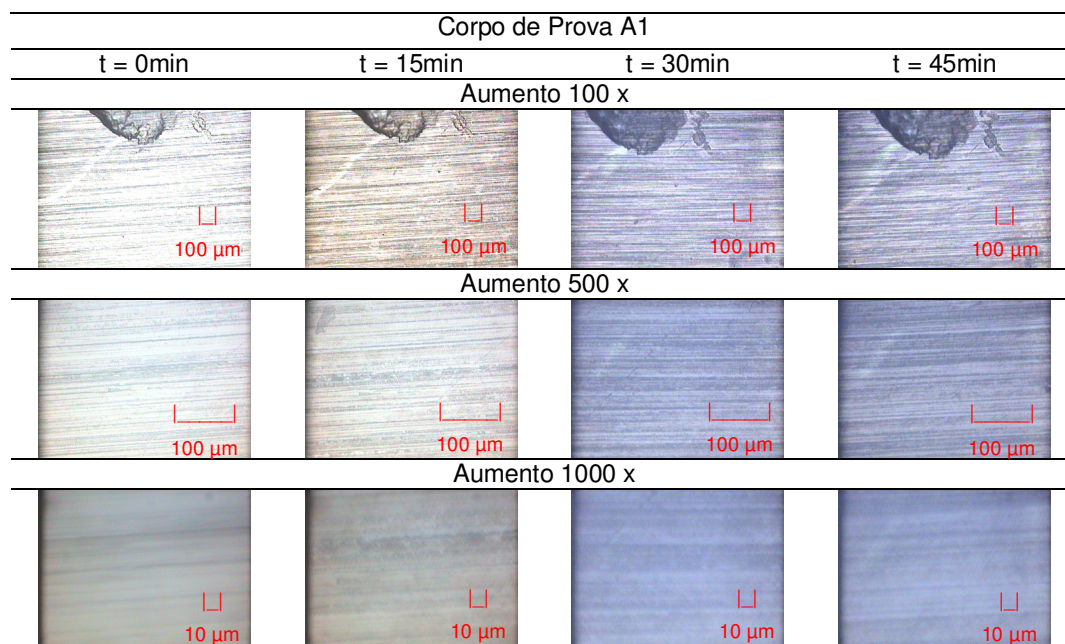


Figura 52 - Macroscopia do polimento e degradação por *pits* do corpo de prova A1

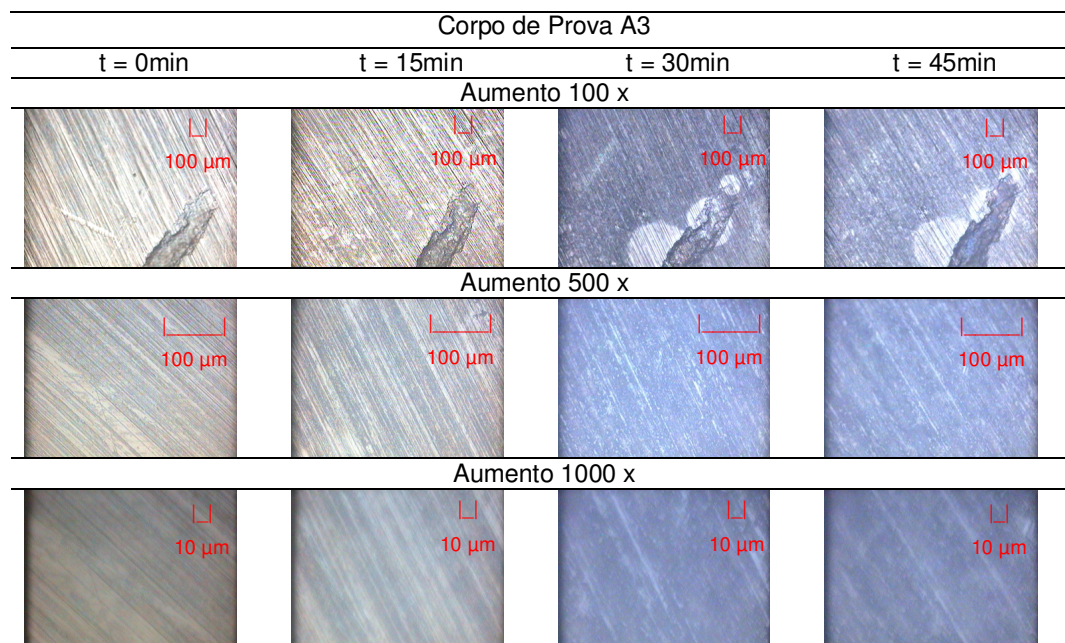


Figura 53 - Macroscopia do polimento e degradação por “pits” do corpo de prova A3

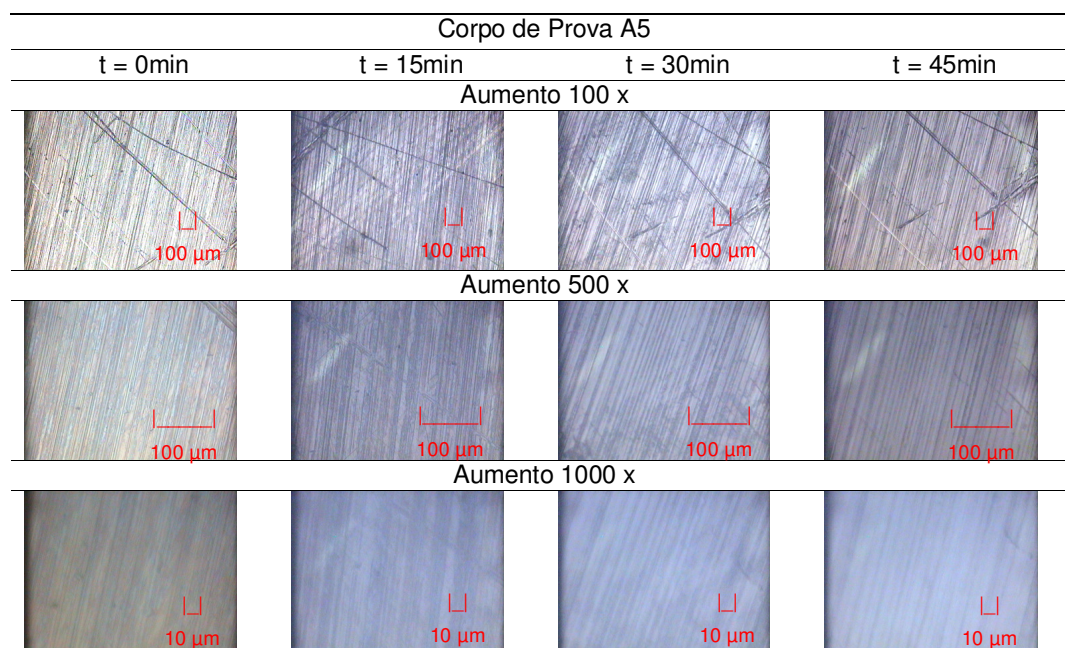


Figura 54 - Macroscopia do polimento e degradação por *pits* do corpo de prova A5

A agressividade da frequência de 40 kHz em comparação com as imagens dos corpos de prova ensaiados em 28 kHz é nitidamente superior, o que pode ser observado pela diminuição de riscos e degradação das superfícies nos mais diversos tempos.



#### 4.5 Avaliação da influência do tipo de abrasivo no processo

Para proceder uma comparação entre os abrasivos, foram utilizadas alumina e pasta de diamante com granulometria de 1,0  $\mu\text{m}$  e 1,0 a 2,0  $\mu\text{m}$  respectivamente.

Os resultados dos ensaios demonstraram inicialmente conforme gráfico da Figura 42 que a pasta de diamante na frequência de 40 kHz não apresentou resultados de polimento, pois a agressividade do processo com estas características demonstrou-se ineficiente como processo de polimento. Assim, neste tópico estão apresentados os resultados da variação de desempenho dos abrasivos apenas na frequência de 28 kHz conforme o gráfico da Figura 55.

Uma avaliação das tangentes das curvas de tendência demonstra que a pasta de diamante apresenta-se como mais eficiente, pois atingiria resultados mais rapidamente, porém, conforme apresentado por Ribeiro (2007) na Figura 18, a agressividade maior da pasta de diamante apesar de apresentar melhor velocidade de polimento, apresenta retomada de Ra em faixas superiores, assim no quesito rugosidade o desempenho da alumina apresenta-se mais adequado.

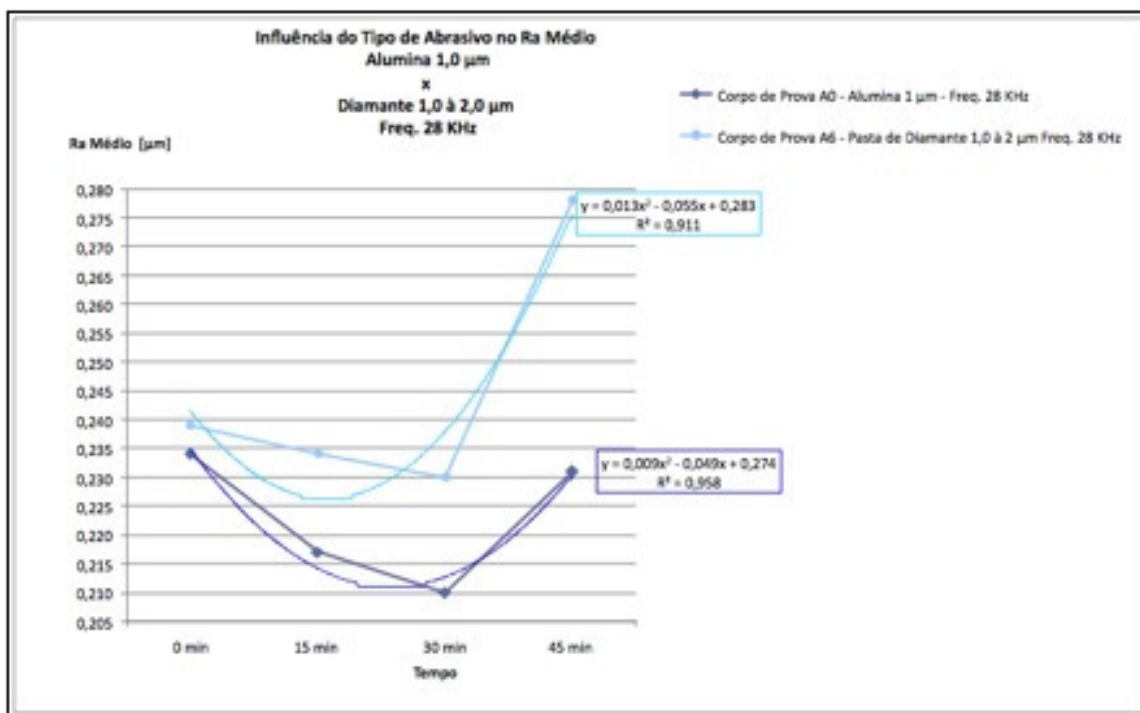


Figura 55 - Influência do tipo de abrasivo em função do tempo – ultrassom com frequência de 28 KHz



Uma avaliação das imagens apresentadas na Figura 48 demonstra claramente a superioridade de desgaste superficial da pasta de diamante e com tempos inferiores à alumina, se comparada com a Figura 56.

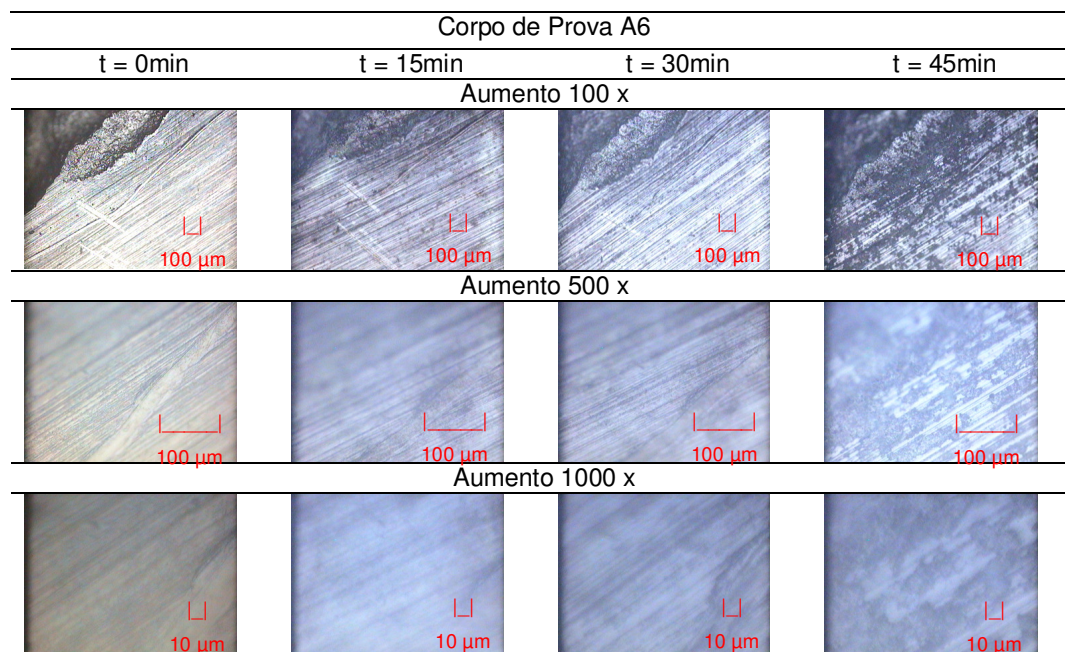


Figura 56 - Macroscopia do polimento e degradação por *pits* do corpo de prova A6

Nesta situação, pode-se afirmar que a pasta de diamante apresenta tempos de polimento inferiores aos da alumina, porém necessita de controle mais apurado dos equipamentos devido à sua agressividade.

#### 4.6 Avaliação da influência da frequência do ultrassom no processo

Os ensaios tabulados por tipo de frequência, 28 e 40 kHz respectivamente, demonstram que quando as frequências são mais baixas, a eficiência do processo, Ra em função do tempo, possui melhor rendimento para as aluminas de 1,0 e 0,3  $\mu\text{m}$ . No caso da alumina de 0,05  $\mu\text{m}$  a frequência de 40 kHz apresentou melhor rendimento.

Assim, conforme retratado nos gráficos das Figuras 57 a 60, para todos os abrasivos nas frequências de 28 e 40 kHz, pode-se concluir que frequências mais

baixas tornam o processo mais adequado, pois o mesmo atenderia inclusive a pasta de diamante conforme apresentado à seguir.

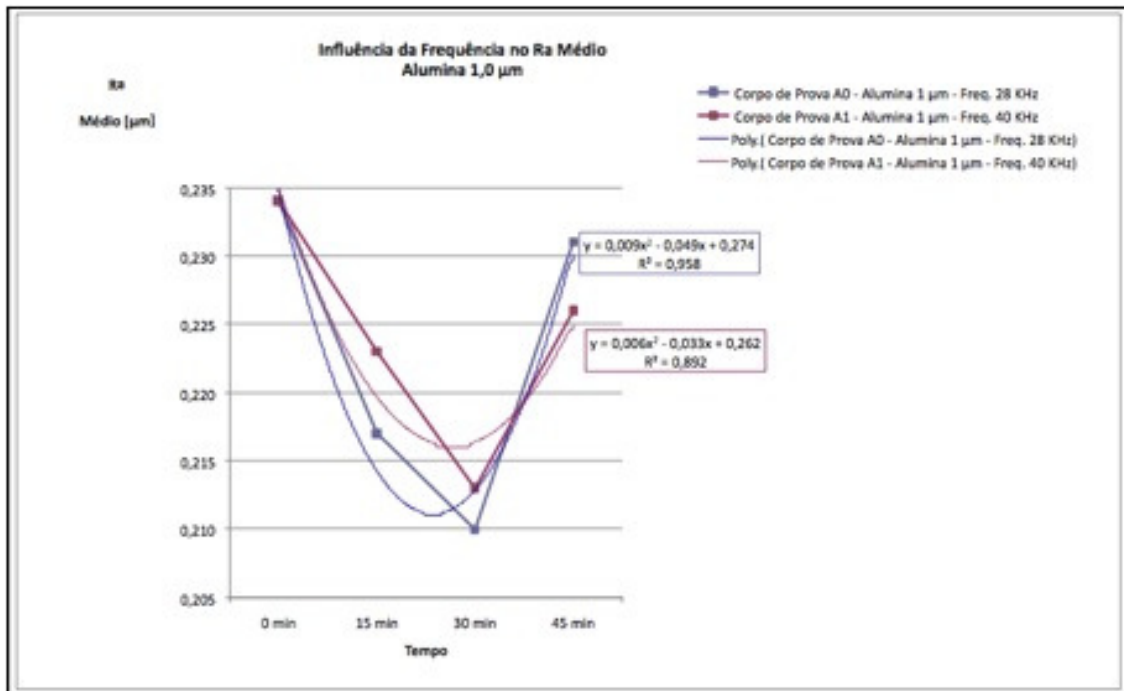


Figura 57 - Influência da frequência do ultrassom em função do tempo para alumina de 1,0 µm

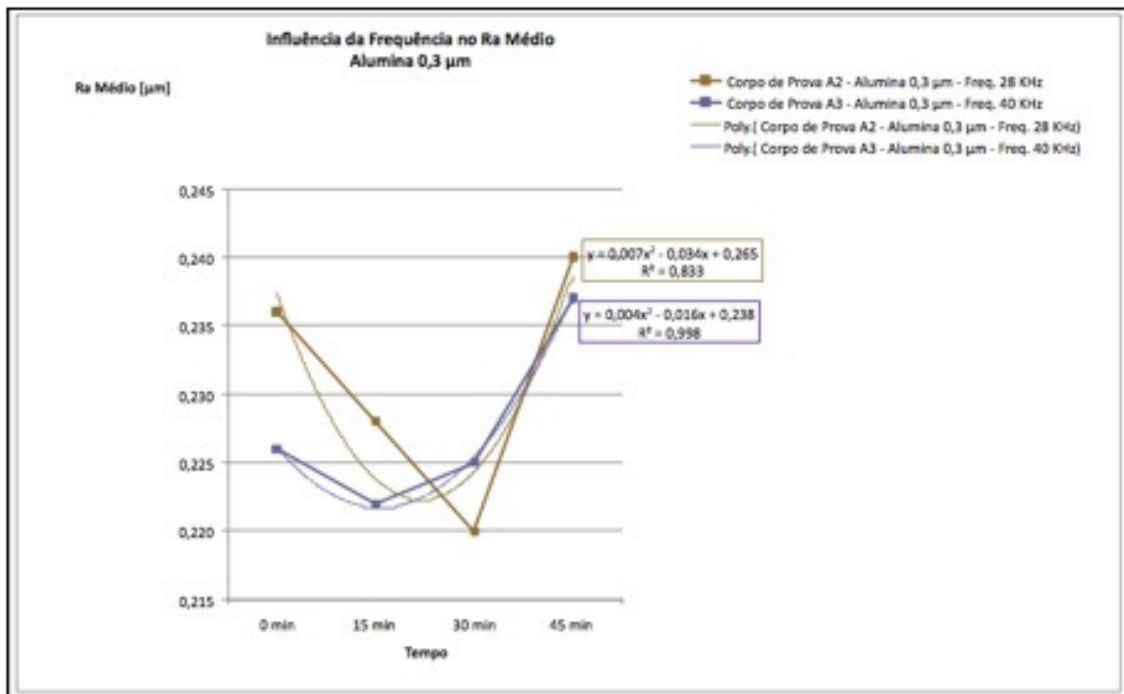


Figura 58 - Influência da frequência do ultrassom em função do tempo para alumina de 0,3 µm

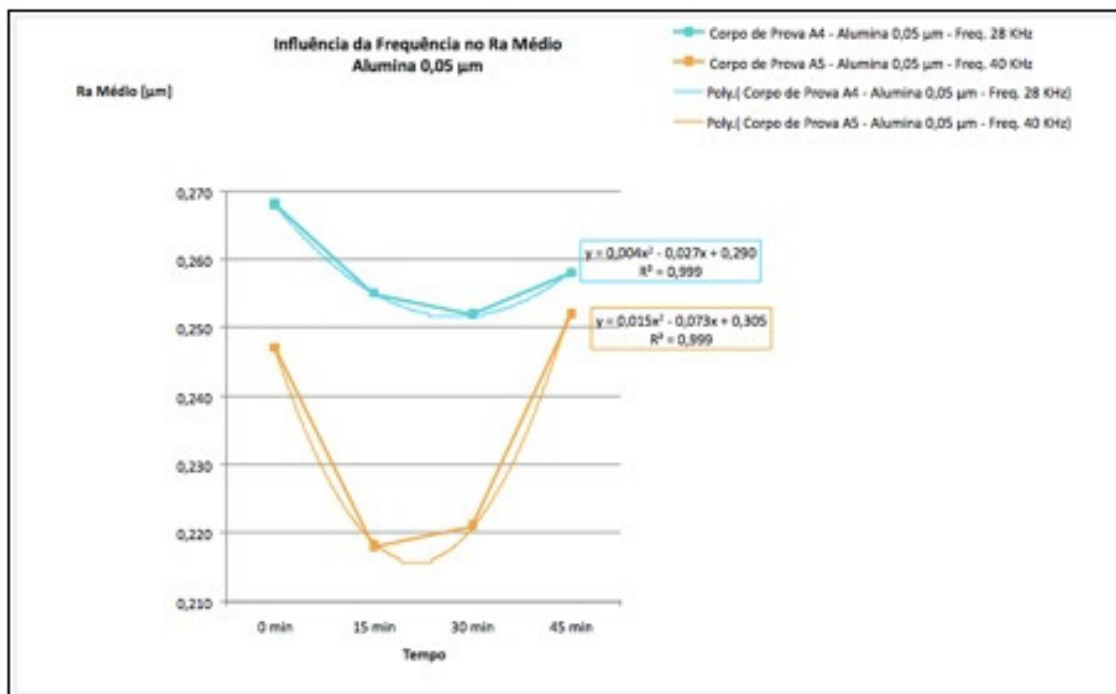


Figura 59 - Influência da frequência do ultrassom em função do tempo para alumina de 0,05 µm

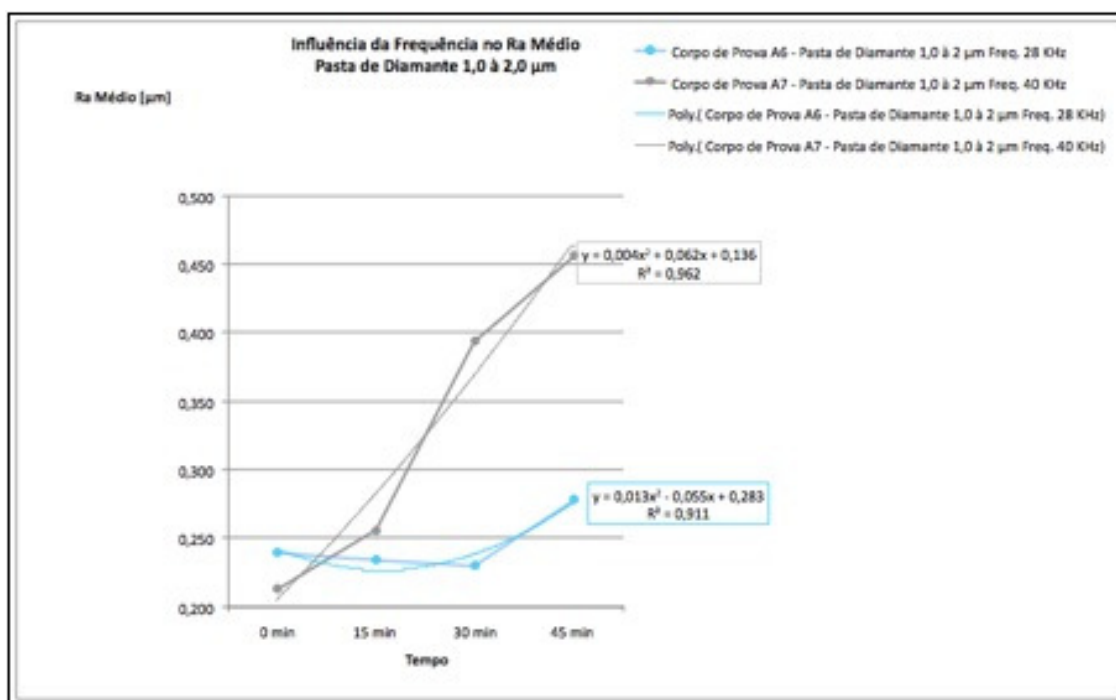


Figura 60 - Influência da frequência do ultrassom em função do tempo para pasta de diamante de 1,0 à 2,0 µm

#### 4.7 Avaliação de eficácia do processo em campos de difícil acesso

A geometria dos corpos de prova, já citada, contou com diâmetro externo uma polegada, com canto vivo, que simulou a eficiência deste processo em perfis com cotas pequenas. Após os ensaios, pode-se observar que nas arestas dos corpos de prova houve corrosão similar ao *pits* de processo de corrosão, demonstrando que este método necessita de maiores estudos referentes aos seus parâmetros ou mesmo métodos de proteção destas geometrias.

#### 4.8 Avaliação da temperatura dos abrasivos

Durante os ensaios, observou-se que alguns dos abrasivos tiveram alterações em suas características. A pasta de diamante diluída manteve sua estabilidade, mas as aluminas tiveram comportamento similar alterando a sua textura após aproximadamente 3 minutos. Uma noção desta alteração está retratada na Figura 61.



Figura 61 - Alteração da textura da alumina em forma de “pasta”

Para caracterizar esta variável não inicialmente prevista, foi realizado um levantamento da variação de temperatura dos abrasivos. Os dados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Controle de temperatura dos fluídos abrasivos

t [min]	Temperatura do Fluido de Polimento [°C]							
	Alumina 1 µm		Alumina 0,2 µm		Alumina 0,05 µm		Pasta de Diamante 1 µm	
	28 kHz	40 kHz	28 kHz	40 kHz	28 kHz	40 kHz	28 kHz	40 kHz
0	22,8	23,6	24,7	25,3	23,0	25,6	23,3	23,3
5	27,3	31,6	27,1	33,5	28,0	31,7	28,4	24,2
10	32,0	37,7	32,5	39,6	32,7	36,1	31,6	30,9
15	51,4	43,7	38,4	45,6	36,0	40,2	35,0	34,2

O gráfico apresentado na Figura 62 representa o comportamento do aumento de temperatura em função do tempo, com medição realizada através de termografia, com a utilização de termógrafo da Irisys e tratamento das imagens térmicas com software QuickReport IR.

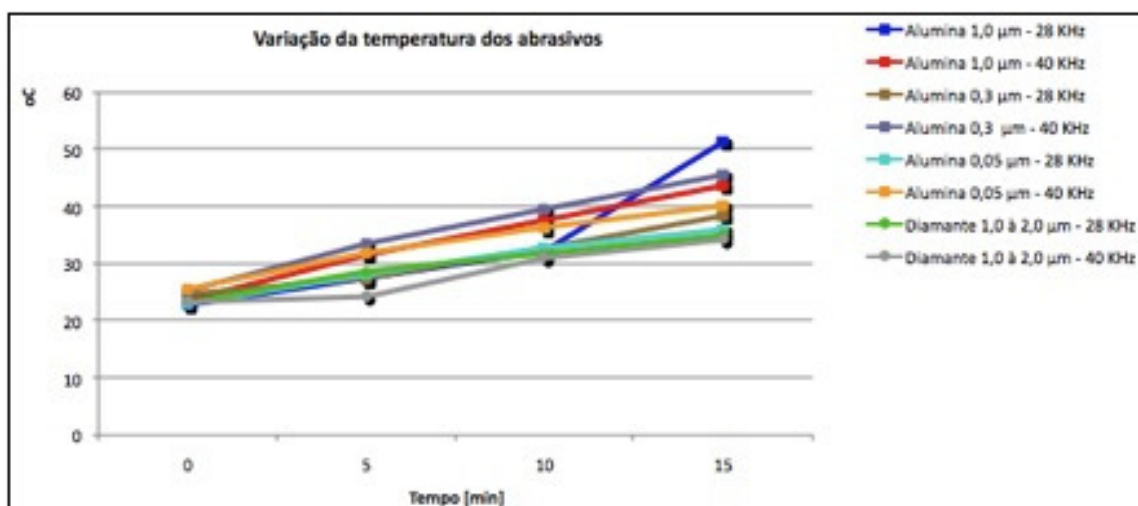


Figura 62 - Curva do comportamento da temperatura dos abrasivos em função do tempo

Após o término dos 15 minutos de exposição da alumina ao ultrassom e com a diminuição da temperatura, a mesma retornou à condição inicial sem perda de volume. O ponto de mudança de características registrou temperatura média em

torno de 32,4°C, acima desta apresentou as características visualizadas na Figura 61.

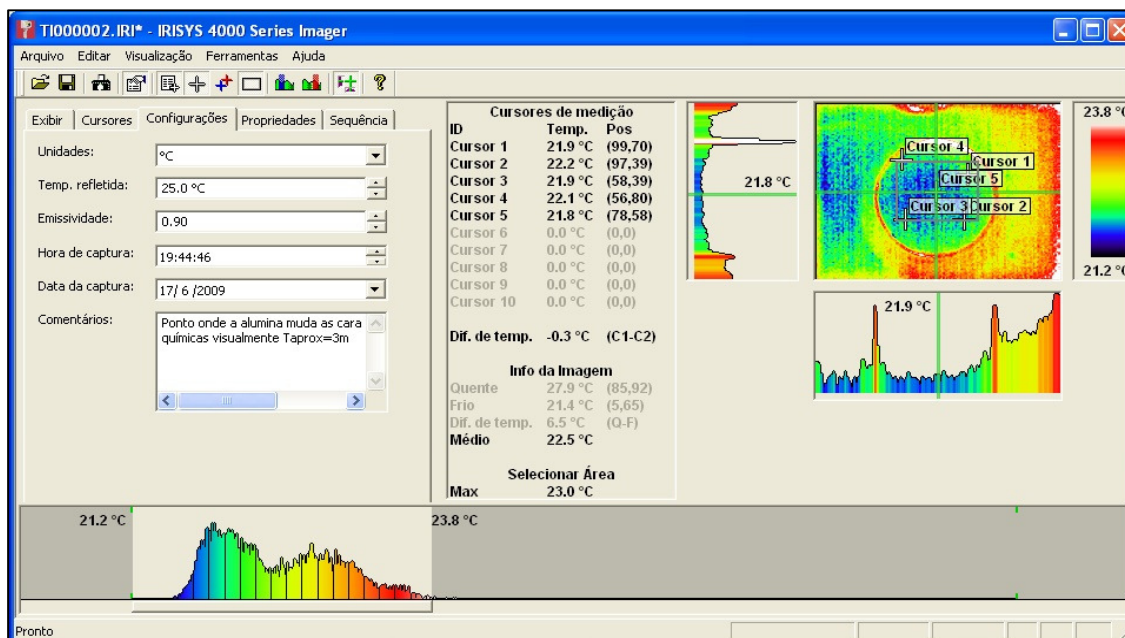


Figura 63 - Termografia de controle de temperatura dos abrasivos

Como citado no item 4.2.2, pode-se evidenciar que o fluido não alcançou temperaturas que justificassem alterações estruturais na superfície do metal. Esta afirmação pode ser fundamentada com base na Figura 63.

Pode-se observar o gradiente de temperatura do banho abrasivo, sua temperatura máxima e média com base na área retangular delimitada no citado software.

A temperatura média do abrasivo encontra-se calculada com base na área retangular da figura apresentada.

#### 4.9 Avaliação da variação da dureza superficial

Conforme dados apresentados na Tabela 6 para o corpo de prova A8, sem nenhum tipo de polimento, apenas os processos de padrão de preparação dos

corpos de prova, os valores de dureza superficial foram controlados após o período de quarenta e cinco minutos de polimento para retratar que não houve alteração significativa de dureza o que poderia impactar em efeitos indesejados.

Assim, os resultados do controle de dureza após os ensaios estão apresentados na Tabela 8.

Foram ensaiados todos os corpos de prova utilizados e para garantia dos resultados, realizaram-se três medições em cada superfície, conforme estabelecido na norma NBR NM ISO 6508-1:2008.

Tabela 8 - Controle de Dureza dos Corpos de Prova

nº de medições	Medição de Dureza Superficial								
	HRc								
	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
1	31,9	30,9	29,2	31,5	30,2	29,9	32,5	30,5	32,0
2	30,0	30,9	29,9	30,8	31,2	30,8	32,0	31,8	32,2
3	30,8	29,9	30,8	30,9	30,2	30,0	30,6	31,8	30,3
<b>Média</b>	<b>30,9</b>	<b>30,6</b>	<b>30,0</b>	<b>31,1</b>	<b>30,5</b>	<b>30,2</b>	<b>31,7</b>	<b>31,4</b>	<b>31,5</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>0,7</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>

Os dados demonstram que o material não sofreu alterações de dureza após os processos de polimento em nenhuma das alternativas ensaiadas.

#### 4.10 Estudo da superfície final com microscopia eletrônica de varredura

Para garantia dos resultados de medição de rugosidade, foi realizada também uma microscopia através de microscópio eletrônico de varredura antes dos ensaios, conforme Figura 42, pois os resultados de acompanhamento referentes às macrografias óticas apresentadas, poderiam apresentar distorções nas imagens devido às distorções óticas e luminosas. Assim, para a garantia que os resultados de medição não tenham sido influenciados por geração de deposição de camada de abrasivos na superfície, foram realizadas novas microscopias.



A imagem da uma superfície após o ensaio pode ser comparada à anterior e está apresentada na Figura 64.

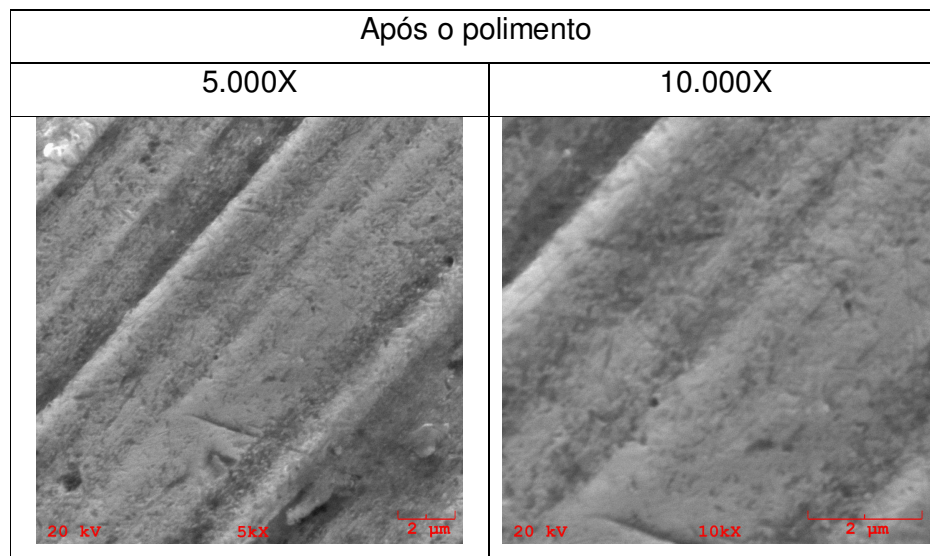


Figura 64 - MEV de corpo de prova após o polimento

As imagens não demonstram inclusões de material abrasivo e atestam qualitativamente o resultado do polimento obtido.

#### 4.11 Estudo da superfície final com micrografia transversal

Visando uma caracterização mais completa e garantia dos resultados de medição de rugosidade, foi realizada também uma micrografia da superfície com e sem ataque químico para isentar a possibilidade de alterações estruturais ou deposições de camada.

Este estudo foi realizado apenas para os corpos de prova A0 e A7, casos de melhor desempenho de polimento e pior degradação superficial, respectivamente para caracterização de possíveis interferências nos resultados.

As Figura 65 e 66 apresentam as micrografias dos corpos de prova A0 e A7, com corte transversal. A face de polimento está identificada como “superfície”, estando a sua continuidade em direção ao centro do corpo de prova representado



continuamente. Estão apresentados os resultados com e sem ataque químico, demonstrando a inexistência de interferências.

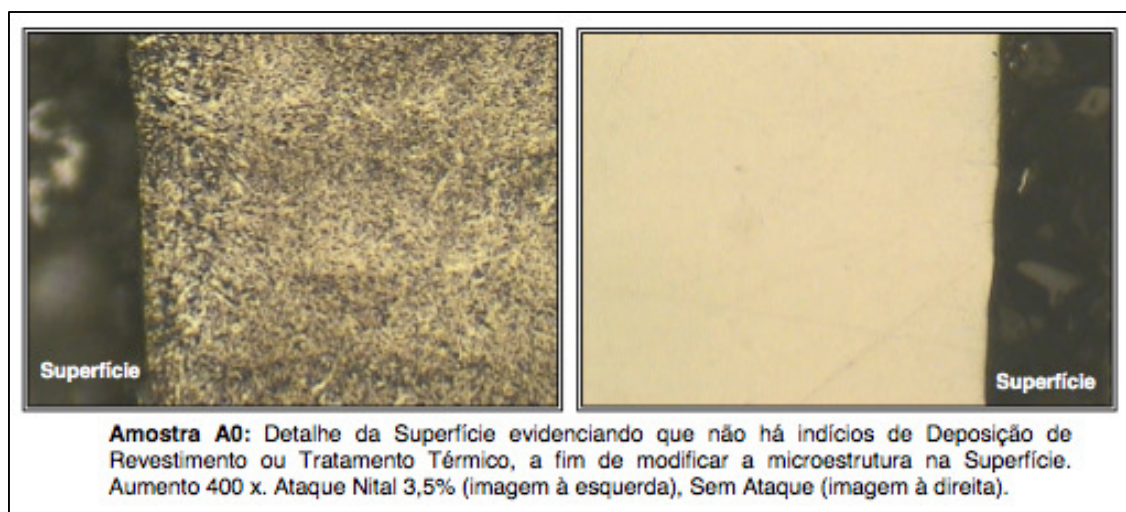


Figura 65 - Microscopia do corpo de prova A0 após os ensaios



Figura 66 - Microscopia do corpo de prova A7 após os ensaios

Desta forma, os dados apresentados de medição de rugosidade pelos sistemas metrológicos e óticos utilizados não apresentaram interferências.

## 5 CONCLUSÕES

A análise dos dados gerados na fase de ensaios e confrontação com os dados científicos existentes nos permitiu demonstrar todas as curvas de polimento, assim pode-se concluir diversos pontos apresentados abaixo.

Na comparação entre o abrasivo, pasta de diamante e alumina, o primeiro demonstrou melhores resultados na velocidade de diminuição do Ra, mas apesar de ser mais eficiente (maior velocidade de redução de rugosidade), apresentou curvas de retomada mais agressivas e a alumina atingiu Ra menores. Para confecção de equipamentos industriais, a alumina apresenta curvas de velocidade de polimento mais brandas, podendo ser um requisito desejável.

A pasta de diamante com diluente comercial apresentou maior estabilidade nas suas características visuais, o que foi ponto fraco da alumina.

As granulometrias dos abrasivos (entenda-se alumina), demonstraram que os abrasivos com maior granulometria (1,0  $\mu\text{m}$ ) apresentaram melhor desempenho no tempo de polimento e menores rugosidades absolutas obtidas na faixa de 28 kHz, na faixa de frequência de 40 kHz este estudo necessita de aprofundamento, pois apresentou resultado com divergências de comportamento.

No estudo das frequências, a frequência de 28 kHz apresentou melhor desempenho com todos os abrasivos com exceção da alumina de 0,05  $\mu\text{m}$  que se adaptou melhor em frequência mais alta atingindo menor Ra e maior velocidade de polimento.

Com a análise dos resultados de dureza e as curvas diversas curvas apresentadas de polimento e as microscopias eletrônicas, pode-se concluir que este processo possui vantagens em relação aos demais. Além do equipamento possuir baixo custo tecnológico, o mesmo não gera micro-camadas na peça e nem efeitos de endurecimento.

Cabe ressaltar que, avaliando-se as tabelas do Anexo C, existem pontualmente reduções de Ra mais significativas que as das médias, o que demonstra o potencial deste tipo de processo caso sejam realizados estudos e parametrizações mais abrangentes.

O processo para polimento de geometrias com curvas suaves e cantos vivos apresentou desgastes pontuais similares aos do tipo *pits* sendo este um efeito indesejado, o que poderia ser controlado através de adesivos ou tintas protetoras.

Pode-se concluir que em pequenos tempos, inferiores a 30 minutos, este processo pode ser utilizado como processo de limpeza em superfícies planas como chapas oxidadas em substituição ao tradicional jateamento.

Em todos os ensaios não houve perda significativa do volume dos abrasivos, fato que ficou comprovado em todo o decorrer do processo, utilizando-se o mesmo abrasivo, o que demonstra que este processo tem grandes avanços ambientais devido à redução de desperdício dos abrasivos.

Os resíduos destes abrasivos nos métodos manuais não são tratados e em virtude das ligas de aço possuem metais pesados, tais com o cromo, níquel e molibdênio, estão sendo destinados na rede pluvial sem qualquer tratamento. Com o uso contínuo do abrasivo e redução do volume, o mesmo pode apresentar destinação e tratamentos corretos.

Desta forma, com base em todas as considerações observadas nos resultados, pode-se concluir que o método de polimento por ultrassom apresenta bons rendimentos e estabilidade superficial, demonstrado pelo baixo desvio padrão dos resultados. Assim este processo pode ser considerado uma solução para processos de polimento automatizados.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Conforme dados do estudo, sugere-se estudo em faixas de ultrassom inferiores a 28 kHz e granulometrias acima de 1,0  $\mu\text{m}$  ou mesmo processos de desbaste com pasta de diamante, haja visto a agressividade que foi comprovada.

Como a alumina apresentou mudanças de textura, sugere-se o aprofundamento nas caracterizações da mesma e controle de temperatura do fluido abrasivo em equipamentos construídos.

Uma continuidade com métodos estatísticos mais apurados como Taguchi e ANOVA seriam convenientes para a otimização destes diversos parâmetros e a confecção de um equipamento.

## 7 REFERÊNCIAS

APC - *American Piezoelectric International*. **Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications**. Mackeyville: Piezokeramika, 2002. 112 p.

AWARD, Sami B.. **Ultrasonic Cavitations and Precision Cleaning**. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>. Acesso em: 20 abr. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Maio. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Dez. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 6508-1**: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Dez. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12179**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Calibração de instrumentos de medição por contato (com sapata de apalpação). Ago. 2002.

BARBOSA, C.A., 2001, **Desempenho de Aços Para Confecção de Moldes Para Plásticos**. Workshop sobre tecnologia de fabricação de moldes. São Paulo. 11 abr. 2001.

BARLETTA, Massimiliano *et al.* **Progress in fluidized bed assisted abrasive jet machining (FB-AJM): Internal polishing of aluminium tubes**. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>. Acesso em: 27 jul. 2007.

BEER, Ferdinand Pierre; JONHSTON JUNIOR, Russel. **Resistência dos Materiais**. Nova York: Mc Graw-Hill, 2007. 744 p.

BOUJELBENE, M. Moisan, A.; TOUNSI, N.; BRENIER, B. *Productivity enhacement in dies and molds manufactutring by the use of C1 continous tool path*. **International Journal of Tool Manufacture**. Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 101-107, jan, 2004.

BRINKSMEIER, Ekkard; RIEMER, Oltmann; GESSENHARTER, Alexander. ***Finishing of structured surfaces by abrasive polishing.*** Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>. Acesso em: 27 jun. 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica.** 3. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 1986. 388 p.

CRICHINO, Joel Martins; TEIXEIRA, Cleiton Rodrigues. Aplicação de mínima quantidade de fluído com monitoramento de processo. **Mm: Máquinas e Metais.** São Paulo, v. 483, p. 120-132, abr. 2006.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 2. ed. São Paulo: Artliber, 2000.

DIFERRO aços especiais LTDA (Comp.). **Aços Ferramenta para Moldes Plásticos.** Disponível em: <<http://www.diferro.com.br>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

EVANS, C.J. *et al.* ***Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing.*** Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 maio 2007.

FALLBOHMER, P. ALTAN, T. TONSHOFF, H.K. *Survey of The Die and Mold Manufacturing Industry – Practices in Germany, Japan and the United States.* ***Journal of Materials Processing Technology***, n. 59, p. 158-168, 1996.

FALLBOHMER, P., RODRIGUÉZ, C. A., OZEL, T., ALTAN, T. *High-speed Machining of Cast Iron And Alloy for Die and Mold Manufacturing.* ***Journal of Materials Processing Technology***, v. 98, p. 104-115, 2000.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo: Edgard Blucher, 2003. 751 p.

FIESC - FEDERAÇÃO DAS INDUSTRIAS DE SANTA CATARINA. **Santa Catarina em Dados 2008.** Disponível em: <<http://www2.fiescnet.com.br/web/pt/site/pei/produtos/show/id/46>>. Acesso em: 10 maio 2009.

FINZER, T. ***High Speed Machining of sculptured surfaces in die and mould manufacturing.*** *In: Sculptured Surface Conference, Machining Impossible Shape.* Alburn Hills Proceedings. p. 9-11, 1998.

FLUKE DO BRASIL LTDA. **Termografia para aplicações industriais**. São Paulo: Videolar, 2006. CD-ROM.

HAMADACHE, H.; LAOUAR, L.; ZEGHIB, N. **Characteristics of Rb40 steel superficial layer under**. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>. Acesso em: 27 maio 2008.

HARISH, Waghray; THE-SHING, Lee; TATARCHUCK, Bruce J. **A study of the tribological and electrical properties of sputtered and burnished transition metal dichalcogenide films**. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>. Acesso em: 27 maio 2008.

HASSAN, Adel Mahmood; MOMANI, Amer M.s. **Further improvements in some properties of shot peened**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 maio 2007.

LIMA, Milton Sérgio de; RIVA, Rudimar; NEVES, Davi. Os raios laser também podem modificar a superfície de ferramentas. **MM: Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 499, p. 134-143, ago. 2007.

LINDNER, Nelcio. **Educação Ambiental**. Florianópolis: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 2002. 88 p.

LUCA, Liviu; NEAGU-VENTZEL, Sorin; MARINESCU, Ioan. **Effects of working parameters on surface finish in**. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>. Acesso em: 27 abr. 2008.

MORETTI, Silvana. **Gestão Ambiental**. Florianópolis: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 2002. 54 p.

PADILHA, Angelo Fernando; GUEDES, Luiz Carlos. **Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades**. São Paulo: Hemus, 1994. 170 p.

PROVENZA, Francesco. **Moldes Para plásticos**. São Paulo: F. Provenza, 1976.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Relatório Anual de Informações Setoriais**. Disponível em: <<http://www.rais.gov.br>>. Acesso em: 10 maio 2009.

RUBIO, Juan Carlos Campos; SANTOS, Ricardo Luiz Dos; VELTEN FILHO, Adolfo Guilherme. Avaliação de imagens digitais de superfícies usinadas. **MM: Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 483, p. 226-239, abr. 2006.

SANDVIK do Brasil. **Die & Mould Making- Application Guide**. Disponível em: <<http://www.coromant.sandvic.com/br>>. Acesso em 20 set. 2006.

SCHULZ, H. **High Speed Machines**. In: Seminário Internacional de Alta Tecnologia. Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte. Santa Bárbara d'Oeste, 1996.

SHIOU, Fang-Jung; CHEN, Chien-Hua. **Freeform surface finish of plastic injection mold by**. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>. Acesso em: 27 set. 2008

SORS, Lázsló; BARDÓCZ, Lázsló; RADNÓTI, István. **Plásticos: Moldes e Matrizes**. São Paulo: Hemus, 2002. 490 p.

SOUZA, Adriano Fagali. **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando tecnologia de usinagem com altas velocidades**. 2004. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

TIAN, Yinggang; SHIN, Yung C. **Laser-assisted burnishing of metals**. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>. Acesso em: 27 set. 2007.

WHITE, Horst. **Máquinas Ferramenta: Elementos básicos de Máquinas e Técnicas de Construção**. 7. ed. São Paulo: Hemus, 1998. 395 p.

YAN, Biing-Hwa et al. **Finishing effects of spiral polishing method on micro lapping surface**. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>. Acesso em: 27 jul. 2007.

ZANOTELLI, Cladir Teresinha *et al.* **Fazendo Pesquisa: do projeto à comunicação científica**. Joinville: Univille, 2004. 110 p.

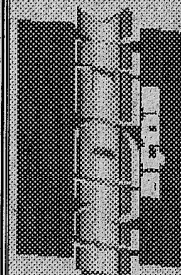
ZUNKE, Richard. Fraunhofer estuda automação em polimento de moldes. **MM: Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 499, p.10-10, ago. 2007.



**ANEXOS**

## CERTIFICADO DE QUALIDADE

Indek Comércio de Ferro e Aço Ltda.  
Rua: Graciosa, 1500 - Guanabara - Joinville - SC  
Fone/Fax: (47) 436-3600 - Home-Page: www.indek.com.br



ANOS

20

SOM

CERTIFICAMOS QUE O PRODUTO ESTÁ DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA NORMA TÉCNICA CITADA.

Cliente: _____		N.F. - Indek _____		Data Emissão: <b>03/10/2007</b>		NF. Fornec. <b>101225-</b>										
Produto	Bitola	Norma	C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cr %	Ni %	Co %	Cu %	Ti %	Al %	Mo %	Nb %	Outros
BARRA REDONDA P-20	25,40mm	Vilares	0,370	1,590	1,590	0,005	0,014	1,850	0,730	0,020	0,090	0,005	0,012	0,170	0,010	V=0,01 W=0,01

Obs: Os dados contidos neste certificado foram extraídos do certificado da Siderúrgica \_\_\_\_\_

**Fernanda Conte/Juliana Gomes**  
 DEPTO. QUALIDADE

## ANEXO B – Certificado Iso 9001:2000 do fornecedor de serviços de usinagem



## ANEXO C – Tabelas de medições de rugosidade

<b>Corpo de Prova A0 - Alumina 1 µm - Freq. 28 KHz</b>				
<b>nº de medições</b>	<b>Ra= f(t) [µm]</b>			
	<b>0 min</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
1	0,25	0,21	0,24	0,23
2	0,23	0,21	0,23	0,24
3	0,23	0,21	0,18	0,22
4	0,24	0,23	0,21	0,23
5	0,24	0,22	0,22	0,1
6	0,23	0,23	0,23	0,28
7	0,24	0,21	0,2	0,26
8	0,22	0,21	0,19	0,24
9	0,23	0,21	0,21	0,24
10	0,23	0,23	0,19	0,27
<b>Média</b>	<b>0,23</b>	<b>0,22</b>	<b>0,21</b>	<b>0,23</b>
<b>% de redução da rugosidade média em relação T=0 min</b>		<b>-7,26%</b>	<b>-10,26%</b>	<b>10,00%</b>

<b>Corpo de Prova A1 - Alumina 1 µm - Freq. 40 KHz</b>				
<b>nº de medições</b>	<b>Ra [µm]</b>			
	<b>0 min</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
1	0,23	0,21	0,18	0,22
2	0,23	0,23	0,24	0,22
3	0,25	0,23	0,21	0,21
4	0,23	0,20	0,2	0,23
5	0,23	0,20	0,2	0,2
6	0,23	0,23	0,23	0,2
7	0,23	0,24	0,24	0,28
8	0,23	0,24	0,21	0,23
9	0,26	0,23	0,21	0,25
10	0,22	0,22	0,21	0,22
<b>Média</b>	<b>0,23</b>	<b>0,22</b>	<b>0,21</b>	<b>0,23</b>
<b>% de redução da rugosidade média em relação T=0 min</b>		<b>-4,70%</b>	<b>-8,97%</b>	<b>-3,42%</b>

<b>Corpo de Prova A2 - Alumina 0,3 <math>\mu\text{m}</math> - Freq. 28 KHz</b>				
<b>n° de medições</b>	<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>			
	<b>0 min</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
1	0,22	0,24	0,23	0,24
2	0,23	0,22	0,18	0,23
3	0,24	0,21	0,24	0,19
4	0,21	0,22	0,18	0,22
5	0,23	0,21	0,25	0,27
6	0,2	0,27	0,24	0,23
7	0,27	0,21	0,19	0,27
8	0,22	0,23	0,24	0,21
9	0,28	0,24	0,23	0,27
10	0,26	0,23	0,22	0,27
<b>Média</b>	<b>0,24</b>	<b>0,23</b>	<b>0,22</b>	<b>0,24</b>
<b>% de redução da rugosidade média em relação T=0 min</b>		<b>-3,39%</b>	<b>-6,78%</b>	<b>1,69%</b>

<b>Corpo de Prova A3 - Alumina 0,3 <math>\mu\text{m}</math> - Freq. 40 KHz</b>				
<b>n° de medições</b>	<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>			
	<b>0 min</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
1	0,23	0,22	0,19	0,28
2	0,22	0,23	0,25	0,15
3	0,24	0,20	0,22	0,25
4	0,2	0,21	0,25	0,22
5	0,2	0,24	0,25	0,21
6	0,23	0,23	0,18	0,34
7	0,27	0,22	0,23	0,32
8	0,2	0,23	0,27	0,19
9	0,23	0,21	0,17	0,2
10	0,24	0,23	0,24	0,21
<b>Média</b>	<b>0,23</b>	<b>0,22</b>	<b>0,23</b>	<b>0,24</b>
<b>% de redução da rugosidade média em relação T=0 min</b>		<b>-1,77%</b>	<b>-0,44%</b>	<b>4,87%</b>

<b>Corpo de Prova A4 - Alumina 0,05 <math>\mu\text{m}</math> - Freq. 28 KHz</b>				
<b>n° de medições</b>	<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>			
	<b>0 min</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
1	0,27	0,22	0,3	0,24
2	0,24	0,26	0,27	0,31
3	0,28	0,21	0,31	0,27
4	0,23	0,28	0,29	0,26
5	0,26	0,27	0,25	0,33
6	0,31	0,22	0,27	0,19
7	0,21	0,24	0,2	0,28
8	0,38	0,22	0,22	0,26
9	0,26	0,34	0,21	0,23
10	0,24	0,29	0,2	0,21
<b>Média</b>	<b>0,27</b>	<b>0,26</b>	<b>0,25</b>	<b>0,26</b>
<b>% de redução da rugosidade média em relação T=0 min</b>		<b>-4,85%</b>	<b>-5,97%</b>	<b>-3,73%</b>

<b>Corpo de Prova A5 - Alumina 0,05 <math>\mu\text{m}</math> - Freq. 40 KHz</b>				
<b>n° de medições</b>	<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>			
	<b>0 min</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
1	0,23	0,23	0,24	0,27
2	0,24	0,27	0,24	0,26
3	0,29	0,31	0,22	0,26
4	0,29	0,24	0,15	0,24
5	0,23	0,13	0,23	0,24
6	0,24	0,25	0,24	0,28
7	0,23	0,29	0,28	0,25
8	0,2	0,26	0,18	0,23
9	0,26	0,30	0,17	0,22
10	0,26	0,21	0,26	0,27
<b>Média</b>	<b>0,25</b>	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>	<b>0,25</b>
<b>% de redução da rugosidade média em relação T=0 min</b>		<b>-11,74%</b>	<b>-10,53%</b>	<b>2,02%</b>

<b>Corpo de Prova A6 - Pasta de Diamante 1,0 à 2 µm Freq. 28 KHz</b>				
<b>n° de medições</b>	<b>Ra [µm]</b>			
	<b>0 min</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
1	0,21	0,23	0,25	0,28
2	0,21	0,23	0,21	0,28
3	0,22	0,23	0,23	0,29
4	0,26	0,23	0,21	0,31
5	0,2	0,25	0,23	0,32
6	0,2	0,23	0,24	0,27
7	0,38	0,24	0,23	0,26
8	0,29	0,23	0,24	0,27
9	0,22	0,23	0,23	0,28
10	0,2	0,24	0,23	0,22
<b>Média</b>	<b>0,24</b>	<b>0,23</b>	<b>0,23</b>	<b>0,28</b>
<b>% de redução da rugosidade média em relação T=0 min</b>		<b>-2,09%</b>	<b>-3,77%</b>	<b>16,32%</b>

<b>Corpo de Prova A7 - Pasta de Diamante 1,0 à 2 µm Freq. 40 KHz</b>				
<b>n° de medições</b>	<b>Ra [µm]</b>			
	<b>0 min</b>	<b>15 min</b>	<b>30 min</b>	<b>45 min</b>
1	0,22	0,25	0,41	0,52
2	0,22	0,30	0,42	0,44
3	0,21	0,21	0,34	0,57
4	0,23	0,20	0,4	0,44
5	0,22	0,31	0,38	0,6
6	0,22	0,27	0,4	0,62
7	0,22	0,34	0,37	0,45
8	0,22	0,27	0,35	0,56
9	0,15	0,21	0,45	0,57
10	0,22	0,20	0,42	0,35
<b>Média</b>	<b>0,21</b>	<b>0,26</b>	<b>0,39</b>	<b>0,46</b>
<b>% de redução da rugosidade média em relação T=0 min</b>		<b>20,19%</b>	<b>84,98%</b>	<b>114,08%</b>