

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ARTHUR GABRIEL SCABURI**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM QUÍMICA COM NaOH EM
TUBO QUADRADO DE ALUMÍNIO**

**JARAGUÁ DO SUL
JULHO 2017**

ARTHUR GABRIEL SCABURI

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM QUÍMICA COM NaOH EM
TUBO QUADRADO DE ALUMÍNIO**

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Instituto Federal de Santa Catarina – campus Jaraguá do Sul – Rau localizado em Jaraguá do Sul como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Professor orientador: Cassiano Rodrigues Moura.

**JARAGUÁ DO SUL
JULHO 2017**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Scaburi, Arthur Gabriel

Avaliação de Parâmetros de Usinagem Química com NaOH
em Tubo Quadrado de Alumínio / Arthur Gabriel Scaburi ; orientação
de Cassiano Rodrigues Moura. Jaraguá do
Sul, SC, 2017.

81 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.

1. Usinagem química. 2. Alumínio. 3. Hidróxido de
sódio. 4. Rugosidade. I. Moura, Cassiano Rodrigues. II.
Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM QUÍMICA COM NaOH EM
TUBO QUADRADO DE ALUMÍNIO**

ARTHUR GABRIEL SCABURI

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em
Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora
abaixo indicada.



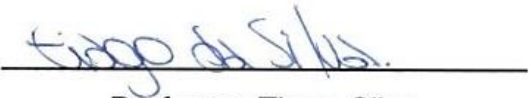
Professor Orientador Cassiano Rodrigues Moura
Mestre em Engenharia de Materiais
IFSC-Rau



Professor Gerson Ulbricht
Doutor em Métodos Numéricos em Engenharia
IFSC-Rau



Professor Joel Stryhalski
Doutor em Engenharia de Materiais
IFSC-Rau



Professor Tiago Silva
Mestre em Engenharia Mecânica
IFSC-Rau

Jaraguá do Sul, 28 de junho de 2017.

RESUMO

A usinagem química é aplicada na fabricação metalomecânica de peças e componentes de grande ou pequeno porte. O processo consiste na remoção de material de áreas específicas, através da corrosão do substrato por uma forte reação química com uma substância reagente, em condições controladas. É um dos mais importantes processos não convencionais de usinagem, com o qual é possível realizar a usinagem de geometrias complexas, com dimensões reduzidas ou ainda reduzir o peso de determinadas peças. O objetivo deste trabalho é a avaliação da variação de parâmetros da usinagem química com NaOH em tubo quadrado de alumínio. Para isso, o alumínio foi usinado com a variação dos parâmetros: concentração do reagente, temperatura da reação e tempo de reação. A caracterização dos corpos de prova foi realizada através da microscopia óptica, da avaliação dimensional perfil geométrico usinado, da avaliação da rugosidade e da análise da taxa de remoção. A avaliação das micrografias e medições dimensionais do perfil geométrico usinado constataram que a seleção de parâmetros mais satisfatória é dada na seguinte condição: concentração do reagente 1,5 molar de NaOH, temperatura da reação 60°C e tempo de reação 2h. A avaliação da rugosidade evidenciou que maiores temperaturas geram um acabamento do perfil geométrico de menor qualidade, mas não necessariamente geram um acabamento superficial inutilizável. Entretanto, maiores concentrações do reagente tendem a gerar um perfil de rugosidade de maior qualidade.

PALAVRAS CHAVES: usinagem química; alumínio; hidróxido de sódio; rugosidade.

ABSTRACT

The chemical etching has been applied on the metalworking manufacturing of parts and devices of large and small dimensions. The process consists on the removal of material at specific areas, through the corrosion of the substrate by a strong chemical reaction with a reagent substance, on controlled conditions. It is one of the most important nontraditional machining processes, with which it is possible to machine complex geometries, with reduced dimensions or even to reduce the weight of some components. The objective of this paper is the evaluation of the variation of chemical etching parameters with NaOH on square aluminum tube. Thus, aluminum was etched with variation of parameters concentration of reagent, reaction temperature and reaction time. The characterization of the specimens has been performed through optical microscopy, dimensional evaluation of the etched geometric profile, rugosity evaluation and analysis of the removal rate. The evaluation of the micrographics and dimensional measuring of the etched geometric profile found out that the most satisfactory selection of parameters is: reagent concentration 1,5 molar of NaOH, reaction temperature 60°C and time of reaction 2h. The rugosity evaluation evidenced that higher temperatures generate a finishing of the geometric profile of lower quality, but not necessarily generate an unusable surface finishing. However, higher concentrations of reagent tend to generate a rugosity profile of higher quality.

KEYWORDS: *chemical etching; aluminum; sodium hydroxide; surface roughness.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Etapas da reação.....	16
Figura 2: Comparativo entre natureza dos reagentes.....	21
Figura 3: Solução alcalina reagindo com o substrato alumínio.....	22
Figura 4: Configuração da reação em banho-maria.....	23
Figura 5: Isotropia da usinagem química.....	25
Figura 6: Relação entre tempo de reação e taxa de remoção.....	28
Figura 7: Relação entre temperatura da reação e taxa de remoção.....	28
Figura 8: Influência do tempo e temperatura no perfil de rugosidade.....	29
Figura 9: Influência da temperatura da reação no perfil de rugosidade.....	30
Figura 10: Influência do tipo de reagente no perfil de rugosidade.....	31
Figura 11: Recuperação de superfície marcada.....	32
Figura 12: Comparação entre substrato normal e super-hidrofóbico.....	33
Figura 13: Etapas do procedimento experimental.....	36
Figura 14: Preparação dos corpos de prova.....	36
Figura 15: Corpos de prova.....	37
Figura 16: Desenhos dimensionais.....	38
Figura 17: Colagem dos gabaritos.....	39
Figura 18: Tinta WEGPoxi 3082.....	39
Figura 19: Corpos de prova sem os gabaritos.....	40
Figura 20: Procedimento prático em laboratório.....	41
Figura 21: Reagente sólido sendo pesado.....	42
Figura 22: Reagente colocado em banho-ultrassom.....	43
Figura 23: Mantas ligadas para atingir o equilíbrio térmico.....	44
Figura 24: Início da usinagem química.....	45
Figura 25: Detalhe da usinagem química.....	45
Figura 26: Caracterização.....	47
Figura 27: Estereoscópio e corpo de prova posicionado.....	48
Figura 28: Metodologia de ampliação.....	49
Figura 29: <i>Dial caliper</i> (medidor de espessura).....	49
Figura 30: Metodologia para medição da profundidade de usinagem.....	50
Figura 31: Metodologia para medição da espessura não usinada;.....	51

Figura 32: Projetor de perfil.....	51
Figura 33: Metodologia para medição do perfil geométrico.....	52
Figura 34: Rugosímetro e corpo de prova posicionado.....	53
Figura 35: Metodologia para medição da rugosidade.....	53
Figura 36: Corpos de prova usinados.....	55
Figura 37: Micrografias do Grupo 01.....	56
Figura 38: Detalhes das micrografias do Grupo 01.....	57
Figura 39: Micrografias do Grupo 02.....	58
Figura 40: Detalhes das micrografias do Grupo 02.....	59
Figura 41: Micrografias do Grupo 03.....	59
Figura 42: Detalhes das micrografias do Grupo 03.....	60
Figura 43: Micrografias do Grupo 04.....	60
Figura 44: Detalhes das micrografias do Grupo 04.....	61
Figura 45: Dimensões medidas da cruz.....	62
Figura 46: Correlação da rugosidade Ra para os Grupos 02 e 03.....	65
Figura 47: Correlação da rugosidade Rt para os Grupos 02 e 03.....	66
Figura 48: Correlação da rugosidade Rz para os Grupos 02 e 03.....	66
Figura 49: Gráfico de contorno para variável resposta – rugosidade Ra.....	68
Figura 50: Correlação entre espessura removida em relação ao tempo de reação.....	71
Figura 51: Correlação entre espessura removida em relação à temperatura da reação.....	72
Figura 52: Desenho dimensional dos gabaritos.....	80
Figura 53: Desenho dimensional do corpo de prova.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de usinagem.....	42
Tabela 2: Avaliação da precisão dimensional.....	62
Tabela 3: Parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz.....	64
Tabela 4: Espessura após usinagem química.....	69
Tabela 5: Espessura removida e taxa de remoção.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Grandeza	Unidade
E	Taxa de remoção	μ/min
s	Profundidade da usinagem	mm
t	Tempo da usinagem	s
T	Temperatura	$^{\circ}C$
C	Concentração	M
l	Comprimento	m
Å	Comprimento	$10^{-10}m$
μ	Comprimento	$10^{-6}m$
n	Comprimento	$10^{-9}m$
Δ	Varição	mm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	PROBLEMÁTICA DE PESQUISA.....	14
1.3	OBJETIVOS.....	14
1.3.1	Objetivo geral.....	14
1.3.2	Objetivos específicos.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM QUÍMICA.....	16
2.1.1	O substrato alumínio.....	18
2.1.2	Os reagentes.....	20
2.1.3	As máscaras.....	24
2.1.3.1	Máscara de tinta WEGPoxi 3082.....	26
2.1.4	Taxa de remoção.....	27
2.1.5	Acabamento superficial.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	MATERIAIS.....	34
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	35
3.2.1	Preparação dos corpos de prova.....	36
3.2.1.1	Corte dos corpos de prova.....	37
3.2.1.2	Limpeza química dos corpos de prova.....	37
3.2.1.3	Preparação e colagem dos gabaritos.....	37
3.2.1.4	Aplicação da máscara.....	39
3.2.1.5	Remoção dos gabaritos.....	40
3.2.2	Procedimento prático em laboratório.....	40
3.2.2.1	Preparação da solução.....	42
3.2.2.2	Posicionamento e aquecimento da solução.....	43
3.2.2.3	Usinagem química.....	44
3.2.2.4	Reação de neutralização.....	45
3.2.2.5	Repetição dos procedimentos nos demais corpos de prova.....	46
3.2.2.6	Limpeza e identificação dos corpos de prova.....	46

3.2.2.7 Descarte de resíduos.....	47
3.3 CARACTERIZAÇÃO.....	47
3.3.4 Microscopia óptica.....	48
3.3.1 Medição da profundidade de usinagem.....	49
3.3.2 Medição do perfil geométrico.....	51
3.3.3 Rugosidade do perfil usinado.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1 CARACTERIZAÇÃO POR MICROSCOPIA ÓPTICA.....	55
4.1.1 Grupo 01.....	56
4.1.2 Grupo 02.....	57
4.1.3 Grupo 03.....	58
4.1.4 Grupo 04.....	60
4.2 AVALIAÇÃO DIMENSIONAL.....	61
4.3 AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE.....	63
4.3.1 Avaliação estatística da rugosidade.....	65
4.4 TAXA DE REMOÇÃO.....	69
5 CONCLUSÃO.....	73
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
AGRADECIMENTO.....	75
REFERÊNCIAS.....	76
APÊNDICE.....	80

1 INTRODUÇÃO

Os processos de Fabricação Mecânica vem sendo aprimorados a fim de reduzir desperdícios, em uma busca pela constante inovação. A área de processos não convencionais de usinagem é foco de constante estudo e investimento no que tange às suas aplicações, especialmente porque caracterizam-se majoritariamente como mais baratos e usuais se comparados aos processos convencionais de usinagem.

Um desses processos é a usinagem química, que corrói materiais utilizando ácidos ou bases em condições controladas. A técnica tem sido utilizada pelo ser humano desde tempos remotos, cujo objetivo era produzir efeitos artísticos em metais, onde um reagente era utilizado para corroer a superfície do metal, criando baixo relevo.

A usinagem química dos metais é empregada na fabricação ou beneficiamento de peças para a indústria mecânica, aeroespacial e eletrônica. Dentre os principais metais usinados temos o alumínio, o cobre e o aço, sendo que a usinagem do alumínio é empregada largamente.

De acordo com Huang et al (2015), esta larga utilização ocorre porque o processo possibilita a redução do peso das peças, bem como a obtenção de perfis específicos de rugosidade, como é o caso das aplicações super-hidrofóbicas, ou a remoção de material que caracteriza uma usinagem propriamente dita.

Conforme Çakir et al (2008), alguns estudos têm sido realizados para determinar qual o melhor reagente para se usinar o alumínio. Os resultados destes estudos indicam o hidróxido de sódio (NaOH) e cloreto de ferro III (FeCl₃) como os mais eficientes.

Determinados perfis de alumínio, como o tubo quadrado fino, só podem ser usinados com baixas forças de usinagem. Essas forças causam deformação plástica devido à baixa resiliência do material, uma vez que as propriedades mecânicas do alumínio associadas a uma seção fina fragilizam a estrutura.

Para solucionar este problema, utilizam-se processos não convencionais como corte a laser, corte a plasma ou eletroerosão. O problema destes é o alto custo agregado, pois há a necessidade de maquinário e equipamentos específicos para o processo.

Com isto, existe a necessidade de estudos que busquem novas alternativas

para a fabricação destas peças. Utilizando o processo da usinagem química, pode-se oferecer para a indústria metalomecânica soluções eficazes com um preço acessível.

1.1 JUSTIFICATIVA

Avaliar a utilização da usinagem química como uma alternativa é importante uma vez que seu custo é inferior, pois os reagentes e equipamentos utilizados são mais acessíveis, bem como o espaço ocupado pelo processo que pode ser proporcional ao tamanho das peças a serem usinadas.

Com este processo, não há necessidade da instalação de máquinas como as utilizadas no processo de eletroerosão ou centros CNC, como os utilizados no corte a laser ou no corte a plasma. É necessária entretanto, apenas a instalação de um sistema de exaustão para os gases provenientes da reação química e preparação para o descarte adequado dos resíduos.

1.2 PROBLEMÁTICA DE PESQUISA

De que forma a variação de parâmetros da usinagem química com NaOH pode gerar melhores resultados no substrato alumínio?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação da variação de parâmetros da usinagem química com NaOH em tubo quadrado de alumínio.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver a usinagem química com NaOH em tubo quadrado de alumínio;
- b) Avaliar qual seleção de parâmetros gera resultados satisfatórios;
- c) Mensurar a precisão dimensional do perfil geométrico usinado;

- d) Avaliar o acabamento superficial gerado pelo processo;
- e) Mensurar a taxa de remoção como indicador de produtividade do processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

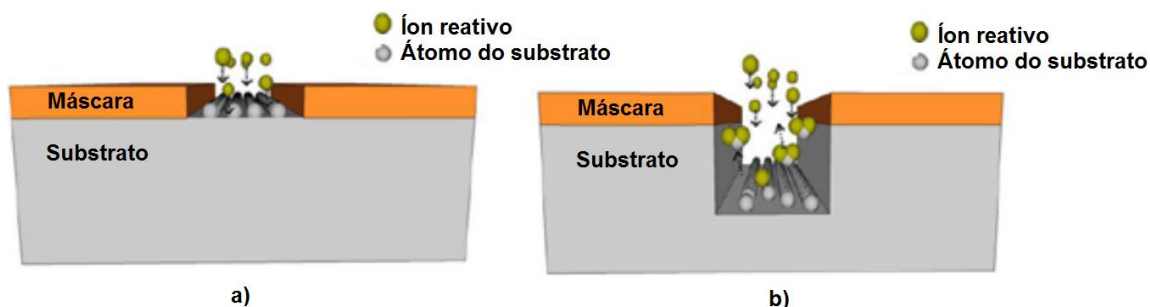
2.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM QUÍMICA

De acordo com Walker e Tarn (1991), a usinagem química (*chemical etching, chemical milling, chemical machining*) é um dos processos não convencionais de usinagem, cuja característica principal é a utilização de um reagente ácido ou alcalino, que corrói materiais em condições controladas. É um processo que remove material de substratos metálicos, de polímeros ou de compósitos através da corrosão, utilizando parâmetros pré-estabelecidos. A energia é proveniente da própria reação química, podendo ser potencializada por elementos externos.

A reação química e consequente corrosão irá ocorrer apenas nas áreas da substrato que terão contato direto com a solução agressiva ácida ou alcalina. Então, é necessário delimitar quais áreas sofrerão corrosão e quais áreas permanecerão intactas. Isto porque uma vez iniciada a reação, a corrosão atingirá porções cada vez mais profundas do substrato. Máscara é um revestimento utilizado no processo para realizar esta delimitação.

Conforme Figura 1, a máscara deverá aderir à superfície do substrato e permanecer assim durante todo o procedimento, e só deverá ser removida quando a reação química tiver sido terminada. Para cessar a reação, é necessário remover o substrato da solução reagente e neutralizar os resíduos.

Figura 1 – Etapas da reação a) Início da reação b) Reação em profundidade



Fonte: Nayak et al (2005) (modificado)

Com o desenvolvimento da indústria, a usinagem química foi aprimorada e passou a ser utilizada em diversos metais como aço, cobre, alumínio, níquel e

também em polímeros. O processo da usinagem química é dividido em quatro etapas:

- 1) seleção do reagente e dos parâmetros de usinagem;
- 2) fabricação e aplicação da máscara sobre a peça a ser usinada;
- 3) preparação das áreas do substrato que serão usinadas; e
- 4) contato do reagente com o substrato, iniciando reação química.

Como em qualquer outro processo de usinagem, existem parâmetros que podem ser variados para aumentar a taxa de remoção de material, melhorar a precisão dimensional do perfil geométrico usinado ou obter diferentes perfis de rugosidade. Os parâmetros que podem ser variados são:

- a) tipo e concentração do reagente;
- b) temperatura da reação;
- c) tempo da reação;
- d) elemento potencializador aplicado (tensão, radiação, plasma, movimento).

Com a evolução do processo, a gama de reagentes que podem ser utilizados aumentou. Hoje em dia é possível usinar um mesmo material com reagentes tanto ácidos quanto alcalinos, ou ainda misturas de reagentes de diferente natureza.

A seleção do reagente adequado para cada tipo de material caracteriza qual será o tipo de usinagem química (*etch type*). Segundo Walker e Tarn (1991), ao todo existem 248 tipos de reagentes para os diversos materiais, que são ácidos ou bases com diferentes concentrações. O estado destas substâncias também pode variar, geralmente são soluções líquidas, mas podem ser aplicadas no estado sólido ou gasoso.

A intensidade da reação na superfície do material, pode ser desde fraca, alterando apenas o perfil de rugosidade até forte, removendo uma maior quantidade de material e caracterizando uma usinagem em profundidade. Segundo Tarasova (1968), se esta usinagem remover uma pequena espessura do material criando rebaixos na peça, então ela é classificada como fresamento

químico (*chemical milling*). Já se a usinagem fazer uma remoção profunda de material, por vezes cortando sua seção e criando porções vazadas, é classificada como usinagem química em profundidade (*deep etch*). É importante que a reação seja bem controlada, para que se possa obter um resultado satisfatório.

As normas que padronizam o processo são a ASTM E407 Prática Padrão para Microusinagem Química de Metais e Ligas (*Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*), a ASTM E340 Método de Teste Padrão para Macrousinagem Química de Metais e Ligas (*Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys*) e a ASTM D1193 Especificação para Solução Reagente (*Specification for Reagent Water*). Não há norma nacional.

As principais patentes ativas são US2933675 Controle da Usinagem Química (*Chemical Milling Control*), US2981610 Processo e Composição da Usinagem Química (*Chemical Milling Process and Composition*) e US2890944 Processo de Usinagem Química Contínua (*Continuous Chemical Milling Process*). Especificamente para usinagem química do alumínio, existe a patente de 1969 US3486954 Método para Usinagem Química do Alumínio (*Method for Etching Aluminum*).

Os dados provenientes das normas e patentes citadas nos últimos parágrafos contribuíram para a seleção do tipo de reagente a ser utilizado no trabalho, assim como no ácido utilizado para decapar o alumínio. A norma ASTM D1193, assim como o livro *Handbook of Metal Etchants* orientaram ser possível utilizar o NaOH como reagente para corroer alumínio.

Já a norma ASTM E340 apresenta o H₂SO₄ como ácido adequado para realizar a decapagem do alumínio antes da usinagem química. A patente US3486954 também apresentou dados sobre a configuração dos equipamentos de laboratório para realização do procedimento de usinagem química, semelhante às demais referências utilizadas neste trabalho.

2.1.1 O substrato alumínio

Conforme Abal (2007), o alumínio é o metal não-ferroso mais utilizado na indústria devido às suas características físico-químicas como baixo peso (2,70 g/cm³), alta condutividade elétrica e térmica e resistência a corrosão. A temperatura de fusão do alumínio é de 600°C, quando a pureza é de 99,8%. É um

metal paramagnético.

O alumínio puro é dificilmente aplicado na indústria, pois com adição de elementos de liga, tratamento térmico e trabalho a frio, ele pode atingir resistência a tração de aproximadamente 700Mpa. Os elementos de liga utilizados podem ser, em ordem de importância: silício, cobre, manganês, magnésio, cromo, zinco e ferro.

Ainda de acordo com Abal (2007), algumas das principais áreas de aplicações do alumínio são: indústria automobilística, naval, aeronáutica e aeroespacial, mas também é amplamente utilizado na indústria metalomecânica.

É utilizado na fabricação de dissipadores de calor, terminais e condutores elétricos, blocos de motores, cabos nus, elementos estruturais da construção civil, mecânica e eletroeletrônica, hélices, turbinas, bicicletas, tanques para transporte e armazenamento de líquidos, silos, embalagens de alimentos, latas de bebidas, além de ser matéria prima para uma série de processos da indústria química, como por exemplo elemento catalisador em combustível de foguetes ou um dos elementos da solda com termita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$).

Segundo Walker e Tarn (1991), a usinagem química do alumínio foi industrialmente iniciada pela indústria aeronáutica dos Estados Unidos da América em 1956, com a denominação de fresamento químico (*chemical milling*). O processo foi utilizado com a finalidade de remover material de certas áreas das peças, sem cortá-las, apenas para reduzir seu peso.

Com a difusão do processo no meio industrial da fabricação de peças de alumínio, vários estudos sobre os parâmetros de usinagem foram realizados. Não outrora, foi constatado que a seleção do reagente adequado garante um resultado satisfatório.

Conforme Lorenzen (1966), por se tratar de um metal de baixa nobreza, consequentemente bastante reativo, o alumínio reage tanto com ácidos quanto com bases. A grande dificuldade na usinagem química do alumínio é garantir que a precisão dimensional do perfil geométrico e acabamento superficial, apresentem qualidade satisfatória.

Ainda, a adesão da máscara ao substrato alumínio, pode ser um real desafio. Pois uma vez que ocorre uma falha como um espaço vazio entre o alumínio e a máscara, ocorrerá reação neste ponto que poderá acarretar em danos superficiais e usinagem de áreas que não deveriam ter sido usinadas. Por

isso, para o substrato alumínio são indicadas máscaras confeccionadas através de uma pintura. Neste caso, a superfície deve estar muito bem limpa e a tinta específica para o substrato deve ser aplicada da forma correta, para que não haja nenhum defeito.

De acordo com Abal (2007), uma camada de óxido superficial se forma quando o alumínio é exposto a atmosfera (camada de passivação), e este óxido garante significativa resistência à corrosão. O oxigênio tem grande afinidade com o alumínio (sólido ou líquido) formando sobre sua superfície esta película de óxido cuja espessura está em torno de 25 à 30 Å à temperatura ambiente. A formação de óxido sobre a superfície é imediata, sendo que seu volume molecular é 1/3 maior que o alumínio consumido na reação. A película de óxido é contínua, aderente e dura.

Esta camada de óxido também pode ser criada artificialmente na superfície do metal com o processo de anodização, que pode gerar uma camada mais espessa de óxido, bem como com diferentes perfis de rugosidade e processos que podem colorir a superfície do metal.

Desta forma, antes da usinagem química do alumínio, as áreas da peça à serem usinadas deverão ser decapadas. A decapagem da camada de óxido de alumínio pode ser realizada através de um ataque químico ou por abrasão mecânica.

2.1.2 Os reagentes

Conforme Chandler (2008), os reagentes utilizados para usinar alumínio podem ter natureza alcalina (bases) como o hidróxido de sódio (NaOH), ou ácida como o ácido clorídrico (HCl) ou cloreto de ferro III (FeCl₃). São mais de 100 catalogados.

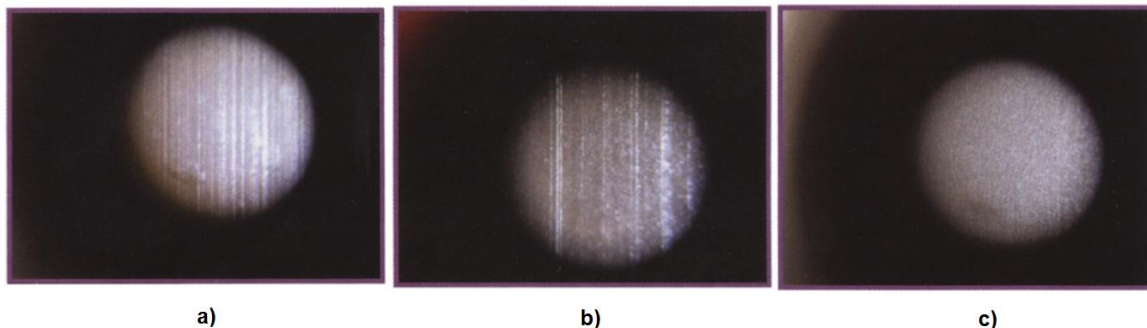
Os diversos estudos sobre a eficiência dos reagentes para usinar este material concluíram que aqueles de natureza alcalina como as bases, apresentam melhores resultados.

O FeCl₃ foi um reagente bastante estudado e apresenta uma série de características que tornam muito comum a sua utilização, entretanto existem algumas limitações técnicas por ser de natureza ácida e além de possuir custo elevado. Relativo ao custo, 1L de cloreto de ferro em solução aquosa (40%

concentração no volume) custa atualmente em média R\$110,00, enquanto 1kg de hidróxido de sódio (NaOH) na forma de escamas atualmente custa apenas R\$5,00. Por outro lado, uma vantagem do cloreto de ferro seria a possibilidade de recondicionar a solução após o uso.

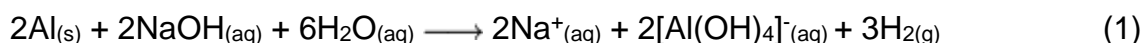
É importante, portanto, comparar as vantagens e desvantagens de se usinar o alumínio com uma solução ácida ou alcalina. Na Figura 2 é possível observar a usinagem química utilizando uma solução alcalina. Este tipo de solução remove mais material que usando uma solução ácida.

Figura 2 - Comparativo entre natureza dos reagentes a) alumínio bruto b) alumínio atacado por ácido c) alumínio atacado por base (NaOH)



Fonte: Chandler (2008) (modificado)

O hidróxido de sódio (NaOH) ou soda cáustica, como é popularmente conhecido, é tratado como reagente universal para processos de usinagem química do alumínio, uma vez que sua reação é fácil de controlar, possui natureza alcalina e custo reduzido. Por exemplo, 1kg de hidróxido de sódio em escamas pode ser utilizado para usinar centenas de peças, pois cada diluição em solução líquida consumirá apenas alguns gramas do material. A reação do hidróxido de sódio com o alumínio dá-se conforme a Equação 1.



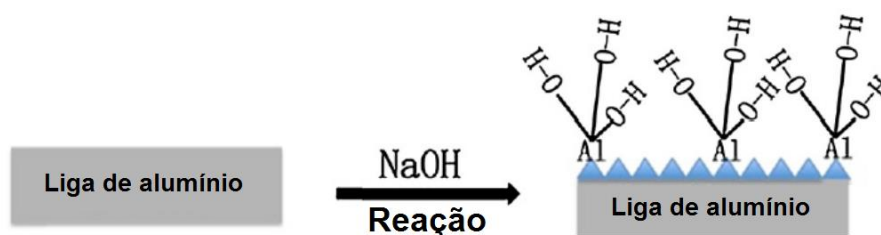
A reação química apresentada pela Equação 1 mostra dois fenômenos importantes:

- a) a reação da água com o alumínio;
- b) a geração de gás hidrogênio (H₂).

A ilustração da reação da solução alcalina com o substrato alumínio dá-se conforme Figura 3, onde de acordo com Torng (2009), durante o processo de usinagem química a água dissocia o hidróxido de sódio que ioniza a solução com OH^- .

Quando o alumínio entra em contato com esta base e a reação é iniciada, quem ataca o alumínio é a água ionizada. Diferente do que acontece na reação que utiliza cloreto de ferro, se a solução de hidróxido de sódio ficar fraca mas receber mais água, então a reação continuará acontecendo.

Figura 3 – Solução alcalina reagindo com o substrato alumínio

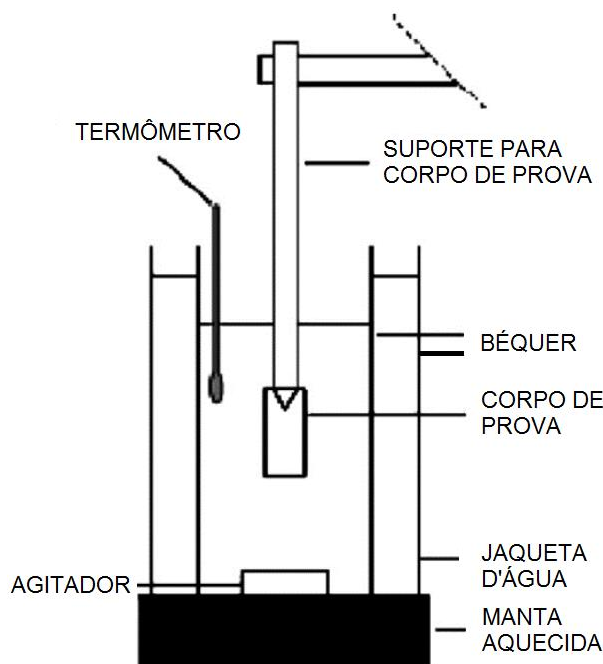


Fonte: Huang et al (2015) (modificado)

Isto caracteriza uma reação bastante eficiente, pois o mesmo reagente pode ser utilizado durante um tempo considerável, desde que a água consumida pela reação seja repostada. Em um meio industrial, o consumo de hidróxido de sódio seria minimizado, e a solução só precisaria ser descartada quando estivesse demais contaminada com partículas de alumínio.

De acordo com Çakir et al (2008), esta reação deve ser configurada em banho-maria, conforme mostra a Figura 4, para que a água auxilie na homogeneização da temperatura e dissipe o calor da reação exotérmica.

Figura 4 - Configuração da reação em banho-maria



Fonte: Çakir et al (2008)

De acordo com Fiorotto (2014), durante o processo de reação o laboratório deve ser mantido ventilado, uma vez que é gerado gás hidrogênio (H_2), que é muito volátil e inflamável. O gás hidrogênio ainda ocupa o lugar do oxigênio presente no ar que respiramos, sendo que o nível nominal de oxigênio no ar é de 20,5%. O nível máximo para respiração de um adulto é de 23,5% e o nível mínimo é de 19,5%. Ora, se o gás hidrogênio proveniente da reação ocupar parte do volume do ar que respiramos, então o nível de oxigênio pode cair para abaixo do nível mínimo, pode haver insuficiência respiratória e causar um acidente.

Segundo Çakir et al (2008), a usinagem química do alumínio exige que a camada de óxido passivante, formada naturalmente pela reação do alumínio com o oxigênio presente no ar, seja decapada. Para fazer esta decapação pode-se utilizar ácido sulfúrico (H_2SO_4). O ácido sulfúrico deve ser derramado sobre a superfície do alumínio, e a reação deve ocorrer durante um tempo pré-estabelecido pelo experimento, bem como qual será a concentração deste ácido.

Se fosse utilizado ácido nítrico (HNO_3) para esta reação, a menos que a superfície do metal ou o ácido estivessem aquecidos, não ocorreria a reação, pois o ácido nítrico na temperatura ambiente reforçaria a camada passivante de óxido de alumínio. A reação do ácido sulfúrico (H_2SO_4) dá-se conforme a Equação 2.



Conforme Fiorotto (2014), os resíduos gerados devem ser tratados ou recondicionados antes do seu descarte. O descarte de resíduos no Brasil é regido pela norma ABNT NBR 10004 Classificação de Resíduos Sólidos. No caso do hidróxido de sódio, por se tratar de uma base, antes do seu descarte ele deve ser neutralizado em solução ácida.

A indicação da natureza da solução deverá ser realizada com fenolftaleína, que ficará desde rosa até roxa para meios. O descarte só poderá ser realizado quando após a aplicação da fenolftaleína, a solução se apresentar incolor e translúcida.

No caso do cloreto de ferro III, o descarte é complexo, pois não se pode neutralizá-lo diretamente, ele precisa ser recondicionado antes de qualquer descarte devido às suas propriedades químicas altamente corrosivas. Deve-se lembrar que utilizando como reagente tanto o cloreto de ferro quanto o hidróxido de sódio, após a usinagem química do alumínio haverá presença de óxido de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (aq) na solução.

Quando o hidróxido de sódio utilizado na reação com o substrato alumínio é neutralizado com ácido nítrico (HNO_3) para posterior descarte, a reação dá-se conforme Equação 3.



2.1.3 As máscaras

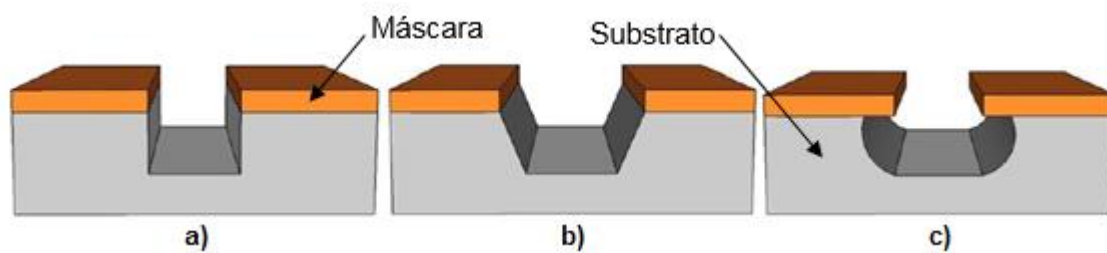
As máscaras utilizadas no processo tem a função de delimitar quais áreas das peças serão usinadas. Dessa maneira, uma máscara deve aderir à peça, protegendo as partes que não deverão ser atacadas pelo reagente.

De fato, o reagente pode não corroer a peça apenas no sentido vertical. Dependendo dos parâmetros de usinagem selecionados e da reatividade química do substrato a ser usinado, é possível que o reagente também corra o substrato por baixo da máscara. A característica que define o tipo de usinagem química em relação à direção da corrosão é chamada de isotropia da usinagem.

De acordo com Nayak et al (2005) a usinagem pode ser completamente

anisotrópica, parcialmente anisotrópica ou isotrópica, conforme mostra a Figura 5. O objetivo é que o tipo de usinagem seja completamente anisotrópica. Desta maneira, é possível garantir que as dimensões nominais do perfil geométrico (dimensões de projeto) terão pouca variação após o processo de usinagem química.

Figura 5 – Isotropia da usinagem química a) totalmente anisotrópico b) parcialmente anisotrópico c) isotrópico



Fonte: Nayak et al (2005) (modificado)

Conforme Allen (1986), o projeto da máscara deve considerar as seguintes variáveis:

- a) o reagente que será utilizado na reação química;
- b) o material do substrato; e
- c) a espessura do substrato.

Atualmente, a maioria dos projetos dimensionais das máscaras são realizados utilizando software CAD, onde o detalhamento 2D da máscara gera um desenho dimensional na escala desejada, podendo ser impresso e utilizado como gabarito para aplicação da máscara.

A natureza do reagente determina qual tipo de material deve ser utilizado na fabricação da máscara. Este material deve ser resistente ao reagente, mas não deve causar uma reação de neutralização para não enfraquecer o reagente.

O material pode ser um polímero como plástico ou borracha, ou pode ser um líquido polimerizante como tintas, vernizes, resinas ou acrílicos. Estes podem ser ainda fotossensíveis, que polimerizam mediante a presença de luz com comprimento de onda e intensidade adequados. Este tipo de máscara é ideal para peças com dimensões muito reduzidas, como processadores de computador e outros componentes da eletrônica que possuem dimensões nanométricas.

De acordo com Langoworthy (1994), uma vez que para maiores espessuras o tempo da reação é maior e a energia proveniente da reação é liberada na forma de calor, a máscara e a peça sofrerão aquecimento significativo durante a usinagem. Desta forma a máscara deverá ser projetada de tal forma que permaneça sólida e não perca aderência mesmo quando aquecida. De maneira análoga, a microestrutura da peça não deve ser modificada pelo calor proveniente da reação, exceto quando a aplicação permitir tais modificações.

Segundo Furtado (2009), determinadas tintas possuem propriedades anticorrosivas, podendo ser utilizadas em ambientes agressivos, como em uma reação química. Uma máscara para usinagem química pode ser confeccionada deste tipo de tinta. A vantagem de se utilizar uma pintura como máscara, é que assim como acontece com os demais líquidos polimerizantes, ela irá secar e aderir à superfície do substrato sem a necessidade da utilização de uma cola. No caso das máscaras rígidas, como as de plástico ou de borracha, deve-se colar a máscara na peça. Então uma série de outras variáveis devem ser consideradas, como a natureza química da cola e o desempenho quando em alta temperatura proveniente da reação.

Para garantir uma perfeita adesão da tinta anticorrosiva ao substrato, deve-se utilizar uma tinta específica para este substrato em questão (material da peça), assim como este substrato deve estar muito bem limpo para receber a tinta. Ainda, deve ser verificada a especificação da tinta, pois ela pode ser resistente apenas a um meio ácido ou apenas a um meio básico. Em alguns casos, pode ser resistentes a ambos os meios ácido e básico.

A ausência de reatividade de tintas anticorrosivas, garante que não haverá reação de neutralização. Uma reação de neutralização ocorre quando um ácido reage com uma base, neutralizando o pH da solução e produzindo sal e água. No caso da usinagem química, tal fenômeno enfraqueceria o reagente e tornaria a reação menos eficiente.

2.1.3.1 Máscara de tinta WEGPoxi 3082

Se a máscara confeccionada for uma pintura, a tinta utilizada nesta pintura deverá atender a dois requisitos:

- a) ser específica para o substrato na qual será aplicada; e
- b) ser anticorrosiva, resistente ao reagente utilizado.

A pintura da peça deve seguir as recomendações do fabricante, como a necessidade da limpeza e preparação superficial do substrato, o tipo de aplicação da tinta que pode ser utilizado e tempo de secagem e cura.

Conforme indicado na folha de dados do fabricante, a tinta WEGPoxi 3082 deve ter seus componentes A e B misturados, em porções iguais até que a solução fique homogênea. Após a mistura, a tinta deverá ser aplicada utilizando pistola (spray) para que haja deposição homogênea da tinta na superfície do substrato.

O substrato, por sua vez, deve estar limpo livre de gorduras, graxas, poeira ou qualquer impureza que possa estar presente na superfície. Para o alumínio, assim como para a maioria dos metais utilizados na indústria metalomecânica, é indicada limpeza com acetona ou nital ($\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) com 2% de concentração sobre o volume. Por se tratar de uma tinta de secagem rápida, o tempo de secagem e cura da tinta é de 2h.

2.1.4 Taxa de remoção

A taxa de remoção e a profundidade da usinagem, são diretamente proporcionais. Segundo Çakir et al (2008), a taxa de remoção do material a ser usinado está diretamente relacionada com os seguintes parâmetros de usinagem:

- a) tipo e concentração do reagente;
- b) tempo da reação;
- c) temperatura da reação.

Quanto maior o tempo e temperatura da reação, e maior a concentração do reagente, mais material é removido. A expressão que determina a profundidade da remoção é dada conforme Equação 4.

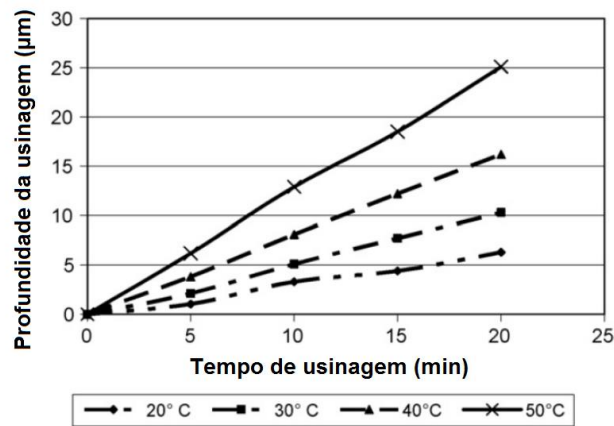
$$E = s/t \tag{4}$$

Em que “E” é a taxa de remoção, “s” é a profundidade da usinagem e “t” é

o tempo total da reação.

A Figura 6 apresenta a relação entre a profundidade da usinagem com o parâmetro tempo de reação. Observa-se que quanto maior o tempo de reação, maior é a profundidade da usinagem.

Figura 6 – Relação entre tempo de reação e taxa de remoção

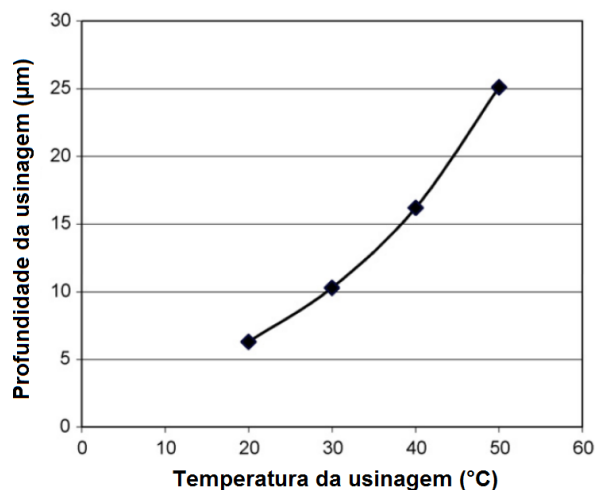


Fonte: Çakir et al (2008) (modificado)

Conforme Fiorotto (2014), as reações químicas são aceleradas com maiores temperaturas (e também com maiores pressões). Desta maneira, quanto maior o tempo e maior a temperatura, mais material tende a ser removido.

A Figura 7 apresenta a relação entre a profundidade da usinagem com o parâmetro temperatura da reação. Observa-se que quanto maior a temperatura da reação, maior é a profundidade da usinagem.

Figura 7 – Relação entre temperatura da reação e taxa de remoção



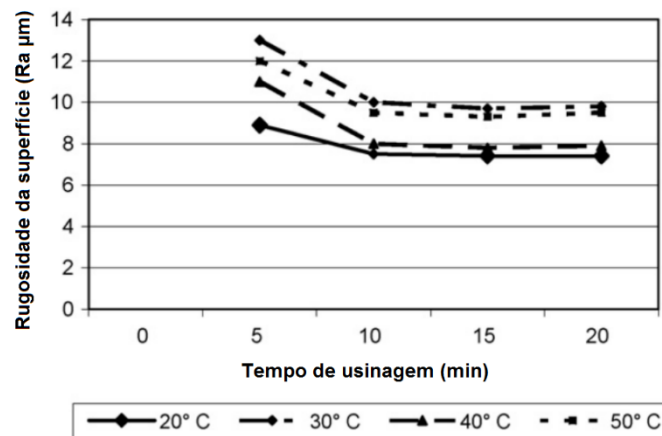
Fonte: Çakir (2008) (modificado)

2.1.5 Acabamento superficial

Os parâmetros da usinagem química também tem influência direta no perfil de rugosidade. Segundo Çakir et al (2008), um maior tempo de reação produz menores valores de rugosidade, todavia será uma menor temperatura que gerará um menor perfil de rugosidade.

Como mostra a Figura 8, durante o início da reação (de 5 a 10 minutos) o perfil de rugosidade estava alto, mas conforme o tempo de reação aumenta este diminui e estabiliza. Ainda, pode-se observar que quanto menor a temperatura da reação, menor é o perfil de rugosidade gerado, pois uma temperatura de 20°C depois de 10min de reação gerou um valor de rugosidade de Ra de 7,5µm, enquanto um temperatura de 50°C após os mesmos 10min de reação gerou um valor de rugosidade Ra de 9,5µm.

Figura 8 – Influência do tempo e temperatura da reação no perfil de rugosidade



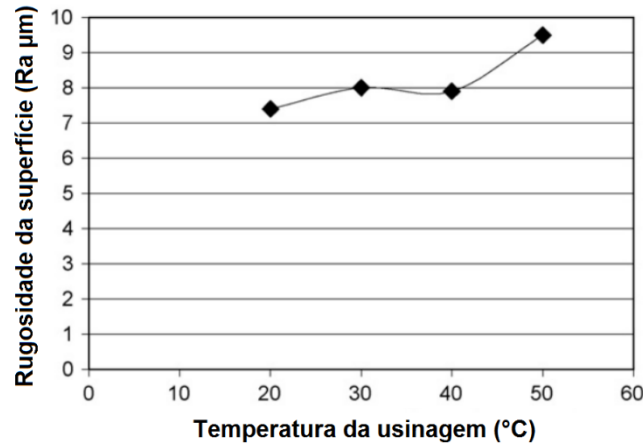
Fonte: Çakir et al (2008) (modificado)

A Figura 9 mostra que, independentemente do tempo de reação, a temperatura da reação irá produzir um acabamento superficial distinto. Em determinado momento da reação, uma maior temperatura gera um perfil de rugosidade maior.

Observa-se entretanto, que isto é uma tendência, mas não é linear. A temperatura de 20°C gerou um valor de rugosidade de Ra de 7,5µm, enquanto um temperatura de 50°C gerou um valor de rugosidade Ra de 9,5µm. Entretanto, uma temperatura de 30°C gerou um valor de rugosidade Ra de 8µm enquanto

uma temperatura de 40°C gerou um valor de rugosidade menor, com Ra de 7,5µm.

Figura 9 – Influência da temperatura da reação no perfil de rugosidade

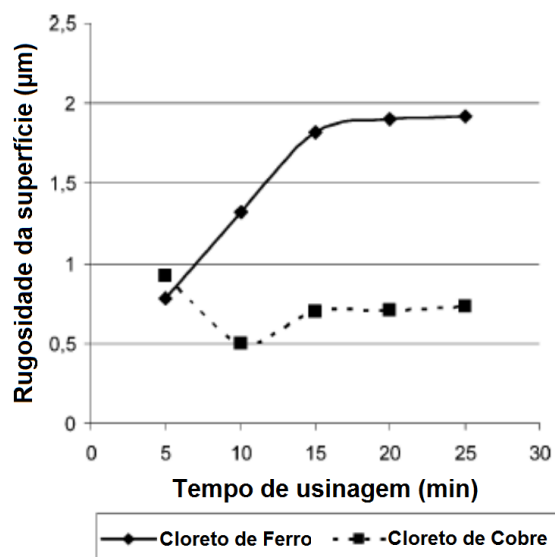


Fonte: Çakir et al (2008) (modificado)

Segundo Çakir et al (2005), os tipos de reagentes utilizados também têm influência no perfil de rugosidade da peça usinada. Diferentes reagentes com a mesma concentração podem gerar acabamentos superficiais diferentes.

Conforme apresentado na Figura 10, o reagente cloreto de ferro gerou um perfil de rugosidade maior do que o gerado pelo reagente cloreto de cobre. Isto porque como a reação será mais forte ou mais fraca, dependendo do tipo de reagente, a taxa de remoção será maior ou menor impactando diretamente no acabamento superficial do substrato.

Figura 10 – Influência do tipo de reagente no perfil de rugosidade



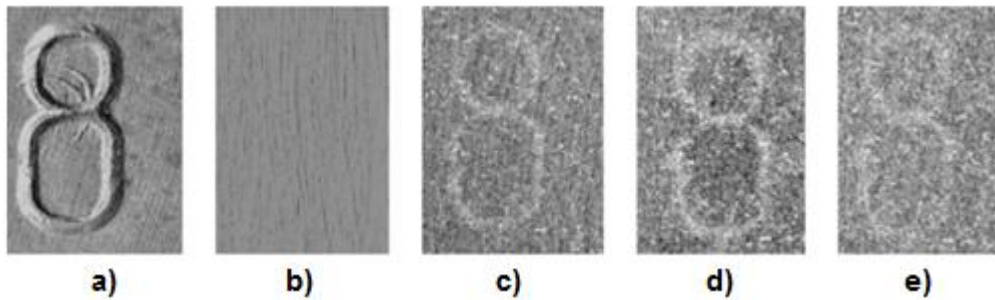
Fonte: Çakir et al (2005) (modificado)

Segundo Song (2015), com a utilização da usinagem química é possível recuperar superfícies metálicas riscadas, com uma reação de tal modo que removerá uma pequena espessura da superfície de todo substrato. Isto porque, quando a peça é riscada ou marcada, os átomos destas áreas são deformados (comprimidos) e ficam diferentes da configuração das demais áreas superficiais da peça.

Ainda que estes riscos ou marcas sejam lixados ou removidos por algum processo de abrasão mecânica, os átomos logo abaixo da superfície continuam comprimidos. Então, se uma análise for feita com microscópio, há uma chance de se identificar onde haviam tais riscos. Mas, se a usinagem química for utilizada, estas regiões antes riscadas e marcadas ficarão novamente bem visíveis, pois o produto da reação irá revelar que a configuração atômica do substrato está diferente. Este processo pode ser utilizado em investigações forenses, para identificar números de chassi lixados ou restaurar marcas de projéteis balísticos.

A figura 11 apresenta um exemplo da recuperação superficial de uma peça marcada, cuja marca havia sido lixada. Em seguida, foi realizada usinagem química na peça que restaurou a marca do risco.

Figura 11 – Recuperação de superfície marcada a) peça marcada b) depois de lixar c) 1ª restauração d) 3ª restauração e) 5ª restauração



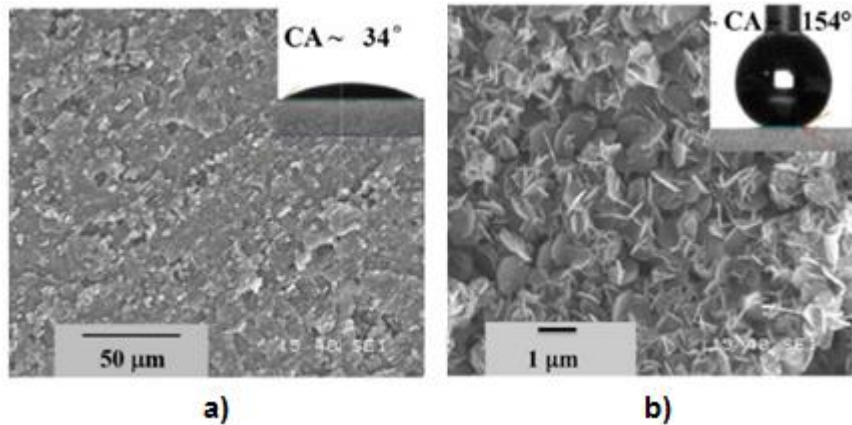
Fonte: Song (2015) (modificado)

De acordo com Huang et al (2015), com a utilização de hidróxido de sódio (NaOH) como reagente utilizado na usinagem química e ácido esteárico ($C_{18}H_{36}O_2$) como reagente utilizado na decapação, pode-se obter superfícies super-hidrofóbicas com bastante eficiência.

Superfícies super-hidrofóbicas podem ser utilizadas em partes de aeronaves, onde não pode ocorrer o acúmulo de água nem consequente formação de gelo. Não obstante, existem estudos que visam fabricar o vidro do para-brisa de veículos de alta *performance* a fim de evitar o acúmulo da água da chuva. Desta maneira, é possível que os limpadores de para-brisa se tornariam obsoletos.

A morfologia deste tipo de superfície é flocular, onde o ângulo de contato entre os flocos é superior a 150° . Isto caracteriza este acabamento superficial como repelente de água, conforme comparado na Figura 12, onde são comparadas a superfície do substrato usinado apenas com hidróxido de sódio e decapado com ácido esteárico, com acabamento superficial super-hidrofóbico. Nesta figura, CA significa *contact angle* (ângulo de contato).

Figura 12 – Comparação entre substrato normal e super-hidrofóbico a) substrato usinado com NaOH b) substrato usinado com NaOH e decapado com $C_{18}H_{38}O_2$



Fonte: Huang et al (2015) (modificado)

Segundo Huang et al (2015), existe outra maneira de utilizar a usinagem química para criar superfícies super-hidrofóbicas sem utilizar o ácido esteárico. Isto é possível, aplicando-se uma tensão à solução utilizada na reação química, que é condutora elétrica. A corrente proveniente desta tensão permite orientar a remoção de material, cuja intensidade pode ser determinada através de cálculos específicos para este processo. Então, variando a posição dos eletrodos um número específico de vezes, é possível orientar os flocos gerados de modo que fiquem com ângulo de contato superior a 150° .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e ferramentas utilizados na preparação dos corpos de prova, assim como as etapas deste processo. Também será apresentada metodologia utilizada no procedimento prático em laboratório, assim como todas etapas e parâmetros utilizados.

3.1 MATERIAIS

Lista de materiais utilizados na fabricação dos corpos de prova:

- Tubo quadrado de alumínio TQ-023 da série 1050, com espessura de 1mm e dimensões externas de 25,4x25,4mmx50mm, fabricante Alcoa;
- Plástico adesivo "Papel Contact", fabricante 3M;
- Tinta WEGPoxi 3082 Amarela 0,5L, fabricante WEG;
- Pistola para pintura spray, fabricante Schulz;
- Acetona concentração 100%, fabricante Ideal;
- Manta de aquecimento, fabricante Solab;
- Régua com resolução 0,5mm, fabricante Tramontina;
- Serra manual, fabricante Tramontina;
- Esquadro, fabricante Tramontina;
- Lima, fabricante Nicholson.

Lista de materiais utilizados no procedimento prático em laboratório:

- Béquer de vidro boro 3.3 1L, fabricante Boeco;
- Béquer de vidro boro 3.3 250mL, fabricante Boeco;
- Balão volumétrico boro 3.3 250mL, fabricante Boeco;
- Hidróxido de Sódio (NaOH) 0,5kg, fabricante Dinâmica;
- Ácido Nítrico (HNO₃) 100mL, fabricante Dinâmica;
- Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) 100mL, fabricante Dinâmica;
- Água destilada;
- Manta de aquecimento, fabricante Solab;
- Banho ultrassom, fabricante Cristófoli;
- Balança de precisão, fabricante KN Waagen;

- Termômetro; fabricante Incoterm;
- Cronômetro, fabricante Casio.

Lista de equipamentos de proteção individual (EPIs):

- Óculos de proteção de policarbonato, fabricante Fenix;
- Luva tricotada com palma de borracha, fabricante Vonder;
- Sapato de segurança, fabricante Conforto;
- Jaleco de algodão, fabricante Majoka.

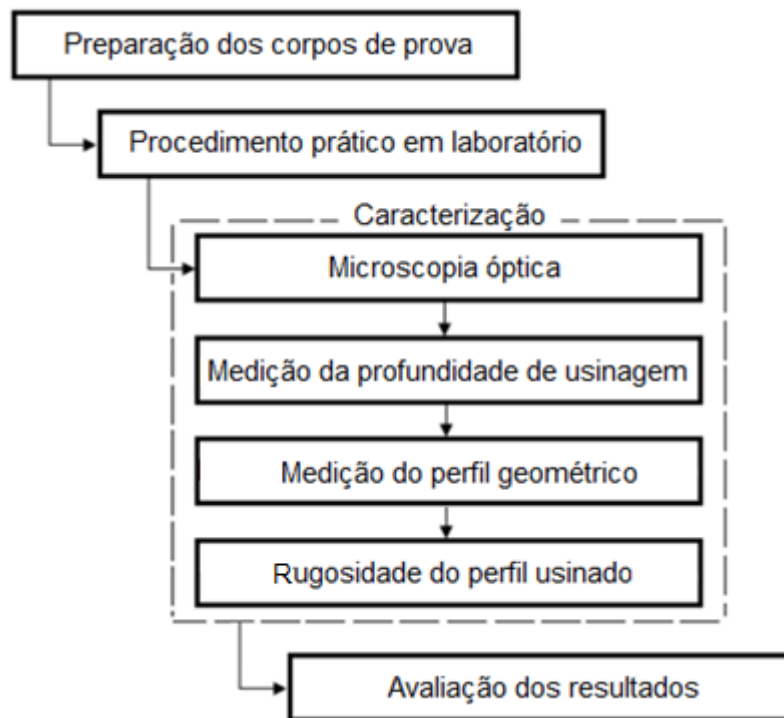
Lista de instrumentos de medição utilizados na caracterização:

- *Dial Caliper* (medidor de espessura), fabricante Insize;
- Projetor de Perfil, fabricante Mitutoyo;
- Rugosímetro portátil, fabricante Tesa;
- Estereoscópio, fabricante Zeiss.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As etapas do procedimento experimental são descritas na Figura 13, onde pode-se observar que primeiramente foi necessário preparar os corpos que prova, para serem utilizados no procedimento prático em laboratório e na sua caracterização. Estas etapas são detalhadas posteriormente.

Figura 13 - Etapas do procedimento experimental

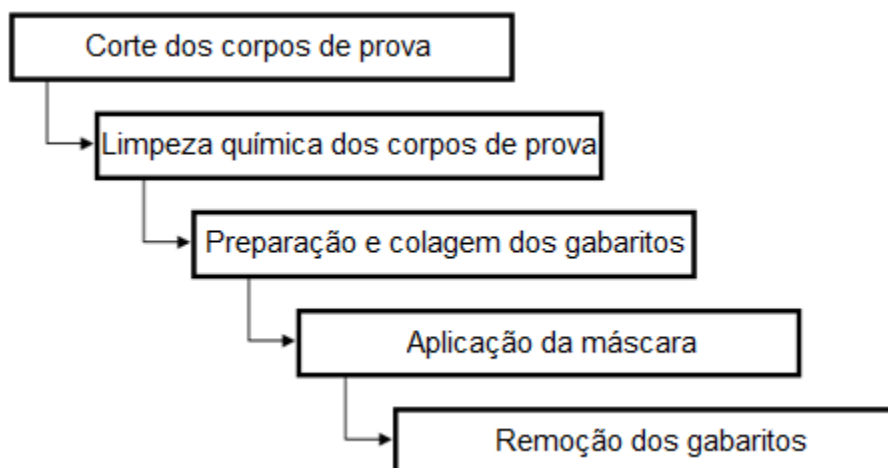


Fonte: autor (2017)

3.2.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados de acordo com as etapas apresentadas na Figura 14. Posteriormente foram utilizados no procedimento prático em laboratório. No total, foram preparados 12 corpos de prova.

Figura 14 - Preparação dos corpos de prova

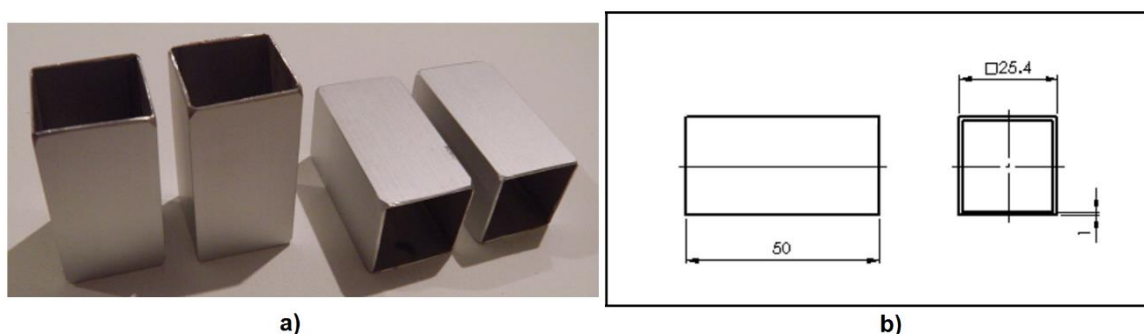


Fonte: autor (2017)

3.2.1.1 Corte dos corpos de prova

Foi utilizada como matéria prima o tubo de alumínio quadrado TQ-023 da série 1050, da marca Alcoa, com comprimento de 6000mm e lado de 25,4mm. A espessura nominal é de 1mm, mas a espessura medida foi de 0,95mm. O tubo foi cortado em 12 pedaços com 50mm de comprimento cada, conforme mostra a Figura 15. Este procedimento foi realizado com auxílio de uma serra manual.

Figura 15 - Corpos de prova (a) peças cortadas (b) medidas nominais



Fonte: autor (2017)

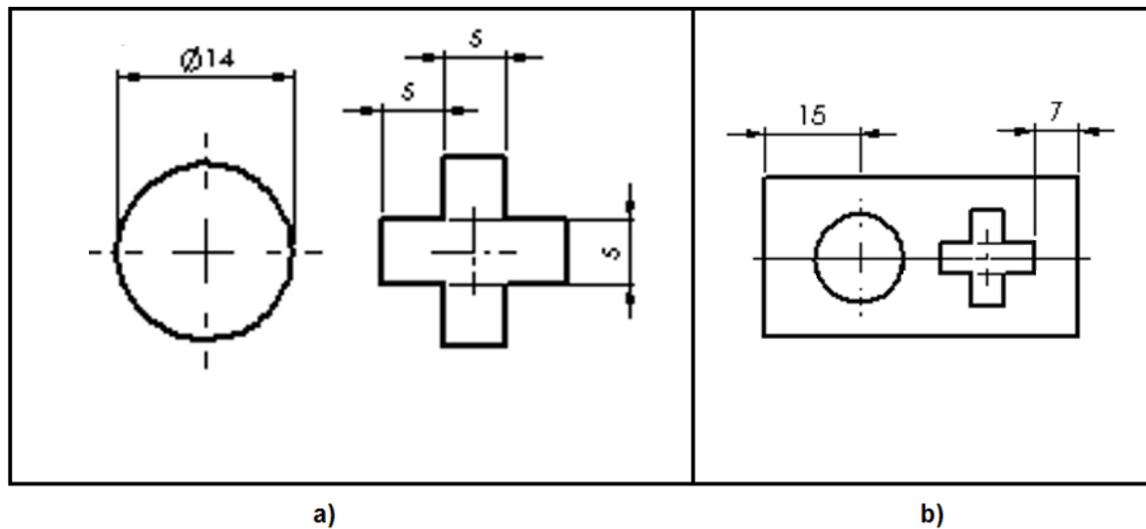
3.2.1.2 Limpeza química dos corpos de prova

Os corpos de prova, após cortados, tiveram as rebarbas removidas com auxílio de uma lima e posteriormente foram limpos. Para a limpeza, foram utilizadas soluções líquidas de acetona e nital (mistura de ácido nítrico com etanol, fórmula $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) com 2% de concentração em volume.

3.2.1.3 Preparação e colagem dos gabaritos

Os desenhos dimensionais em milímetros do gabaritos e do corpo de prova são apresentados na Figura 16, onde pode-se observar a) as duas formas geométricas dos gabaritos (cruz e círculo) e b) o corpo de prova com os gabaritos posicionados.

Figura 16 - Desenhos dimensionais (a) gabaritos (b) posição dos gabaritos no corpo de prova



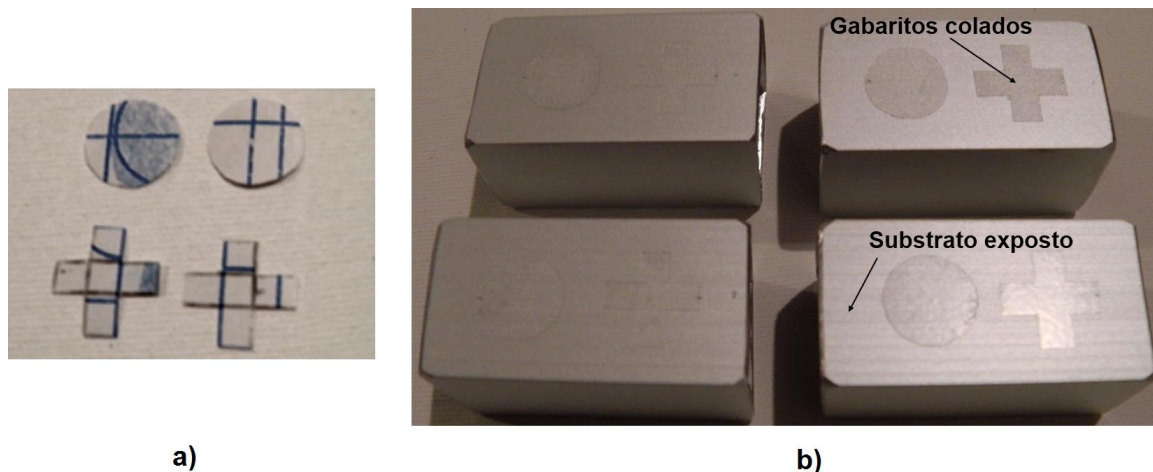
Fonte: autor (2017)

Para confeccionar os gabaritos, foram desenhadas em uma folha de Papel Contact as duas formas geométrica. Para o desenho foi utilizada lapiseira com grafite 0,5mm e régua com resolução de 0,5mm.

Estas formas foram então cortadas com uma tesoura conforme mostra a Figura 17 (a), de modo que garantiram precisão dimensional de $\pm 0,5\text{mm}$. No total, foram recortados 24 gabaritos, sendo 12 círculos e 12 cruces.

Posteriormente estes gabaritos foram colados nos corpos de prova conforme mostra a Figura 17 (b). Durante a colagem foi garantida a ausência de bolhas de ar sob os gabaritos, pois estas poderiam interferir na precisão geométrica das formas.

Figura 17 - Colagem dos gabaritos a) Gabaritos cortados b) Gabaritos colados nos corpos de prova



Fonte: autor (2017)

3.2.1.4 Aplicação da máscara

Após a colagem dos gabaritos foi realizada a confecção da máscara. O tipo de máscara aplicada foi uma pintura, utilizando a tinta WEGPoxi 3082 (ver Figura 18). A tinta é composta por uma base (componente A) e um catalisador (componente B), dispostos em recipientes distintos. Foi então misturada uma porção de 150mL de cada componente no reservatório de tinta da pistola para pintura, pois assim, após 1 hora, a tinta ficou homogeneizada e pronta para uso.

Figura 18 - Tinta WEGPoxi 3082



Fonte: autor (2017)

Utilizando a pistola para pintura spray, toda a extensão do corpo de prova foi pintada, inclusive a parte interna. Foram aplicadas 3 demãos, com intervalos de 2h entre cada demão. Este tempo é o tempo de secagem e cura indicado pelo fabricante da tinta, que tem a característica de ser de secagem rápida (a base de nitrocelulose). Permaneceram sem pintura apenas as porções cobertas pelos gabaritos. É importante salientar que houve respingos de tinta sobre os gabaritos.

3.2.1.5 Remoção dos gabaritos

Passadas 2h da terceira demão, os gabaritos foram removidos dos corpos de prova utilizando uma pinça. Esta etapa foi realizada com cautela para não danificar a máscara durante a remoção. Os resíduos de cola do Papel Contact foram limpos com acetona. Os corpos de prova sem os gabaritos ficaram com áreas do substrato expostas, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Corpos de prova sem os gabaritos

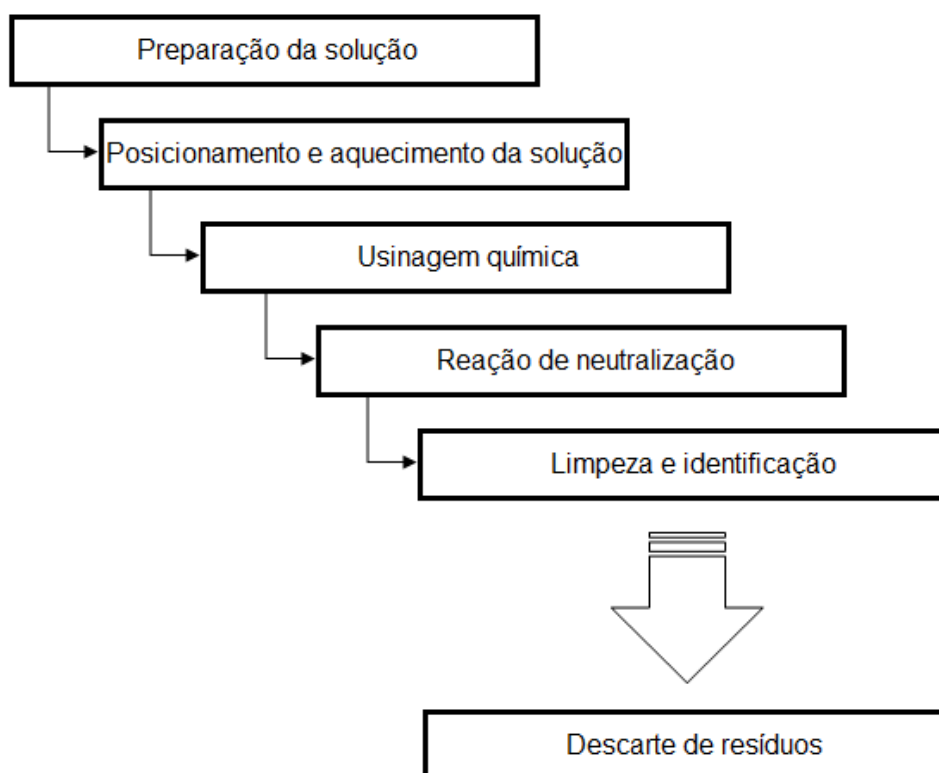


Fonte: autor (2017)

3.2.2 Procedimento prático em laboratório

As etapas do procedimento prático em laboratório foram estipuladas conforme descreve a Figura 20, com os objetivos de realizar a usinagem química em todos os corpos de prova e descartar corretamente os resíduos gerados.

Figura 20 - Procedimento prático em laboratório



Fonte: autor (2017)

Durante o desenvolvimento do procedimento prático em laboratório, foram variados os seguintes parâmetros:

- Concentração do reagente (1,5, 1,75, 2, 2,5, 4 e 6 molar);
- Temperatura (25, 60 e 90°C);
- Tempo (1 e 2h)

O procedimento prático em laboratório foi organizado de modo que, os doze corpos de prova foram divididos em três grupos, cada grupo sendo usado uma vez e com parâmetros distintos. Os parâmetros foram variados para gerar resultados diferentes para o estudo de uma configuração mais satisfatória, sendo que esta variação foi baseada em dados da literatura referenciada neste trabalho.

A Tabela 1 apresenta a configuração de cada grupo. Também é apresentada a variação de cada parâmetro utilizado.

Tabela 1 – Parâmetros de usinagem

Identificação	Grupo	Concentração (molar NaOH)	Temperatura (°C)	Tempo (h)
Corpo de prova 1	01	2,5	60	1
Corpo de prova 2		4		
Corpo de prova 3		6		
Corpo de prova 4	02	1,5	25	2
Corpo de prova 5			60	
Corpo de prova 6			90	
Corpo de prova 7	03	1,75	25	
Corpo de prova 8			60	
Corpo de prova 9			90	
Corpo de prova 10	04	2	25	
Corpo de prova 11			60	
Corpo de prova 12			90	

Fonte: autor (2017)

3.2.2.1 Preparação da solução

Antes de iniciar a usinagem foi realizada a preparação da solução para o Grupo 1. O reagente selecionado para a usinagem química foi o hidróxido de sódio (NaOH). Conforme mostra a Figura 21, o reagente estava no estado sólido, em pérolas, este precisou ser pesado e diluído em água destilada. O volume da solução líquida utilizada em cada corpo de prova foi de 120mL.

Figura 21 – Reagente sólido sendo pesado



Fonte: autor (2017)

Nesta etapa foram variadas as concentrações do reagente, sendo que ficaram na ordem de 2,5 molar, 4 molar e 6 molar. 1 mol de NaOH tem massa

molar igual a 40g, enquanto 1 molar (que é a unidade de concentração) é o equivalente a 1 mol por litro. Conforme apresentado na Figura 22, as soluções do reagente foram então colocadas em um banho-ultrassom para limpeza. Em seguida, foram reservadas para uso posterior.

Figura 22 – Reagente colocado em banho-ultrassom



Fonte: autor (2017)

3.2.2.2 Posicionamento e aquecimento da solução

Três mantas de aquecimento foram posicionadas sobre a bancada, e sobre cada uma delas foi colocado um béquer de 1L com 250mL de água destilada. Dentro deste béquer foi posicionado outro de 250mL, preenchido com 120mL de reagente, cada um com uma concentração diferente, o primeiro com 2,5 molar, o segundo com 4 molar e o terceiro com 6 molar.

Cada béquer foi identificado com sua concentração e temperatura utilizando um marcador. Este tipo de configuração é chamado de banho-maria. As mantas foram então ligadas e a temperatura selecionada foi de 60°C, conforme mostra a Figura 23.

Foi necessário aguardar 1h antes de posicionar os corpos de prova dentro do reagente, isto para que se atingisse o equilíbrio térmico, tanto da água destilada como do reagente para atingirem a temperatura de 60°C. Para isto, foi utilizado o sensor de temperatura (um termômetro) da própria manta, que teve seu contato inserido dentro da água destilada do béquer maior.

Figura 23 – Mantas ligadas para atingir o equilíbrio térmico



Fonte: autor (2017)

3.2.2.3 Usinagem química

Devido ao fenômeno da passivação, onde uma camada de óxido de alumínio é formada na superfície do substrato, foi necessário decapar as porções de alumínio expostas antes de dar início à usinagem química. Esta camada de óxido é bastante dura e resistente, de modo que iria interferir na reação entre o metal e o reagente.

Esta decapagem foi realizada molhando-se as superfícies em questão com ácido sulfúrico (H_2SO_4) na concentração de 9 molar. O ácido reagiu com a superfície durante 1 minuto.

O próximo passo foi inserir os três corpos de prova, cada um dentro de um béquer diferente para iniciar a usinagem química. Neste momento, foi dada a partida na marcação do tempo através de um cronômetro. A Figura 24 mostra a configuração dos equipamentos de laboratório durante a usinagem química.

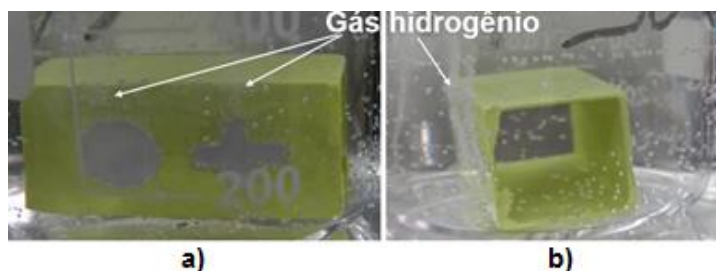
Figura 24 – Início da usinagem química



Fonte: autor (2017)

Como a reação não foi realizada dentro de uma capela, as janelas e portas do laboratório precisaram ser abertas para garantir uma boa ventilação. Isto porque quando o hidróxido de sódio reage com o alumínio é gerado gás hidrogênio (H_2) que é altamente volátil e inflamável. O detalhe da geração deste gás durante a usinagem química é apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Detalhe da usinagem química a) Detalhe da vista frontal b) Detalhe da vista lateral



Fonte: autor (2017)

O tempo de usinagem foi de 1h, após esse intervalo os corpos de prova foram retirados de dentro dos béqueres utilizando um bastão de vidro. Eles foram então reservados em um recipiente de vidro.

3.2.2.4 Reação de neutralização

Os corpos de prova foram inseridos em um béquer com água destilada,

onde foi aplicada solução líquida de fenolftaleína que ficou rosa, indicando que ainda haviam resíduos de hidróxido de sódio.

Foi necessário aplicar gradualmente uma solução de ácido nítrico (HNO_3) com concentração de 1 molar, para neutralizar os resíduos de base presentes. Quando a solução ficou incolor, a reação de neutralização estava concluída.

3.2.2.5 Repetição do procedimento nos demais corpos de prova

Os próximos três corpos de prova que foram usinados (Grupo 02), tiveram como parâmetro fixo a concentração do reagente e como parâmetro variável a temperatura. Todo o procedimento de preparação dos corpos de prova e equipamentos do laboratório, bem como volumes de reagente e água destilada tiveram a mesma metodologia que foi aplicada no Grupo 1, exceto o tempo de reação que desta vez foi de 2h.

A concentração do reagente preparado nesta etapa foi de 1,5 molar. As três temperaturas selecionadas nas mantas de aquecimento foram de 25°C, 60°C e 90°C (considerado temperatura ambiente com a manta desligada), respectivamente. Foi aguardado 1h até iniciar a reação, para atingir novamente o equilíbrio térmico. Após 2h de usinagem, os corpos de prova foram lavados, armazenados e identificados.

Seguindo o procedimento prático, os próximos três corpos de prova a serem usinados (Grupo 03) seguiram a mesma metodologia, com temperaturas de 25°C, 60°C e 90°C. Entretanto, a concentração do reagente foi de 1,75 molar. O tempo de usinagem foi de 2h e ao final os corpos de prova foram lavados, armazenados e identificados.

A última prática (Grupo 04), com os três corpos de prova restantes, seguiu o mesmo procedimento das demais, com temperaturas de 25°C, 60°C e 90°C. Porém, com concentração do reagente de 2 molar. O tempo de usinagem foi de 2h e ao final os corpos de prova foram lavados, armazenados e identificados.

3.2.2.6 Limpeza e identificação dos corpos de prova

Após a usinagem química, os corpos de prova foram secos com papel toalha, armazenados em um recipiente plástico com divisórias e identificações

para cada um deles.

3.2.2.7 Descarte de resíduos

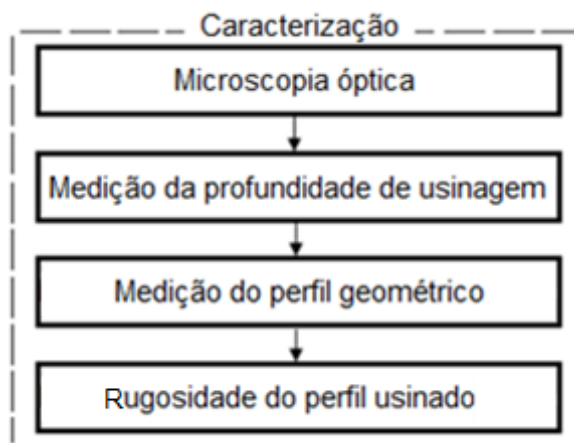
O descarte de resíduos das reações foi realizado conforme descrito nas normas ABNT NBR 10004 Classificação de Resíduos Sólidos, utilizando solução de ácido nítrico para neutralizar a solução de hidróxido de sódio.

Após neutralizados, os resíduos foram filtrados em filtro de papel para remover todas as partículas de óxido de alumínio provenientes da reação química. A solução líquida filtrada foi descartada no ralo da pia, enquanto os resíduos sólidos de alumínio foram descartados em uma lixeira apropriada.

3.3 CARACTERIZAÇÃO

As etapas da caracterização foram efetuadas conforme mostra a Figura 26, com os objetivos de realizar medições dimensionais e avaliar o acabamento dos corpos de prova após a usinagem química.

Figura 26 – Caracterização



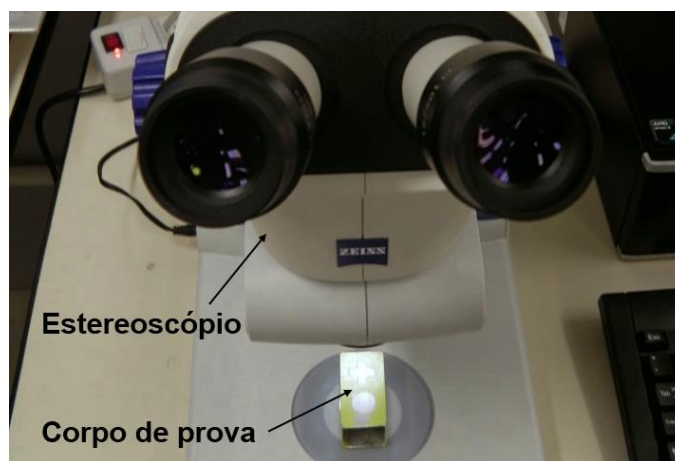
Fonte: autor (2017)

3.3.1 Microscopia óptica

O procedimento de microscopia óptica foi realizado no laboratório de materiais do IFSC campus Jaraguá do Sul - Rau. O equipamento utilizado nesta etapa foi um estereoscópio da marca Zeiss modelo Stemi 2000-C.

Conforme apresentado na Figura 27, o estereoscópio é um equipamento óptico, munido de lentes e uma câmera, que realiza ampliações e permite que o usuário tire fotos através de um software. O objetivo de se ampliar imagens de peças é observar detalhes da microestrutura e do perfil geométrico.

Figura 27 – Estereoscópio e corpo de prova posicionado

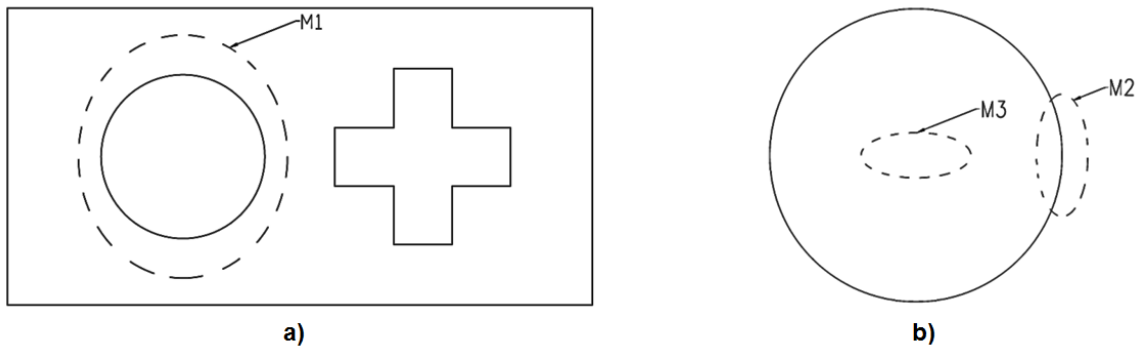


Fonte: autor (2017)

Conforme mostra a Figura 28, foi estipulada uma metodologia específica de ampliação dos corpos de prova. Foram realizadas imagens com detalhes de um dos perfis geométricos usinados e da microestrutura de acordo com a seguinte lista:

- a) Área M1 com aumento de 6,5x;
- b) Área M2 com aumento de 25x;
- c) Área M3 com aumento de 40x.

Figura 28 – Metodologia de ampliação a) área do círculo b) detalhes do círculo



Fonte: autor (2017)

Nos corpos de prova onde a usinagem perfurou o substrato (usinagem vazada), foi possível fotografar apenas as áreas M1 e M2. As imagens foram então classificadas pelo respectivo corpo de prova e posteriormente arquivadas.

3.3.2 Medição da profundidade de usinagem

O procedimento de medição dos corpos de prova foi efetuado no Laboratório de Metrologia do IFSC, campus Jaraguá do Sul - Rau. A primeira etapa do procedimento foi a medição da profundidade de usinagem, que é basicamente a espessura das áreas usinadas dos corpos de prova.

O instrumento de medição utilizado foi um *Dial Caliper* (medidor de espessura), que é um dispositivo com dois bicos longos e acionado através uma manopla móvel, conforme mostra a Figura 29. A faixa de medição do instrumento é de 0-20mm e sua resolução é de 0,01mm.

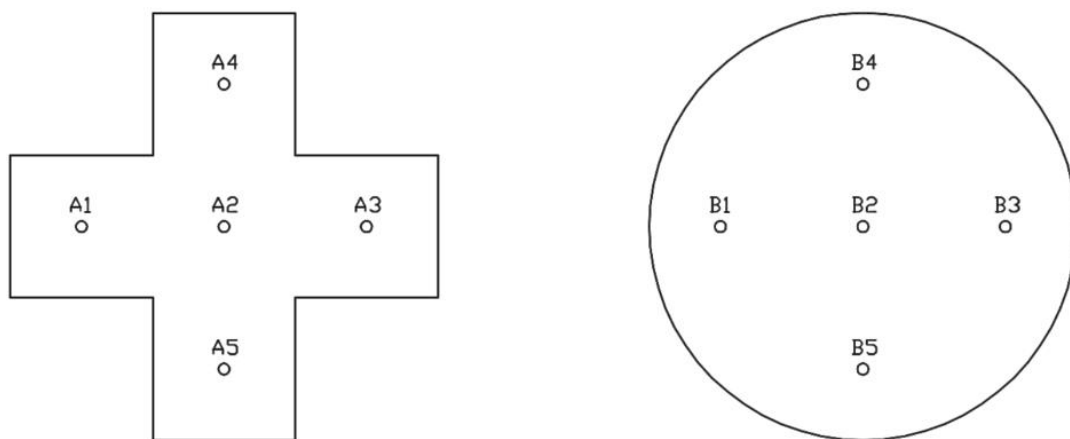
Figura 29 – *Dial Caliper* (medidor de espessura)



Fonte: autor (2017)

Para realização desta etapa, foi estipulada uma metodologia de medição. Como pode ser observado na Figura 30, em cada corpo de prova foi medida a espessura em 5 pontos diferentes na cruz (de A1 até A5) e cinco pontos diferentes no círculo (de B1 até B5). O objetivo de medir diferentes pontos da área usinada é possibilitar o cálculo de uma média da espessura, bem como desvio padrão, para se atingir resultados coesos.

Figura 30 – Metodologia para medição da profundidade de usinagem

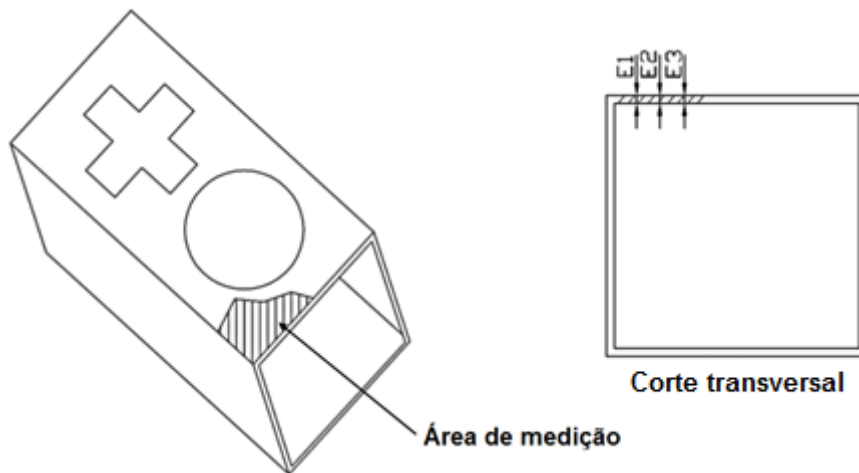


Fonte: autor (2017)

A próxima etapa do procedimento, foi a medição da espessura não usinada dos corpos de prova. Foi necessário remover resíduos da máscara da parte interna externa do tubo, utilizando removedor de tinta. Isto porque a espessura dos resíduos de tinta da máscara poderia interferir no valor medido.

O instrumento de medição utilizado nesta etapa foi novamente o *Dial Caliper*, sendo que foi estipulada uma nova metodologia de medição. Conforme mostra a Figura 31, em cada corpo de prova, na área onde os resíduos da máscara foram removidos, foi medida a espessura em 3 pontos diferentes (de E1 até E3). As hachuras representam a área onde houve remoção de resíduos da máscara.

Figura 31 – Metodologia para medição da espessura não usinada

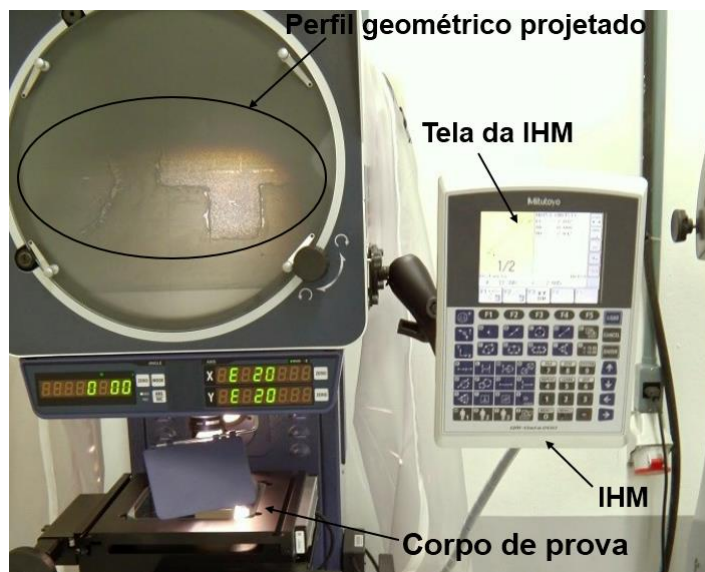


Fonte: autor (2017)

3.3.3 Medição do perfil geométrico

Posteriormente, foi medido o perfil geométrico das áreas usinadas. O equipamento de medição utilizado nesta etapa foi o Projetor de Perfil modelo PJA 3000, conforme mostra a Figura 32. Este é um instrumento óptico-eletrônico com resolução de 0,001mm e incerteza de medição 0,1% diascópica e 0,15% episcópica, sendo que ele projeta um perfil ampliado da peça em um monitor. O tipo de medição a ser executada é selecionado através da IHM (Interface Homem Máquina).

Figura 32 - Projetor de Perfil

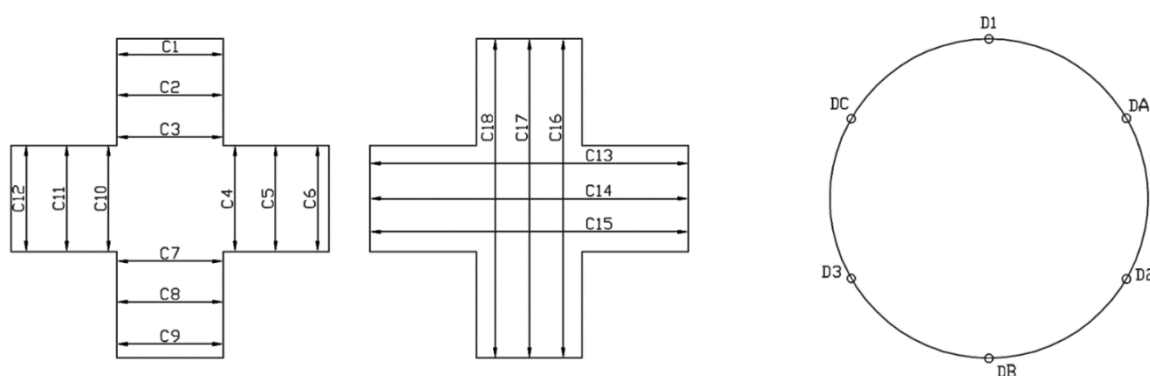


Fonte: autor (2017)

O instrumento foi preparado para realizar as medições. Para isto, foi posicionada uma lente com aumento de 10x.

Foi utilizada uma metodologia específica de medição. Em cada corpo de prova foram realizadas 18 medições de comprimento (de C1 até C18) em cada cruz e 2 medições de diâmetro entre 3 pontos diferentes em cada círculo (D1, D3 e D5 para um diâmetro e D2, D4 e D6 para o outro), conforme Figura 33.

Figura 33 – Metodologia para medição do perfil geométrico



Fonte: autor (2017)

Com isso pode-se estabelecer os valores médios dos comprimentos e diâmetros. Esses dados provenientes das medições foram tabelados, e posteriormente são apresentados no capítulo de Resultado e Discussões.

3.3.4 Rugosidade do perfil usinado

Em seguida foram medidos os perfis de rugosidade da área usinada dos corpos de prova. Este procedimento foi realizado no laboratório de metrologia do IFSC campus Jaraguá do Sul - Rau.

O equipamento utilizado foi um rugosímetro, conforme mostra a Figura 34. Este é um equipamento eletromecânico que desliza um apalpador com uma agulha sobre a superfície desejada, e calcula os diversos perfis de rugosidade através de pulsos elétricos.

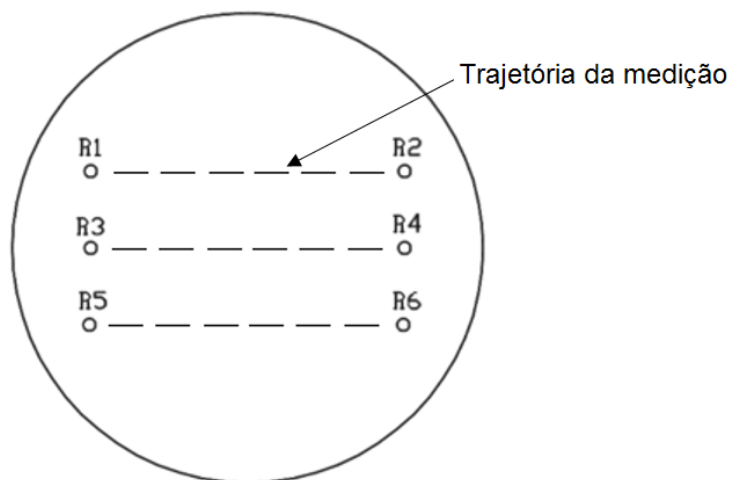
Figura 34 – Rugosímetro e corpo de prova posicionado



Fonte: autor (2017)

Foram medidas três regiões distintas de uma das formas geométricas usinadas, utilizando *cut off* (comprimento de amostragem) de 5mm, de acordo com a norma ISO 4287. Conforme mostra Figura 35, foi estipulada uma metodologia de medição específica, com a qual foram medidas as regiões delimitadas pelos pontos (de R1 até R6). É importante ressaltar que as medições foram realizadas diretamente no substrato sem poeira nem resíduos, pois isto poderia interferir no resultado das medições.

Figura 35 – Metodologia para medição da rugosidade



Fonte: autor (2017)

Os parâmetros de rugosidade avaliados foram Ra (média aritmética dos afastamentos), Rt (distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo)

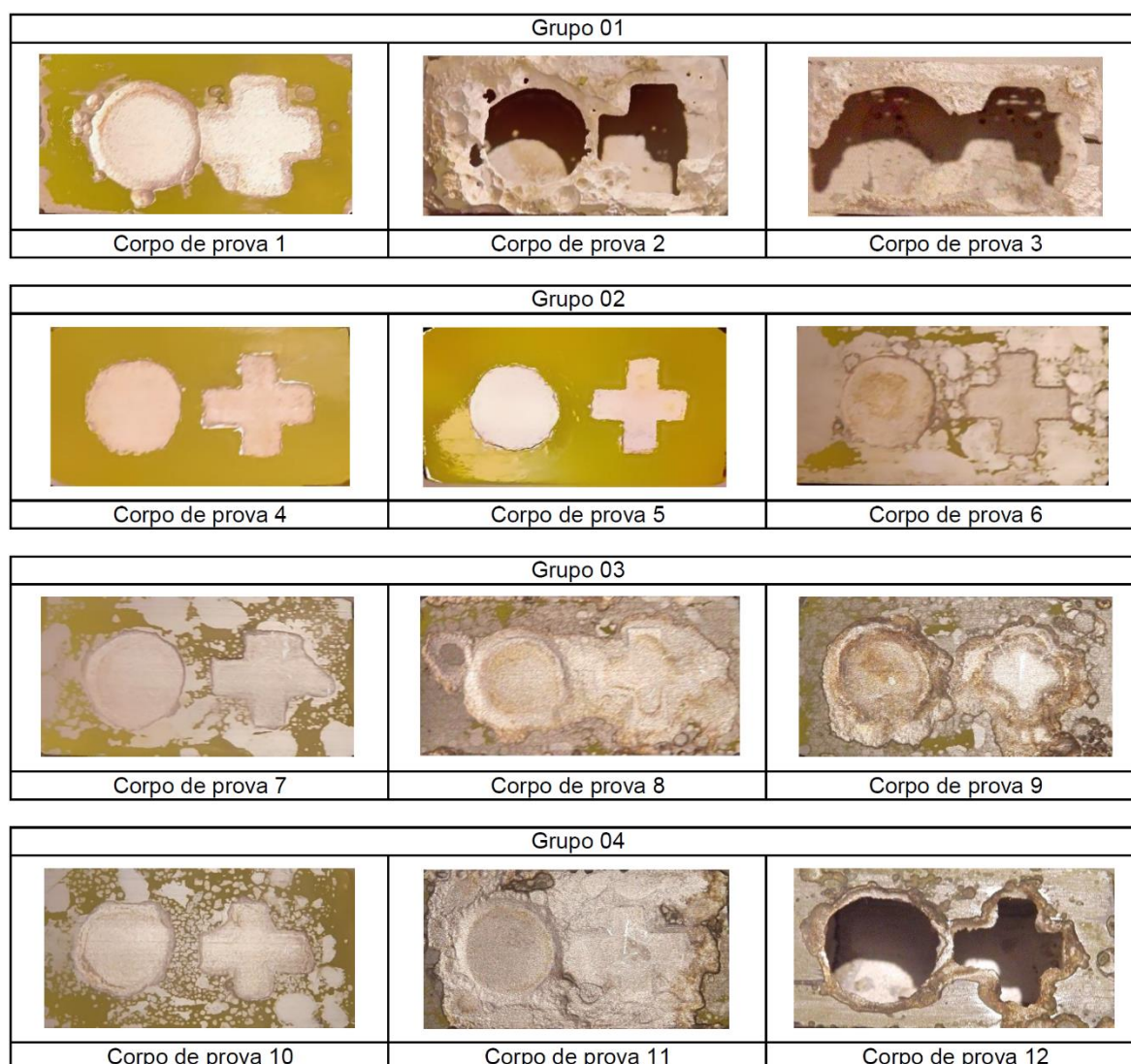
e Rz (média aritmética dos 5 valores de rugosidade parcial). Os valores resultantes dessas medições foram tabelados e utilizados no capítulo de Resultados e Discussões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO POR MICROSCOPIA ÓPTICA

A Figura 36 apresenta os 12 corpos de prova usinados. Pode-se observar que houveram alterações significativas entre os resultados, consequência da variação dos parâmetros de usinagem. Percebe-se que o Grupo 02 apresentou os melhores resultados, quando comparado com os demais grupos.

Figura 36 – Corpos de prova usinados



Fonte: autor (2017)

Todos os corpos de prova usinados apresentaram desprendimento da máscara de modo total ou parcial, exceto os corpos de prova 4 e 5. Isto ocorreu

devido à infiltração do reagente por baixo da máscara, iniciando um processo de corrosão nesta área.

O gás hidrogênio gerado por esta reação forma uma bolha, que faz pressão entre a superfície do substrato e a máscara, ocasionando seu desprendimento. Isto continua ocorrendo como uma reação em cadeia, até que toda a máscara ou parte dela sejam desprendidas.

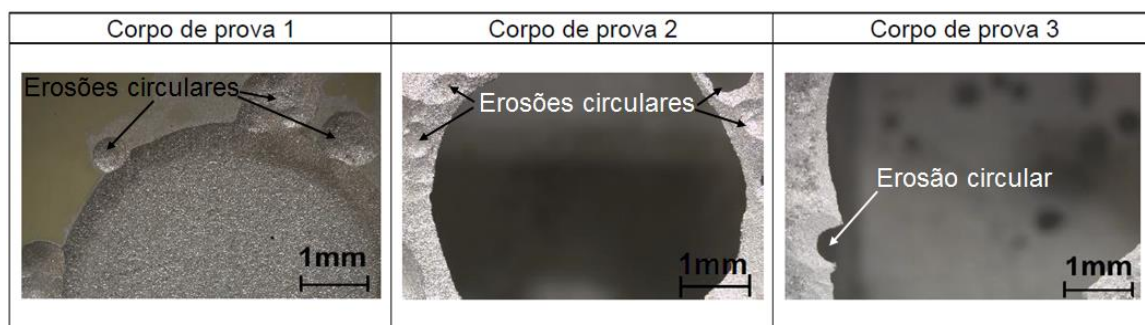
Houveram ainda erosões circulares nos limites da forma geométrica usinada na maioria dos corpos de prova, estes serão detalhados posteriormente. De maneira análoga ao que ocasiona o desprendimento da máscara, as erosões circulares são formadas devido à um princípio de corrosão que acontece por baixo da máscara, reagindo assim com o substrato e removendo o material. Estas erosões iniciam no mesmo momento do desprendimento da máscara.

4.1.1 Grupo 01

No Grupo 01 foi utilizada a maior variação na concentração do reagente, de 2,5 até 6 molar de hidróxido de sódio. Com isto pode-se constatar como uma maior concentração da base interfere no resultado do processo de usinagem química.

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos com a usinagem química para o Grupo 01. Nesta imagem podem ser observadas uma série de erosões circulares. É necessário ressaltar que para este grupo o tempo de usinagem foi de 1h, que é a metade do tempo de reação dos demais grupos.

Figura 37 – Micrografias do Grupo 01



Fonte: autor (2017)

Na Figura 37 pode-se observar que houve desprendimento da máscara em

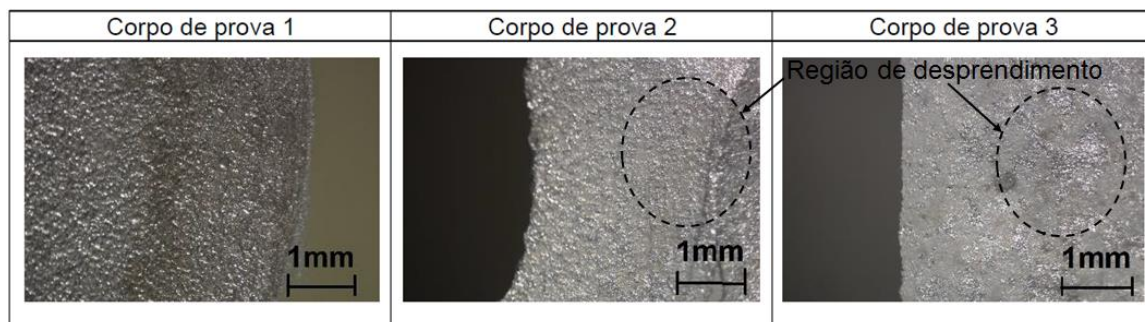
todos corpos de prova do Grupo 01. Os corpos de prova 2 e 3 tiveram a máscara completamente desprendida, sendo que a usinagem removeu completamente o substrato de ambos. Estes ainda, apresentaram erosões circulares nos limites da forma geométrica usinada, cujo aspecto não foi satisfatório. A forma usinada do corpo de prova 3 deixou de ser circular, descaracterizando seu formato nominal. Isto explica-se devido à concentração de 6 molar ter sido excessiva para este material.

O corpo de prova 1 não teve o substrato completamente removido, e o desprendimento da máscara foi apenas parcial. Todavia, assim como nos corpos de prova 2 e 3 pode-se observar erosões circulares. A forma geométrica usinada manteve suas características dimensionais quando comparada com os corpos de prova 2 e 3.

Percebe-se que uma concentração de 2,5 molar, foi menos agressiva que as outras utilizadas no Grupo 1, mas ainda apresentou-se excessiva devido às erosões circulares. O tipo de usinagem de ambas amostras foi parcialmente anisotrópico, o que não é uma condição esperada.

A Figura 38 apresenta o acabamento superficial com maiores detalhes da área usinada delimitada pela máscara do Grupo 01. Pode-se observar que a superfície gerada tem uma qualidade baixa, pois na região onde o substrato foi completamente removido nos corpos de prova 2 e 3, houve descaracterização do formato original.

Figura 38 – Detalhes das micrografias do Grupo 01



Fonte: autor (2017)

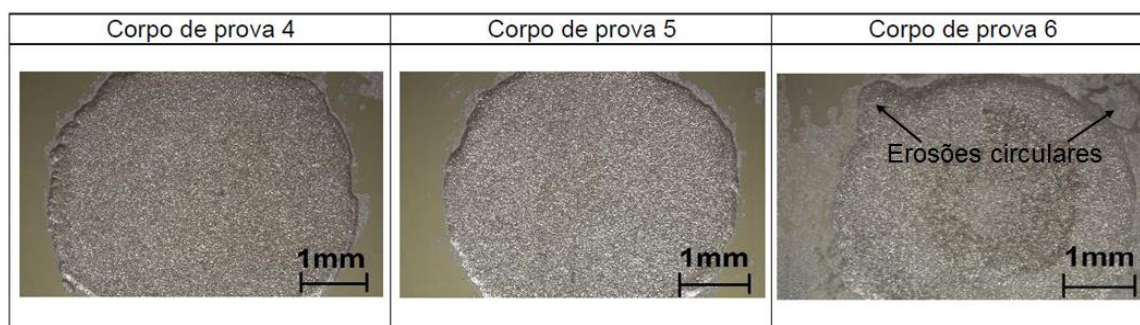
4.1.2 Grupo 02

A Figura 39 apresenta as micrografias do Grupo 02. Observa-se que este

foi o grupo com os resultados mais satisfatórios. Os corpos de prova 4 e 5 foram os que apresentaram melhores resultados para este grupo. Estes não apresentaram desprendimento da máscara nem erosões circulares.

As formas geométricas usinadas também se apresentaram com aparência satisfatória, mantendo o perfil nominal. O tipo de usinagem para este grupo foi totalmente anisotrópica, o melhor que se pode esperar.

Figura 39 – Micrografias do Grupo 02



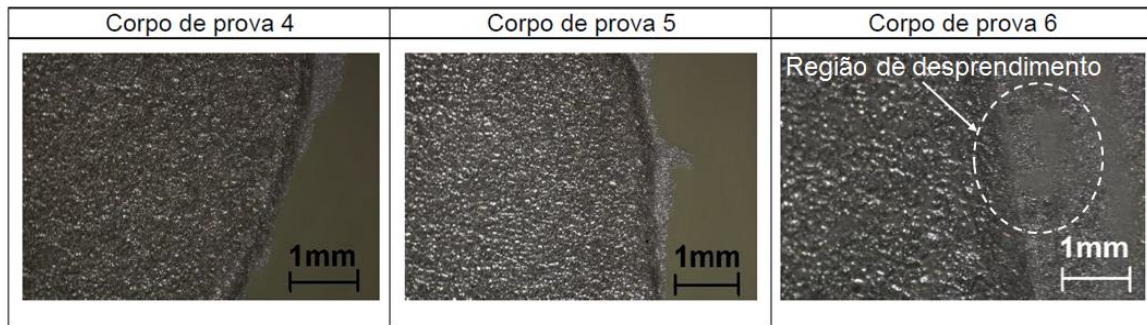
Fonte: autor (2017)

O corpo de prova 6 apresentou desprendimento parcial da máscara e erosões circulares nos limites da forma geométrica usinada, conforme pode-se observar na Figura 39. Isto pode ser explicado devido a usinagem ter acontecido a 90°C, a maior temperatura do grupo, que apresentou-se excessiva.

Para este grupo foi selecionada a menor concentração de reagente em relação aos demais grupos, que foi de 1,5 molar de hidróxido de sódio. A seleção deste parâmetro apresentou-se satisfatória, mantendo as características nominais do perfil usinado.

A Figura 40 apresenta o acabamento superficial com maiores detalhes da área usinada delimitada pela máscara do Grupo 02. Pode-se observar que os corpos de prova 4 e 5 apresentaram acabamento superficial menos rugoso. Entretanto, o corpo de prova 6 apresentou desprendimento total da máscara, devido à temperatura elevada utilizada.

Figura 40 – Detalhes das micrografias do Grupo 02

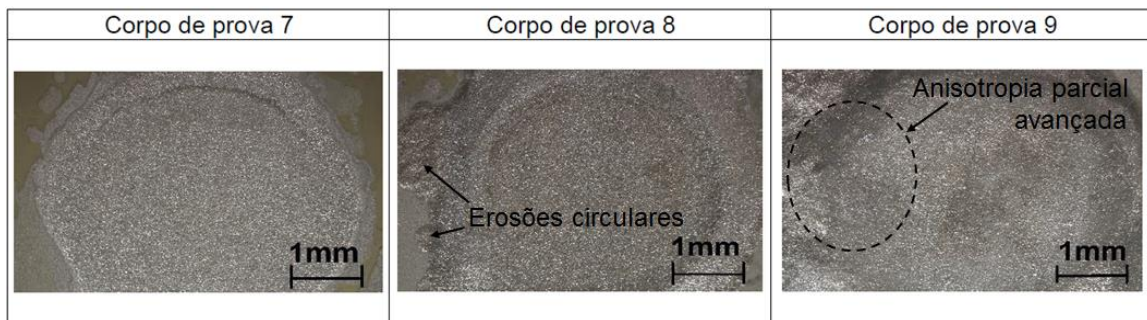


Fonte: autor (2017)

4.1.3 Grupo 03

A Figura 41 apresenta as micrografias do Grupo 03. Este resultou em usinagens do tipo parcialmente anisotrópicas, com uma grande área usinada entre a máscara e o substrato.

Figura 41 – Micrografias do Grupo 03



Fonte: autor (2017)

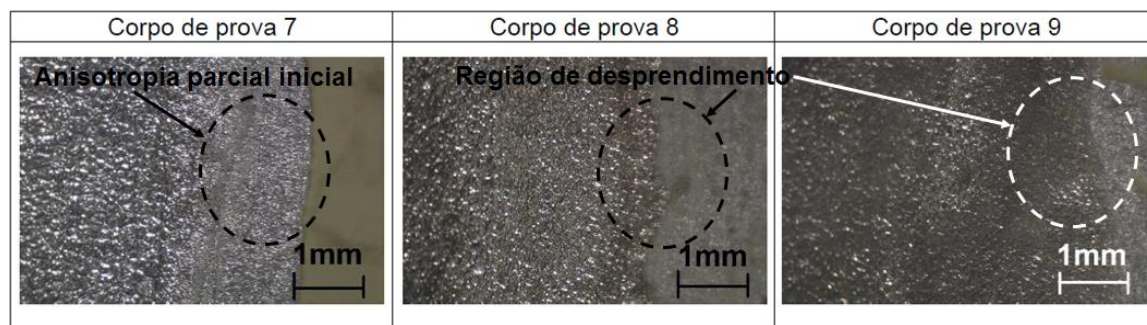
Pode-se observar que aconteceu o desprendimento parcial da máscara nos 3 corpos de prova. Os corpos de prova 8 e 9 apresentaram algumas erosões circulares, sendo que a forma geométrica usinada foi descaracterizada.

O melhor resultado para este grupo foi o corpo de prova 7, cuja temperatura de 25°C foi a menor quando comparada com os demais deste grupo. Não foram constatadas erosões circulares nos limites da forma geométrica usinada, conforme mostra a Figura 41.

A Figura 42 apresenta o acabamento superficial com maiores detalhes da área usinada delimitada pela máscara do Grupo 03. Visualmente estes apresentaram acabamento superficial de menor qualidade, quando comparados

com o Grupo 02. Todos corpos de prova do grupo apresentaram usinagem do tipo parcialmente anisotrópica, que não é satisfatória. Pode-se observar ainda que aconteceu o desprendimento da máscara nos corpos de prova 8 e 9.

Figura 42 – Detalhes das micrografias do Grupo 03



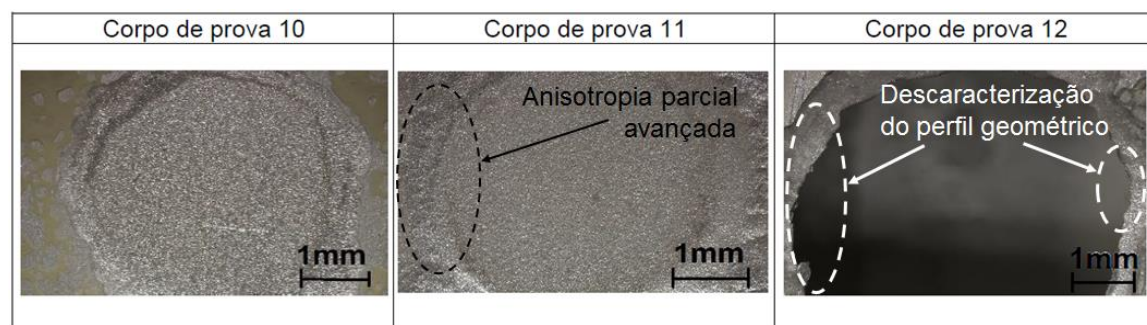
Fonte: autor (2017)

4.1.4 Grupo 04

Conforme mostra a Figura 43, o Grupo 04 resultou em usinagens do tipo parcialmente anisotrópicas, com uma grande área usinada entre a máscara e o substrato, semelhante ao resultado do Grupo 03.

Os corpos de prova 11 e 12 apresentaram desprendimento total da máscara e descaracterização nos limites do perfil usinado, que resultou em aparência não satisfatória. O corpo de prova 12 teve o substrato completamente removido, conforme pode-se observar na Figura 43.

Figura 43 – Micrografias do Grupo 04



Fonte: autor (2017)

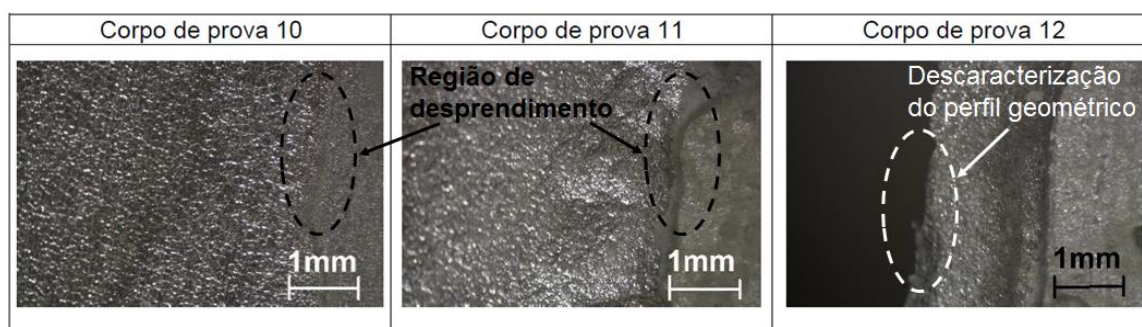
O melhor resultado do Grupo 04 foi o corpo de prova 10, cuja temperatura selecionada foi a menor comparada com os demais deste grupo, 25°C. Neste

corpo de prova houve desprendimento parcial da máscara, e não foram constatadas erosões circulares nos limites da forma geométrica usinada. A usinagem foi do tipo parcialmente anisotrópica.

A Figura 44 apresenta o acabamento superficial com maiores detalhes da área usinada delimitada pela máscara do Grupo 04. O corpo de prova 12 teve o substrato completamente removido pela usinagem química. Pode-se observar que os corpos de prova 11 e 12 tiveram descaracterização da forma nos limites do perfil usinado.

Em todas amostras deste grupo, a usinagem do tipo parcialmente anisotrópica aconteceu em uma grande área. Isto não é esperado pois descaracteriza a forma do perfil usinado.

Figura 44 – Detalhes das micrografias do Grupo 04



Fonte: autor (2017)

Em termos gerais o Grupo 03 apresentou melhores resultados quando comparada com o Grupo 04. Isto se deve ao fato da concentração de reagente ter sido 0,25 molar menor no Grupo 03.

4.2 AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

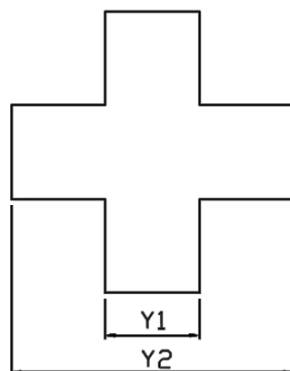
Os valores das dimensões dos perfis geométricos usinados foram calculados utilizando-se dados do capítulo 3. Para isto, foram feitas as médias de cada dimensão mensurada, conforme metodologias específicas de medição apresentadas naquele capítulo.

Conforme mostra a Figura 45, as dimensões utilizadas da cruz são a média dos valores medidos da lateral (Y1) e as médias dos valores medidos do comprimento total (Y2). Já a dimensão utilizada do círculo foi a média de seus

diâmetros medidos.

As dimensões nominais (de projeto) da cruz são $Y1 = 5\text{mm}$ e $Y2 = 15\text{mm}$. Já o diâmetro nominal do círculo é 14mm .

Figura 45 - Dimensões medidas da cruz



Fonte: autor (2017)

A Tabela 2 apresenta uma compilação das dimensões dos perfis geométricos medidos, onde a variação dimensional do perfil usinado é apresentado pela letra grega Δ . Pode-se observar que quanto maiores são os parâmetros de usinagem selecionados, maior é a variação dimensional dos perfis geométricos.

Tabela 2 – Avaliação da precisão dimensional

Identificação	Grupo	Médias das dimensões após a usinagem química					
		Cruz				Círculo	
		Y1 (mm)	$\Delta Y1$ (mm)	Y2 (mm)	$\Delta Y2$ (mm)	Diâmetro (mm)	Δ Diâmetro (mm)
Corpo de prova 1	01	8,069	3,069	17,772	2,772	15,761	1,761
Corpo de prova 2		7,279	2,279	16,996	1,996	15,716	1,716
Corpo de prova 3		9,952	4,952	18,935	3,935	19,255	5,255
Corpo de prova 4	02	5,354	0,354	15,64	0,64	14,888	0,888
Corpo de prova 5		5,041	0,041	14,997	-0,003	14,083	0,083
Corpo de prova 6		5,389	0,389	15,284	0,284	15,078	1,078
Corpo de prova 7	03	6,532	1,532	16,136	1,136	15,662	1,662
Corpo de prova 8		6,181	1,181	15,715	0,715	16,258	2,258
Corpo de prova 9		9,624	4,624	19,235	4,235	17,695	3,695
Corpo de prova 10	04	6,271	1,271	16,018	1,018	15,372	1,372
Corpo de prova 11		7,659	2,659	16,936	1,936	17,588	3,588
Corpo de prova 12		7,877	2,877	17,422	2,422	18,8	4,8

Fonte: autor (2017)

Conforme apresenta a Tabela 2, o Grupo 01 apresentou as maiores variações dimensionais no corpo de prova 3. O corpo de prova 3 apresentou os

maiores desvios chegando a $\Delta Y1$ 4,952mm, $\Delta Y2$ 3,935mm e Δ Diâmetro de 5,255mm. Estes foram em média os valores mais altos quando comparados com os demais grupos. O corpo de prova 1 também apresentou altos valores de variação dimensional, sendo $\Delta Y1$ 3,069mm $\Delta Y2$ 2,772mm e Δ Diâmetro de 1,761mm.

O corpo de prova 5 apresentou os melhores resultados quando comparado com todos os demais, sendo os valores de variação dimensional de $\Delta Y1$ 0,041mm $\Delta Y2$ -0,003mm e Δ Diâmetro de 0,083mm. Percebe-se que uma temperatura da reação de 60°C gerou uma menor variação dimensional quando comparado ao corpo de prova 4 e 6, usinados à temperatura ambiente e a 90°C respectivamente.

Observa-se na Tabela 2 que o Grupo 02 apresentou os resultados mais satisfatórios, pois as menores variações dimensionais foram observadas neste grupo. O corpo de prova 4, por sua vez, apresentou valores de variação dimensional de $\Delta Y1$ 0,354mm $\Delta Y2$ 0,64mm e Δ Diâmetro de 0,888mm.

Devido a uma seleção incorreta de parâmetros, como concentração excessiva de reagente e temperatura da reação, os demais grupos apresentaram variações dimensionais insatisfatórias. Isto porque os defeitos superficiais descritos no item 4.1 acabam por causar grandes variações dimensionais no perfil geométrico usinado.

Conforme apresenta a Tabela 2, os Grupos 03 e 04 apresentaram grande variação dimensional do perfil usinado. Dentre os corpos de prova destes grupos, aquele com maiores variações dimensionais foi o corpo de prova 9, com valores de $\Delta Y1$ 4,624mm $\Delta Y2$ 4,235mm e Δ Diâmetro de 3,695mm.

Já o corpo de prova 8 apresentou os menores valores em média quando comparados com os demais dos outros grupos. Os valores de variação foram de $\Delta Y1$ 1,181mm $\Delta Y2$ 0,715mm e Δ Diâmetro de 2,258mm.

4.3 AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z . Estes valores foram medidos nos corpos de prova usinados.

Tabela 3 – Parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz

Identificação	Grupo	Parâmetros de rugosidade (μm)		
		Ra	Rt	Rz
Corpo de prova 1	01	1,835	14,23	10,335
Corpo de prova 2		Vazado	Vazado	Vazado
Corpo de prova 3		Vazado	Vazado	Vazado
Corpo de prova 4	02	1,892	12,84	10,532
Corpo de prova 5		1,862	12,163	10,157
Corpo de prova 6		2,136	18,603	13,136
Corpo de prova 7	03	1,371	10,58	7,854
Corpo de prova 8		1,593	11,687	9,036
Corpo de prova 9		1,692	12,76	9,975
Corpo de prova 10	04	1,245	8,2	6,979
Corpo de prova 11		1,722	11,583	9,193
Corpo de prova 12		Vazado	Vazado	Vazado

Fonte: autor (2017)

A peça bruta antes da usinagem, também teve seus valores de rugosidade medidos. Estes valores foram de Ra 0,825 μm , Rt 6,807 μm e Rz 5,145 μm .

A Tabela 3 apresenta em determinados corpos de prova o valor “Vazado”. Isto representa aqueles corpos de prova onde não foi possível realizar medições, pois tiveram o substrato completamente removido pela usinagem química.

De acordo com a Tabela 3, o Grupo 01 pode ter os valores de rugosidade analisados apenas no corpo de prova 1, pois os corpos de prova 2 e 3 tiveram o substrato completamente removido. Os valores de rugosidade do corpo de prova 1, portanto, foram de Ra 1,835 μm , Rt 14,23 μm e Rz 10,335 μm .

O Grupo 02 apresenta os maiores valores de rugosidade Ra 2,136 μm , Rt 18,603 μm e Rz 13,136 μm no corpo de prova 6. Estes são os maiores valores entre todos os grupos.

Já os menores valores de rugosidade do Grupo 02 foram Ra 1,862 μm , Rt 12,163 μm e Rz 10,157 μm . Estes valores foram os do corpo de prova 05, usinado com concentração de 1,5 molar de NaOH e temperatura da reação de 60°C.

De acordo com a Tabela 3, o Grupo 03 apresenta os maiores valores de rugosidade Ra 1,692 μm , Rt 12,76 μm e Rz 9,975 μm no corpo de prova 9. Já os menores valores de rugosidade deste grupo foram Ra 1,371 μm , Rt 10,58 μm e Rz 7,854 μm . Estes valores foram os do corpo de prova 7, usinado com concentração de 1,75 molar de NaOH e temperatura da reação de 25°C.

Relativo ao Grupo 04, observa-se que o corpo de prova 11 apresenta os maiores valores de rugosidade Ra 1,722 μm , Rt 11,583 μm e Rz 9,193 μm . Já os

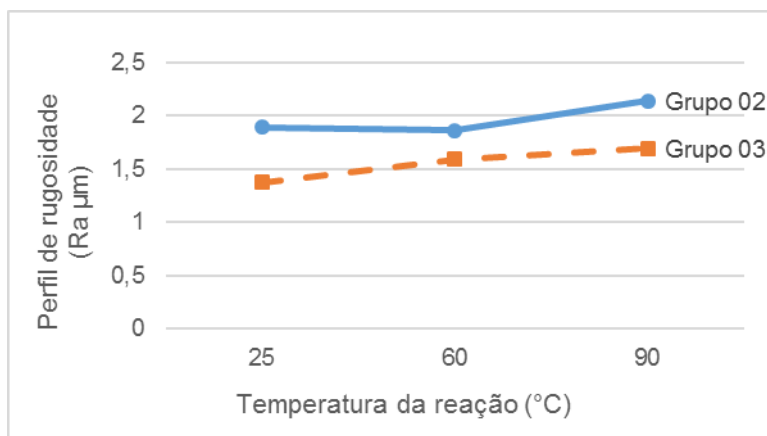
menores valores de rugosidade não apenas deste grupo, mas também quando comparado com todos os demais foram Ra 1,245 μ m, Rt 8,2 μ m e Rz 6,979 μ m, do corpo de prova 10.

O corpo de prova 10 foi usinado com concentração de 2 molar de NaOH e temperatura da reação de 25°C. O corpo de prova 12 não teve seus valores de rugosidade medidos, pois o substrato foi completamente removido. Foram os valores de rugosidade mais baixos quando comparados com os demais grupos. Evidencia-se que uma maior temperatura da reação gera maiores valores de rugosidade, porém uma maior concentração do reagente tende a gerar menores valores de rugosidade.

4.3.1 Avaliação estatística da rugosidade

A Figura 46 apresenta uma correlação do parâmetro Ra para os Grupos 02 e 03. Pode-se observar que quanto maior a temperatura da reação, maior é o valor de rugosidade Ra. Pode-se observar, entretanto, que para o Grupo 02 foi gerada uma rugosidade menor com uma temperatura de 60°C, quando comparada àquela gerada por uma temperatura de 25°C. Este fenômeno também foi constatado no trabalho de Çakir (2008).

Figura 46 – Correlação da rugosidade Ra para os Grupos 02 e 03

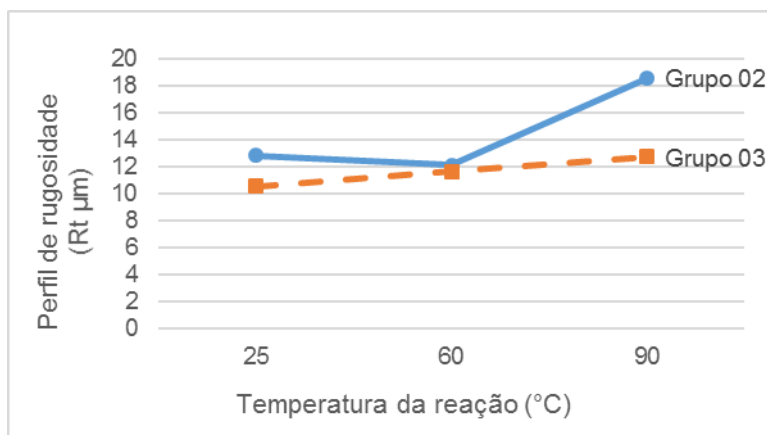


Fonte: autor (2017)

A Figura 47 apresenta uma correlação do parâmetro Rt para os Grupos 02 e 03. De maneira similar ao observado no parâmetro Ra, quanto maior a temperatura da reação maior o valor da rugosidade Rt gerado. Observa-se ainda

que para o Grupo 02 a temperatura de 60°C gerou valores de rugosidade menores do que quando comparado com àqueles gerados à temperatura ambiente.

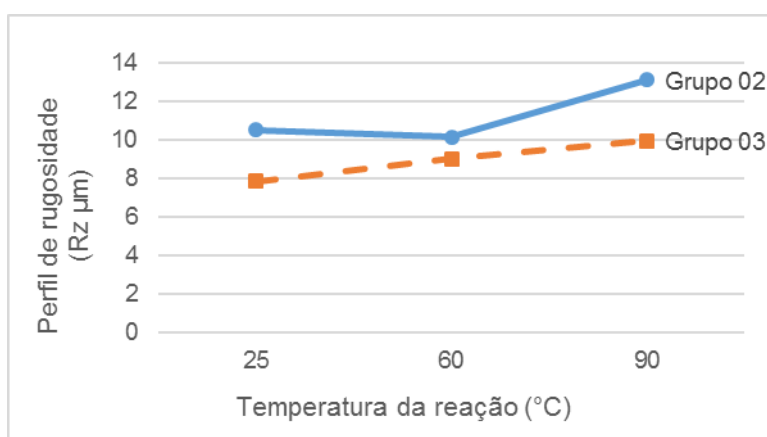
Figura 47 – Correlação da rugosidade Rt para os Grupos 02 e 03



Fonte: autor (2017)

A Figura 48 apresenta uma correlação do parâmetro Rz para os Grupos 02 e 03. De maneira semelhante ao observado no parâmetro Ra e Rt, quanto maior a temperatura da reação maior o valor da rugosidade Rz gerado. Observa-se ainda que para o Grupo 02 a temperatura de 60°C gerou valores de rugosidade menores do que quando comparado com àqueles gerados à temperatura ambiente.

Figura 48 – Correlação da rugosidade Rz para os Grupos 02 e 03



Fonte: autor (2017)

Comparando os valores de rugosidade Ra, Rt e Rz para os Grupo 02 e 03, percebe-se que uma menor concentração de reagente gera um perfil de

rugosidade de menor qualidade. Percebe-se também que o Grupo 02 gerou um valor de rugosidade menor a uma temperatura de 60°C para os 3 parâmetros avaliados.

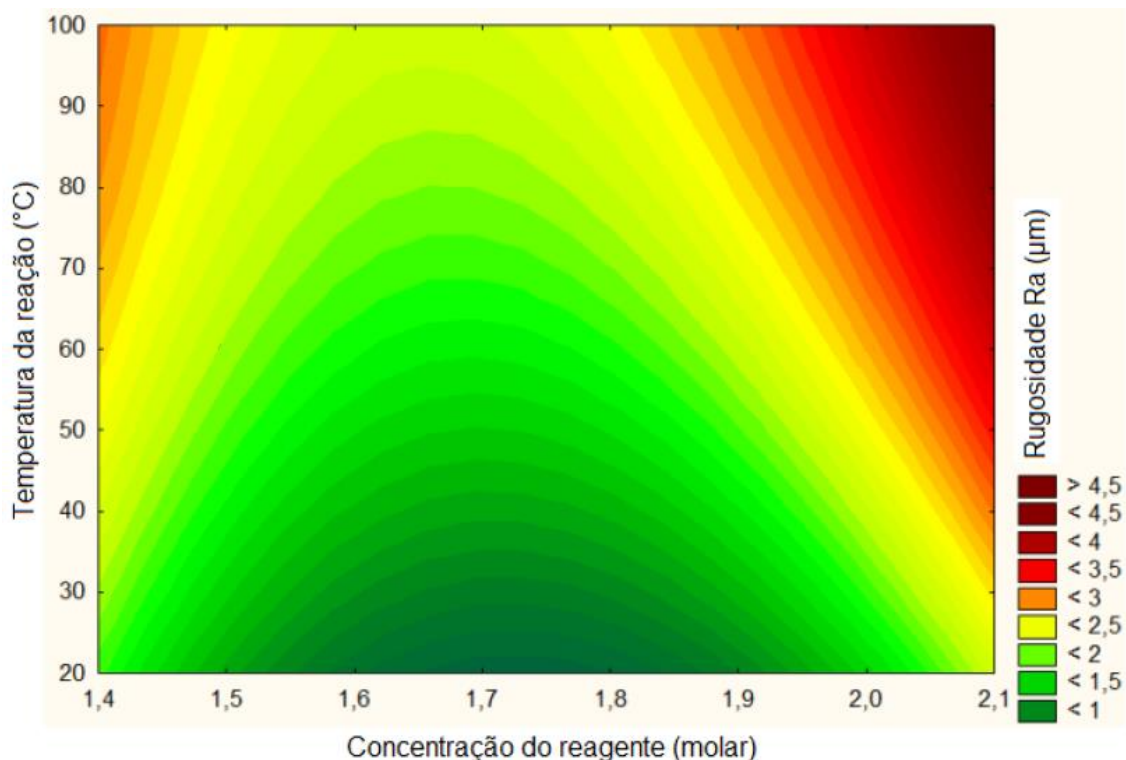
De maneira similar ao que aconteceu neste trabalho, utilizando o hidróxido de sódio, a usinagem química do alumínio com cloreto de ferro a uma temperatura maior que a ambiente em determinada concentração, gerou um valor de rugosidade Ra de rugosidade de melhor qualidade. Enquanto uma temperatura ainda maior voltou a gerar altos valores de rugosidade. Este fenômeno também foi observado nos estudos de Çakir (2008).

A Figura 49 apresenta um gráfico de contorno que relaciona a temperatura da reação (°C) e a concentração do reagente NaOH (molar). Para gerar este gráfico, foi utilizado o software *Statística*, e a entrada de dados foi realizada de acordo com os principais resultados apresentados nas Tabelas 1 até 5.

Desta forma foram gerados 9 pontos que representam a variação dos parâmetros de usinagem. Enquanto os valores de rugosidade Ra mais relevantes para estes pontos, possibilitaram a análise estatística da rugosidade gerada pelo processo.

Pode-se observar que existe uma tendência do fenômeno do baixo valor de rugosidade Ra a uma temperatura de 60°C. Isto significa uma otimização da rugosidade ocorre entre 1,5 e 1,9 molar, considerando uma temperatura de 60°C.

Figura 49 – Gráfico de contorno para a variável resposta – rugosidade Ra (μm)



Fonte: autor (2017)

De acordo com a Figura 49, concentrações de NaOH superiores a 1,9 molar e temperaturas superiores a 60 $^{\circ}\text{C}$ podem comprometer a qualidade do valor de rugosidade Ra gerado. De acordo com a análise de variância, a condição ideal para baixos valores de rugosidade Ra gerados pela usinagem química é realizada com concentração 1,75 molar de NaOH à uma temperatura próxima a 25 $^{\circ}\text{C}$.

Dependendo dos parâmetros de usinagem selecionados, a reação química utilizada no processo da usinagem química pode gerar defeitos superficiais. Conforme comentado anteriormente, uma maior concentração ideal de reagente tende a gerar menos defeitos superficiais.

Os defeitos superficiais gerados pelo processo de usinagem química na superfície do substrato podem ser descontinuidades do padrão ou erosões circulares. Quando o processo é analisado sob a ótica da reação química que ocorre, existe uma série de condições adversas que podem ocorrer, todas potencializadas por uma maior temperatura da reação.

Falhas na microestrutura do substrato provenientes do processo de fabricação, por exemplo, podem ocasionar uma reação química acelerada em determinada área. Isso ocorre quando os elementos de liga do alumínio, como o

cobre, eventualmente se concentram mais em uma área específica do substrato do que nas demais. A diferença de reatividade dos diferentes metais faz com que a velocidade e intensidade da reação química sejam diferentes.

4.4 TAXA DE REMOÇÃO

A espessura da peça bruta medida antes do processo de usinagem química foi de 0,95mm. Quando não há desprendimento da máscara, espera-se que esta dimensão seja a mesma das regiões cobertas pela máscara após o processo de usinagem química.

A Tabela 4 apresenta as espessuras das áreas usinadas e da região coberta pela máscara após o processo de usinagem química. Observa-se que apenas os corpos de prova 4 e 5 mantiveram a mesma espessura da região coberta pela máscara após a usinagem química em relação à espessura da peça bruta antes do processo.

Tabela 4 – Espessura após a usinagem química

Identificação	Grupo	Espessura após a usinagem química		
		Cruz (mm)	Círculo (mm)	Região coberta pela máscara (mm)
Corpo de prova 1	01	0,528	0,528	0,74
Corpo de prova 2		Vazada	Vazada	0,383
Corpo de prova 3		Vazada	Vazada	0,043
Corpo de prova 4	02	0,826	0,825	0,95
Corpo de prova 5		0,814	0,814	0,95
Corpo de prova 6		0,798	0,7984	0,94
Corpo de prova 7	03	0,84	0,839	0,9
Corpo de prova 8		0,539	0,54	0,767
Corpo de prova 9		0,373	0,362	0,737
Corpo de prova 10	04	0,804	0,813	0,89
Corpo de prova 11		0,19	0,187	0,59
Corpo de prova 12		Vazada	Vazada	0,553

Fonte: autor (2017)

Percebe-se que quanto maiores os parâmetros concentração de reagente, temperatura da reação e tempo de reação, menor é a espessura resultante após a usinagem química. É importante ressaltar que nos Grupos 01, 03 e 04 assim como no Corpo de prova 6 houve desprendimento da máscara interna e externamente.

A consequência do desprendimento da máscara foi a corrosão do

substrato, caracterizando usinagem química também na região coberta pela máscara. Devido a isso a espessura da região coberta pela máscara após a usinagem química ficou menor que a espessura bruta da peça antes do processo. Como consequência disto, os valores resultantes da espessura removida e taxa de remoção serão maiores nos corpos de prova onde houve desprendimento da máscara.

Os parâmetros de usinagem selecionados (concentração do reagente, temperatura da reação e tempo de reação) interferem de maneiras distintas nos resultados. No que diz respeito à espessura removida, quanto maiores os valores dos parâmetros de usinagem selecionados, maior será seu valor resultante.

Entretanto, a taxa de remoção depende apenas dos parâmetros concentração do reagente e temperatura da reação. Sendo que uma maior taxa de remoção que resultará em uma maior espessura removida, após decorrido determinado tempo.

A expressão para cálculo da taxa de remoção foi apresentada no item 2.1.4. Como houveram variações entre o valor da espessura da cruz usinada e do círculo usinado, foi necessário calcular a média da espessura entre as duas áreas.

Os valores de taxa de remoção resultantes são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Espessura removida e taxa de remoção

Identificação	Grupo	Espessura removida (µm)	Taxa de remoção (nm/min)
Corpo de prova 1	1	422	7,033
Corpo de prova 2		>950	>16
Corpo de prova 3		>950	>16
Corpo de prova 4	2	125	1,033
Corpo de prova 5		136	1,133
Corpo de prova 6		152	1,267
Corpo de prova 7	3	110	0,917
Corpo de prova 8		410	3,425
Corpo de prova 9		583	4,858
Corpo de prova 10	4	141	1,183
Corpo de prova 11		761	6,342
Corpo de prova 12		>950	>8

Fonte: autor (2017)

O Grupo 01 apresentou os maiores valores tanto de espessura removida quanto da taxa de remoção. Percebe-se que nos corpos de prova 2 e 3, o valor da espessura removida foi superior à 950µm e da taxa de remoção superior a

16nm/min, porque a usinagem química cortou o substrato antes do tempo de reação estipulado ser alcançado, isto se deve ao fato das concentrações de reagente selecionadas serem as mais altas quando comparadas àquelas dos demais grupos.

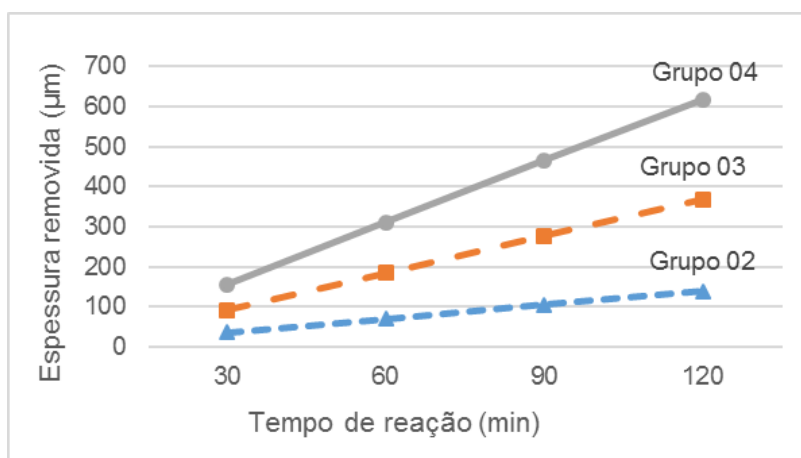
Uma situação semelhante aconteceu com o corpo de prova 12, que também teve seu substrato completamente removido pela usinagem química. Nota-se que apesar dos corpos de prova 1, 2 e 3 terem uma concentração de reagente maior que o corpo de prova 12, um maior tempo de reação foi determinante para se atingir uma maior espessura de remoção.

Já o Grupo 02, que apresentou as melhores condições dimensionais e de acabamento, teve as menores espessuras removidas e taxas de remoção. O corpo de prova 4 resultou em espessura removida de 125 μ m e uma taxa de remoção de 1,033nm/min. Isso se deve ao fato da concentração de reagente ter sido a menor neste grupo quando comparado com os demais.

Uma concentração de reagente menor que 1,5 molar, que foi utilizada no Grupo 02, tornaria o processo de usinagem química improdutivo. Isto se deve ao fato de que os valores resultantes de espessura removida e taxa de remoção seriam muito baixos.

A Figura 50 apresenta uma correlação entre a espessura removida e o tempo de reação para os Grupos 02, 03 e 04. Pode-se observar que quanto maior o tempo de reação, maior é a espessura removida. Para gerar este gráfico foram utilizados as médias da espessura removida dos materiais de cada grupo.

Figura 50 – Correlação entre espessura removida em relação ao tempo de reação

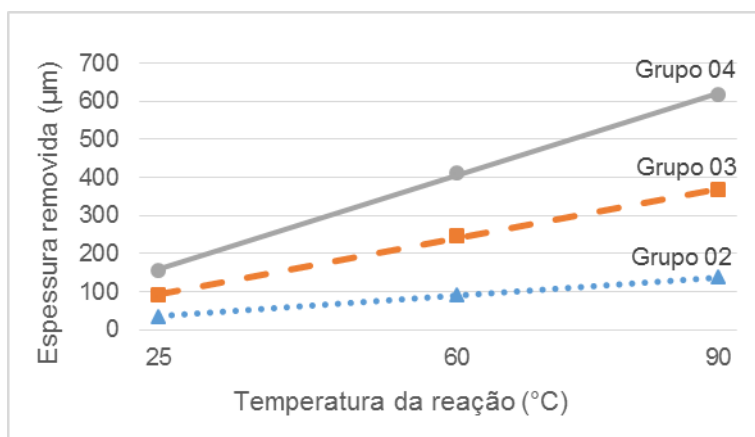


Fonte: autor (2017)

Pode-se observar que a linha de tendência possui uma menor inclinação no Grupo 02, e mais acentuada no Grupo 04. A concentração do reagente é o fator determinante para a inclinação desta linha. Quanto maior for a concentração, mais inclinada será a reta, pois maior será a taxa de remoção.

A Figura 51 apresenta uma correlação entre a espessura removida em relação à temperatura da reação, pode-se observar que quanto maior a temperatura da reação, maior é a espessura removida. Para gerar este gráfico foram utilizados as médias da remoção dos materiais de cada grupo. Novamente, a linha de tendência é menos acentuada no Grupo 02, e mais acentuada no Grupo 04. A concentração do reagente é o fator determinante para a inclinação desta linha de tendência.

Figura 51 – Correlação entre espessura removida em relação à temperatura da reação



Fonte: autor (2017)

Os dados provenientes dos resultados analisados de maneira conjunta, mostram que para se obter maiores valores da taxa de remoção, maior devem ser os parâmetros selecionados. Entretanto, para que seja produzida uma qualidade satisfatória da dimensão do perfil geométrico usinado e acabamento superficial, estes parâmetros não podem ser demasiadamente altos. Deve haver um equilíbrio entre os parâmetros de usinagem para que a qualidade da usinagem como um todo seja satisfatória.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, o processo de usinagem química foi desenvolvido para usinar alumínio com um reagente eficiente e de baixo custo. Através da variação de parâmetros de usinagem, obtiveram-se diferentes resultados, os quais foram analisados maneira independente. Todavia, é a relação entre eles que apresenta qual a seleção dos parâmetros de usinagem é a mais satisfatória.

Uma seleção de parâmetros de usinagem satisfatórios não deve gerar desprendimento da máscara, nem a formação de erosões circulares. É importante que se realize um estudo da variação de parâmetros em um processo de usinagem química, pois somente assim será possível determinar quais parâmetros geram melhores resultados.

Neste trabalho, foi desenvolvido o processo de usinagem química, variando os parâmetros de usinagem concentração de reagente, temperatura da reação e tempo de reação. O reagente utilizado foi o NaOH.

Foi constatado que havendo o desprendimento da máscara, ocorrerão erosões circulares e usinagem de áreas que não deveriam ser usinadas. Como consequência, o perfil geométrico poderá sofrer variações dimensionais em relação aos valores estipulados em projeto.

Após o processo de usinagem química, o perfil geométrico usinado deve apresentar pouca variação dimensional e um aspecto satisfatório. Estas duas características dependem de como a máscara se comportou durante o processo.

A avaliação das micrografias e medições dimensionais do perfil geométrico usinado constataram que a seleção de parâmetros mais satisfatória é dada na seguinte condição: concentração do reagente 1,5 molar de NaOH, temperatura da reação 60°C e tempo de reação 2h.

A taxa de remoção é diretamente proporcional à seleção dos parâmetros de usinagem. Entretanto, a seleção de parâmetros de usinagem com maiores valores pode comprometer o acabamento da peça usinada.

A avaliação da rugosidade evidenciou que maiores temperaturas geram um acabamento do perfil geométrico de menor qualidade, mas não necessariamente geram um acabamento superficial inutilizável. Todavia quanto maior a concentração do reagente, a tendência é que o perfil de rugosidade gerado seja de maior qualidade.

Conclui-se que o reagente NaOH e a máscara de tinta anticorrosiva podem ser utilizados para realizar a usinagem química, pois com a utilização destes é possível obter-se resultados satisfatórios.

Os resultados deste trabalho comprovaram que é viável realizar a usinagem química em um tubo quadrado de alumínio. Isto se dá através da utilização do hidróxido de sódio (NaOH) como reagente e da aplicação de uma tinta anticorrosiva como máscara.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as oportunidades de estudo futuro, destacam-se a análise de outras variáveis que podem ser variadas, como por exemplo qual posição da peça durante a reação química é mais eficiente.

Ainda, pode-se avaliar se a movimentação do reagente durante a reação química gera melhores resultados. O tipo de máscara aplicada também pode ser variado, com o objetivo de se constatar qual pode ser o mais eficiente para este processo.

AGRADECIMENTO

Presto meus sinceros agradecimentos a:

- Professor orientador Cassiano Rodrigues Moura, que foi muito competente, prestativo e paciente;
- Professores Elder Correa Leopoldino e Giovani Pakuszewski;
- Monitores Douglas Kivatkowsky Junior e Nathalia Eger Junckes;
- WEG Tintas, por ter doado a amostra da tinta WEGPoxi 3082.

REFERÊNCIAS

Chemical etching of aluminum. Çakir, O. et al. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier. 2008. Páginas 337-340.

Chemical etching of Cu-ETP copper. Çakir, O. et al. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier. 2005. Páginas 275-279.

Chemical Machining, Metals Handbook, vol. 3, Machining, 8th ed., American Society for Metals, Metals Park, OH. Páginas 240–248.

Chemical machining of Al 2025, M. Dehghanpur, M.Sc. Thesis, IUT, 2001.

Chemical Milling Nontraditional Machining Process, M. Langworthy, Machining ASM Handbook, 1994.

Chemical Milling Solution Produces Smooth Surface Finish on Aluminum. Lorenzen, H. C. 1966. NASA Tech Brief.

Chemical Milling of Metals and Alloys. Ketcham, S. J. 1961. Defense Technical Information Center.

Chemical Milling (Deep Contour Etching). Tarasova, V. A. 1968. Defense Technical Information Center.

Effect of Chemical Milling on Low-Cycle Fatigue Behavior of an Al-Mg-Si Alloy. Spear et al. 2013. Corrosion Science. Elsevier. Páginas 144-153.

Effect of process parameters on the surface morphology and mechanical performance of silicon structures after deep reactive ion etching (DRIE). Chen, et al. Volume 11. New York, NY, ETATS-UNIS: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002.

Electropolishing. Metal Finishing. Elsevier. 1996. Página 20.

Electrolytically Metallizing or Etching. Metal Finishing. Elsevier. 1999. Página 102.

Etching of Aluminum Alloys by Ferric Ion. Metal Finishing. Elsevier. 2002. Página 26.

Etch Rates for Micromachining Processing - Part II. Williams, Kirt R. Journal of Microelectromechanical Systems. Vol. 12, No 6. 2003.

Etching, Electrolytic Etching and Electropolishing. Metal Finishing. Elsevier. 1997. Página 18.

Etching of Aluminum-Copper Layers. Metal Finishing. Elsevier. 1999. Página 110.

Etch it. www.etchitmn.com. Etchit. Buffalo, MN, EUA. Acessado em 15/02/2017.

Folha de dados da tinta WEGPoxi 3082. WEG Tintas. Brasil. 2017.

Fundamentos e Aplicações do Alumínio. Vários autores. Editora Abal. 2007.

Handbook of Metal Etchants. Walker, Perrin. Tarn, William H. CRC Press. 1991.

Improvement of Analytical Procedures for the Determination of Components in Etching Solutions. Persists, V. Metal Finishing. Elsevier. 2010. Páginas 19-20.

Manufacturing Processes, Chemical Milling, H.W. Yankee, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979, Chapter 22, pp. 228–302.

Norma **ASTM** **E407.** [https://compass-astm.ez130.periodicos.capes.gov.br/EDIT/html_annot.cgi?E407+07\(2015\)e1](https://compass-astm.ez130.periodicos.capes.gov.br/EDIT/html_annot.cgi?E407+07(2015)e1).
Acessado em 01/03/2017.

Norma **ASTM** **E340.** <https://compass->

astm.ez130.periodicos.capes.gov.br/EDIT/html_annot.cgi?E340+15. Acessado em 01/03/2017.

Norma ASTM D1193. https://compass-astm.ez130.periodicos.capes.gov.br/EDIT/html_annot.cgi?D1193+10. Acessado em 01/03/2017.

Patente US2933675. <https://www.google.com/patents/US2933675>. Chemical milling control. Acessado em 10/02/2017.

Patente US2981610. <https://www.google.com/patents/US2981610>. Chemical milling process and composition. Acessado em 10/02/2017.

Patente US2890944. <https://www.google.com/patents/US2890944>. Continuous chemical milling process. Acessado em 10/02/2017.

Pintura Anticorrosiva dos Metais. Paulo Furtado. Editora LTC. 2009.

Process Control for Aerospace Chemical Milling Process. Torng et al. 2009. International Journal of Manufacturing Technology and Management. Inderscience.

Pros and Cons of Alkaline vs. Acid Etching of Aluminum. Chandler, Wayne. Metal Finishing. 2008. Páginas 15-16.

Restoration of obliterated engraved marks on steel surfaces by chemical etching reagent. Song, Qingfang. Forensic Science International. 2015. Páginas 33-36.

Superhydrophobic aluminum alloy surfaces prepared by chemical etching process and their corrosion resistance properties. Huang et al. Applied Surface Science. Elsevier. 2015. Páginas 1012-1024.

Técnicas Experimentais em Química: Normas e Procedimentos. Fiorotto,

Nilton Roberto. Editora Erica. Edição 1. 2014.

The Principles and Practice of Photochemical Machining and Photoetching.

Allen, D. M. (1986). Adam Hilger/IOP, UK.

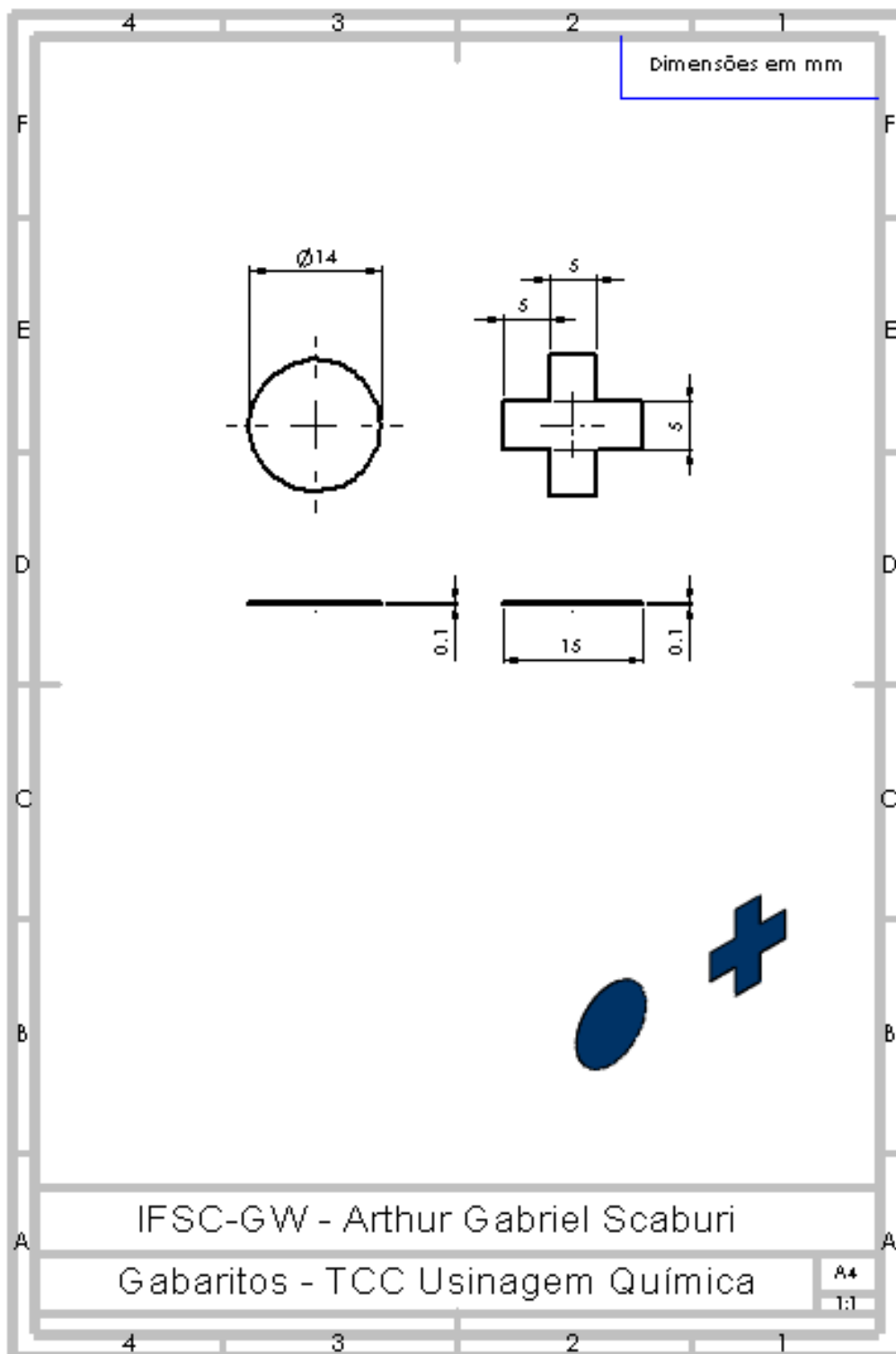
Uniform and Graded Chemical Milling of Aluminum Foams. Matsumoto et al.

2007. Materials Science and Engineering. Elsevier. Páginas 150-157.

Wet and Dry Etching. Nayak et al. University of California. 2009.

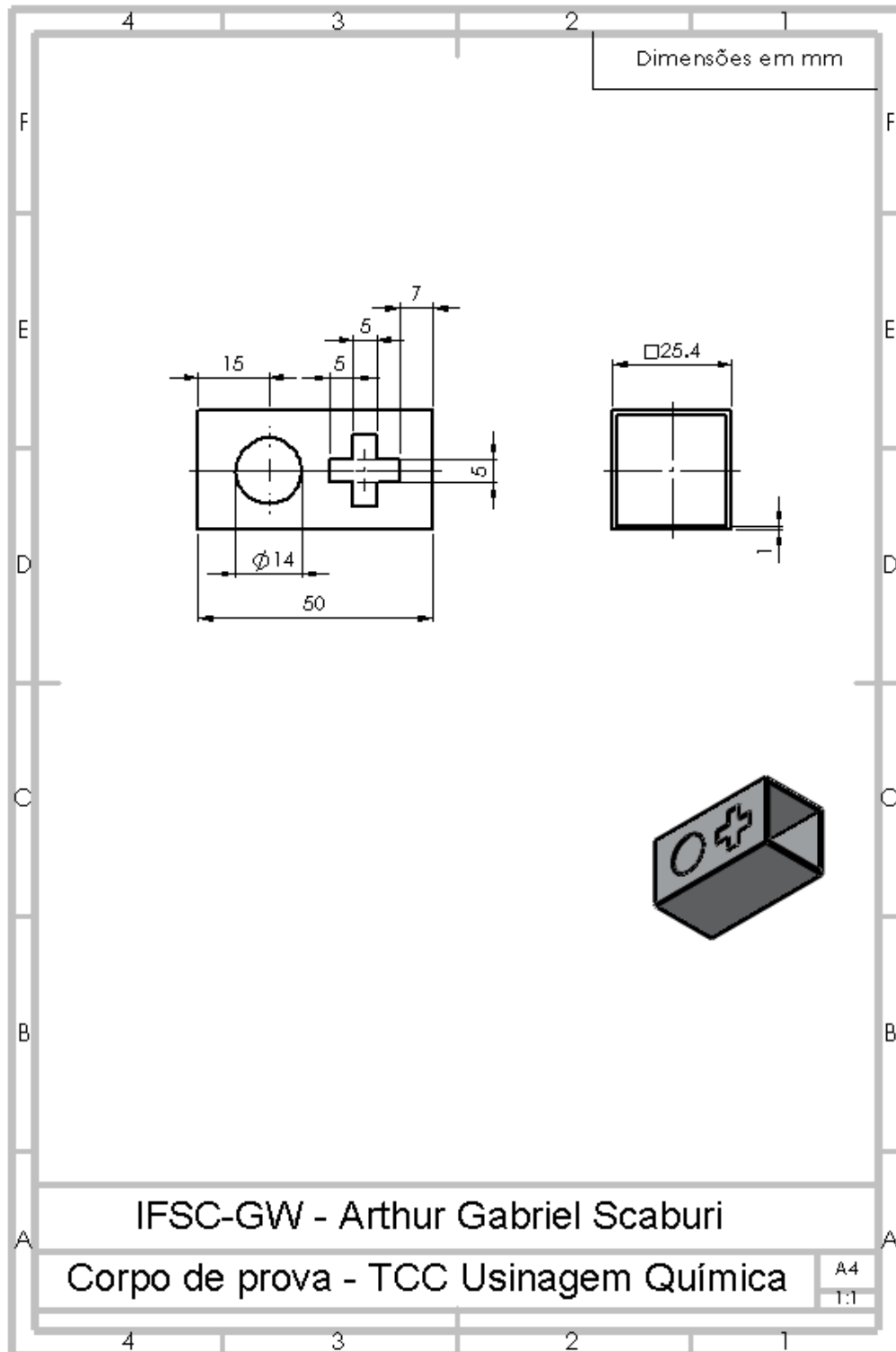
APÊNDICE

Figura 52 - Desenho dimensional dos gabaritos



Fonte: autor (2017)

Figura 53 - Desenho dimensional do corpo de prova



Fonte: autor (2017)