

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE METALIZAÇÃO SUPERFICIAL
APLICADO À PEÇAS OBTIDAS POR ESTEREOLITOGRAFIA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALEXANDRE VILAS BOAS BADOTTI

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 2003

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE METALIZAÇÃO SUPERFICIAL
APLICADO À PEÇAS OBTIDAS POR ESTEREOLITOGRAFIA**

ALEXANDRE VILAS BOAS BADOTTI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
FABRICAÇÃO, APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng. – Orientador

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do POSMEC

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng. - Presidente

Prof. Paulo Antônio Pereira Wendhausen, Dr. Ing.

Prof. André Avelino Pasa, Dr. (FSC/UFSC)

Prof. Valderes Drago, Dr. (FSC/UFSC)

Meus sinceros agradecimentos aos meus pais e meu irmão pela compreensão, ajuda e constante estímulo, aos professores Ahrens, André Pasa e Valderes Drago que sempre se mostraram dispostos para ajudar, ao Ênio pela ajuda nos diversos ensaios, aos meus amigos e a minha namorada Vanessa que tiveram paciência e companheirismo nas piores horas, à equipe do CIMJECT, ao pessoal da Boreal Tratamentos Superficiais, à empresa ATOTECH e a todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente para a realização desse estudo.

“A melhor maneira de prever o futuro é inventá-lo”

(Alan Kaye)

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	11
GLOSSÁRIO DE SIGLAS.....	17
RESUMO.....	18
ABSTRACT.....	19
1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1 ENFOQUE DO TRABALHO E OBJETIVOS.....	20
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	24
2.1.1 Estereolitografia.....	26
2.1.2 Acabamento Superficial em Peças Estereolitografadas.....	30
2.2 TECNOLOGIAS PARA METALIZAÇÃO.....	41
2.2.1 Pulverização Metálica.....	42
2.2.2 Eletrodeposição Metálica.....	47
2.2.3 Deposição Química.....	51
2.2.4 Pintura Metálica.....	53
2.2.5 Metalização a Vácuo.....	54

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DA METALIZAÇÃO SUPERFICIAL PARA ACABAMENTO EM MOLDES CONFECCIONADOS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	58
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL PRELIMINAR.....	62
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	62
3.2 OBJETIVOS.....	63
3.3. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS.....	63
4. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS COMPLEMENTARES.....	69
4.1 ESCOPO DA PESQUISA.....	69
4.2 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 1.....	69
4.2.1 Objetivos Específicos.....	69
4.2.2 Procedimentos.....	70
4.2.3 Deposição Química de Níquel.....	72
4.2.4 Eletrodeposição de Cobre e Níquel.....	79
4.3 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 2.....	86
4.3.1 Objetivos Específicos.....	86
4.3.2 Procedimentos.....	87
4.4 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 3.....	92
4.4.1 Objetivos Específicos.....	92
4.4.2 Procedimentos.....	93
4.5 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 4.....	94
4.5.1 Objetivos Específicos.....	94

4.5.2 Procedimentos.....	95
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS	
COMPLEMENTARES.....	98
5.1 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 1.....	98
5.1.1 Referentes ao Processo da Deposição Química de Níquel.....	98
5.1.2 Referentes à Etapa de Eletrodeposição.....	114
5.2 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 2.....	117
5.2.1 Deposição Química de Níquel.....	117
5.2.2 Eletrodeposição.....	119
5.2.3 Tempo de Metalização.....	124
5.3 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 3.....	126
5.3.1 Pintura Metálica.....	126
5.3.2 Eletrodeposição.....	127
5.3.3 Tempo de Metalização.....	130
5.4 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 4.....	132
5.4.1 Pintura Metálica.....	132
5.4.2 Eletrodeposição.....	132
5.5 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ÔHMICA.....	136

6. CONCLUSÃO.....	138
6.1 METALIZAÇÃO SUPERFICIAL APLICADO À PEÇAS OBTIDAS POR ESTEREOLITOGRAFIA.....	138
6.2 SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	141
7. BIBLIOGRAFIA.....	143
7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
7.2 BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das lixas com costado de papel [30].	31
Tabela 2 – Níveis de procedimentos de pós-processamento em peças obtidas pelo processo de estereolitografia da empresa Eagle Design & Technology [31].	33
Tabela 3 – Especificações sobre os grãos abrasivos mais utilizados para o processo de jateamento [adaptado de 37].	37
Tabela 4 – Classes da rugosidade média (R_a) e os desvios correspondentes [40].	41
Tabela 5 – Etapas da metalização superficial realizada na empresa Boreal.	65
Tabela 6 – Tempo utilizado pelas etapas do processo e o tempo total.	67
Tabela 7 – Acabamentos superficiais aplicados nos corpos de ensaio.	70
Tabela 8 – Etapas referentes à deposição química de níquel realizada no Laboratório de Efeito Mossbauer da UFSC [57].	72
Tabela 9 – Concentrações recomendadas para preparação da solução sulfo-crômica [57].	73
Tabela 10 – Produtos utilizados nas etapas de Neutralização e Pré-ativação [57].	74
Tabela 11 – Concentrações recomendadas para preparação da solução Ativador Noviganth AK I® [57].	75
Tabela 12 – Concentração recomendada para preparação da solução Ativador Noviganth AK II® [57].	76
Tabela 13 – Concentrações recomendadas para preparação da solução Noviganth AK® [57].	78
Tabela 14 – Concentrações recomendadas para preparação da solução CUPRACID 300® [57].	80
Tabela 15 – Concentrações recomendadas para preparação da solução Níquel Brilhante® [57].	82

Tabela 16 – Condições recomendadas de operação durante a eletrodeposição de cobre [57].	85
Tabela 17 – Condições recomendadas de operação durante a eletrodeposição de níquel [57].	85
Tabela 18 – Valores utilizados no processo da deposição química de níquel para o experimento complementar 2.	88
Tabela 19 – Parâmetros utilizados na eletrodeposição de cobre para o experimento complementar 2.	91
Tabela 20 – Parâmetros utilizados na eletrodeposição de níquel para o experimento complementar 2.	92
Tabela 21 – Características da tinta prata PC 200B da empresa Degussa [61].	93
Tabela 22 – Parâmetros utilizados para a eletrodeposição de cobre.	97
Tabela 23 – Valores de R_a medidos sobre os corpos de ensaio.	99
Tabela 24 – Valores de R_z medidos sobre os corpos de ensaio.	99
Tabela 25 – Acabamento superficial aplicado às duas amostras do segundo experimento complementar	118
Tabela 26 – Tempo utilizado pelas principais etapas do processo de metalização superficial sobre a amostra 01.	124
Tabela 27 – Tempo utilizado pelas principais etapas do processo de metalização superficial sobre a amostra 02.	124
Tabela 28 – Tempo utilizado pelas principais etapas do processo.	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Triangularização e fatiamento do modelo STL [23].	26
Figura 2 – 1) Construção de uma camada; 2) Descida da plataforma em direção ao eixo Z, 3) Recobrimento; 4) Regularização da camada; 5) Construção de mais uma camada, 6) Objeto pronto para ser retirado de dentro da máquina [24].	28
Figura 3 – Efeito escada.	29
Figura 4 – Erro de concavidade e convexidade.	29
Figura 5 – Peça obtida por estereolitografia (ao centro) e polida no nível 6 (Tabela 6) de procedimentos da Eagle Design & Technology [31].	35
Figura 6 – Típica pistola de jateamento [33].	36
Figura 7 – Exemplo de retificadora e acessórios utilizados para operações de acabamento na prototipagem rápida [38].	39
Figura 8 – Representação gráfica da rugosidade média (R_a) [40].	40
Figura 9 – Sistema de pulverização metálica por combustão denominado HVOF (“high velocity oxy/fuel spraying”) [45].	43
Figura 10 – Sistema de pulverização metálica por arco elétrico denominado EASP (“electric arc spraying”) [48].	45
Figura 11 – Sistema de pulverização metálica por plasma denominado PSP (“plasma spraying”) [43].	46
Figura 12 – Protótipo com revestimento metálico (à direita) após aplicação pelo processo da pulverização metálica por plasma [42].	47
Figura 13 – Esquema do mecanismo de eletrodeposição metálica [51].	49
Figura 14 – Peças em resina epóxi obtidas por estereolitografia sem recobrimento (esquerda) e com recobrimento por eletrodeposição de cobre (direita) [52].	51

Figura 15 – Peça em resina epóxi obtida pelo processo de estereolitografia com recobrimento por deposição química de níquel [50].	53
Figura 16 – Peças em resina epóxi obtidas pelo processo de estereolitografia sem recobrimento (direita) e com pintura metálica de prata (esquerda).	54
Figura 17 – Equipamento de metalização a vácuo por evaporação térmica [69].	56
Figura 18 – Equipamento de metalização a vácuo por bombardeio de átomos [69].	57
Figura 19 – Esquema do método direto utilizando duas técnicas de metalização superficial.	60
Figura 20 – Esquema do método indireto utilizando duas técnicas de metalização superficial [adaptado de 74].	61
Figura 21 – Modelagem de uma amostra confeccionada para o experimento preliminar.	64
Figura 22 – Amostra com recobrimento de níquel por deposição química: vista superior (A) e vista inferior (B).	66
Figura 23 – Amostra com recobrimento de níquel eletrodepositado: vista superior (A) e vista inferior (B).	66
Figura 24 – Corpos de ensaio confeccionados na máquina de estereolitografia e utilizados para o experimento complementar 1.	71
Figura 25 – Ataque químico realizado no laboratório de Física.	73
Figura 26 – Etapas de Neutralização (1) e Pré-ativação (3) com uma lavagem intermediária em água deionizada e bidestilada (2).	75
Figura 27 – Corpos de ensaio mergulhados na solução Ativador Noviganth AK I®.	76
Figura 28 – Corpos de ensaio mergulhados na solução Ativador Noviganth AK II®.	77
Figura 29 – Corpos de ensaio mergulhados na solução Noviganth AK®.	79

Figura 30 – Solução contendo sulfato de cobre sendo dissolvido em água deionizada e bidestilada agitada magneticamente e aquecida até 45°C.	81
Figura 31 – Contra-eletrodo em cobre fosforoso usinado no Laboratório LMP e utilizado na solução CUPRACID 300®.	81
Figura 32 – Contra-eletrodo em níquel usinado no Laboratório LMP e utilizado na solução Níquel Brilhante®.	83
Figura 33 – Dois corpos de ensaio na estufa para secagem da cola prata.	84
Figura 34 – Potenciostato utilizado no processo da eletrodeposição.	84
Figura 35 – Amostra confeccionada pelo processo de estereolitografia e utilizada no segundo experimento complementar.	87
Figura 36 – Ataque químico aplicado nas amostras.	88
Figura 37 – Ativador Noviganth AK I aplicado na amostra.	89
Figura 38 – Ativador Noviganth AK II aplicado na amostra.	89
Figura 39 – Noviganth Ni AK referente à última etapa do processo.	90
Figura 40 – Dispositivo criado para facilitar a troca da peça e contra-eletrodo.	91
Figura 41 – Amostra após acabamento superficial.	94
Figura 42 – Corpo de ensaio antes (direita) e depois (esquerda) da pintura com tinta prata PC 200B.	95
Figura 43 – Colagem do corpo de ensaio sobre chapa de alumínio (esquerda) e montagem da máscara sobre o conjunto (direita).	96
Figura 44 – Esquema da montagem da chapa de alumínio com o corpo de ensaio e o contra-eletrodo de cobre fosforoso.	96

Figura 45 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio sem nenhum acabamento superficial.	100
Figura 46 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #100.	100
Figura 47 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #220.	101
Figura 48 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #400.	101
Figura 49 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #600.	102
Figura 50 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial por jateamento.	102
Figura 51 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio sem acabamento superficial após ataque químico.	104
Figura 52 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #100 após ataque químico.	104
Figura 53 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #220 após ataque químico.	105
Figura 54 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #400 após ataque químico.	105
Figura 55 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #600 após ataque químico.	106
Figura 56 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial por jateamento após ataque químico.	106
Figura 57 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio sem acabamento superficial após etapa do níquel químico.	108
Figura 58 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #100 após etapa do níquel químico.	108
Figura 59 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #220 após etapa do níquel químico.	109
Figura 60 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #400 após etapa do níquel químico.	109

Figura 61 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #600 após etapa do níquel químico.	110
Figura 62 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial por jateamento após etapa do níquel químico.	110
Figura 63 – Rugosidade R_a medida nos corpos de ensaio.	113
Figura 64 – Rugosidade R_z medida nos corpos de ensaio.	113
Figura 65 – Corpo de ensaio e contra eletrodo antes da eletrodeposição de cobre (esquerda) e depois da eletrodeposição (direita).	114
Figura 66 – Corpo de ensaio e contra eletrodo antes da eletrodeposição de níquel (esquerda) e depois da eletrodeposição (direita).	115
Figura 67 – Os dois corpos de ensaio com as fitas adesivas coladas nas superfícies metalizadas.	116
Figura 68 – Teste de adesão após a retirada das fitas adesivas dos corpos de ensaio.	117
Figura 69 – Deposição química de níquel realizado no Laboratório de Efeito Mossbauer do Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina.	118
Figura 70 – Amostra depositada com níquel químico na empresa Boreal (esquerda) e amostra depositada com níquel químico no laboratório da UFSC (direita).	119
Figura 71 – Amostra 01 antes da eletrodeposição de cobre.	120
Figura 72 – Amostra 01 após a eletrodeposição de cobre.	121
Figura 73 – Amostra 01 após a eletrodeposição de níquel.	122
Figura 74 – As duas amostras após a etapa final da metalização com recobrimento de níquel (indicado pelas setas).	122

Figura 75 – Amostra eletrodepositada na empresa Boreal (esquerda) e amostra eletrodepositada no Laboratório de Filmes Finos e superfícies da UFSC (direita).	123
Figura 76 – Gráfico comparativo do tempo de metalização entre as amostras utilizadas no experimento preliminar e no segundo experimento complementar.	125
Figura 77 – Amostra antes (direita) e depois (esquerda) da pintura com tinta prata PC 200B.	127
Figura 78 – Amostra pintada com tinta prata e montada no equipamento antes do início do processo da eletrodeposição de cobre.	128
Figura 79 – Amostra pintada com tinta prata e montada no equipamento depois do processo da eletrodeposição de cobre.	128
Figura 80 – Amostra em duas vistas, inferior e superior, onde as manchas podem ser observadas (indicada pelo número 1).	129
Figura 81 – Amostra pintada com tinta prata após a eletrodeposição de níquel.	130
Figura 82 – Gráfico comparativo do tempo de metalização entre a amostra 01 metalizada no segundo experimento complementar e a amostra deste experimento.	131
Figura 83 – Precipitação do sulfato de cobre sobre as extremidades do contra-eletrodo.	134
Figura 84 – Casca de cobre sobre corpo de ensaio após quarenta e oito horas de eletrodeposição.	134
Figura 85 – Dispositivo montado no corpo de ensaio (esquerda), a casca de cobre (centro) e o corpo de ensaio separado com o dispositivo (direita).	135
Figura 86 – Cavidade gerada pela casca de cobre após a separação do corpo de ensaio.	135
Figura 87 – Medição da resistência ôhmica em uma amostra.	137
Figura 88 – Gráfico dos valores de resistência ôhmica medido nas peças utilizadas nos experimentos complementares 2 e 3.	137

GLOSSÁRIO DE SIGLAS

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD – Computer Aided Design
CAM – Computer Aided Manufacturing
EASP – Electric Arc Spraying
FDM – Fused Deposition Modeling
HVOF – High Velocity Oxy/Fuel Spraying
LOM – Laminated Object Manufacturing
PSP – Plasma Spraying
Q.P. – Quimicamente Puro
RP – Rapid Prototyping
SL – Stereolithography
SLS – Selective Laser Sintering
UV – Ultra Violeta

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS

n – Número de Medições
Pd – Paládio
® – Marca Registrada
R_a – Rugosidade Média Aritmética
R_z – Rugosidade Média da Distância Entre os Cinco Vales e os Cinco Picos Mais Proeminentes
Sn - Estanho

RESUMO

Em diversos setores da atividade industrial são exigidos, cada vez mais, curtos períodos de desenvolvimento e/ou aperfeiçoamento de produtos a serem inseridos no mercado. Através da técnica do processo da estereolitografia, obtêm-se peças e protótipos em menores períodos de tempo, auxiliando o campo da prototipagem rápida a tornar-se uma importante ferramenta para a atividade industrial. Visando ampliar as oportunidades criadas por essa técnica, este trabalho tem como objetivo iniciar uma nova linha de pesquisa junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, através da investigação a respeito da aplicação do processo de metalização superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia. Dentre as técnicas de metalização superficial existentes atualmente, foram realizados experimentos utilizando-se um processo de metalização superficial aplicado, originalmente, em peças fabricadas em polímero ABS. O primeiro experimento foi realizado junto às instalações de uma empresa especializada na metalização superficial de peças em plástico ABS, e teve por objetivo identificar as principais etapas do processo de metalização, bem como identificar importantes parâmetros do processo a serem melhor avaliados. Os experimentos seguintes utilizaram as instalações dos laboratórios da UFSC, visando a realização das etapas associadas aos processos de metalização superficial que foram realizados na empresa que consta no primeiro experimento. Porém, anteriormente à metalização superficial, a preparação da superfície da peça, onde será aplicada a metalização, também torna-se um importante parâmetro do processo a ser analisado através da utilização de equipamentos, tais como: rugosímetro, microscópio óptico e multímetro. Desta forma foi possível reunir informações que permitiram adequar os processos de metalização superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia.

ABSTRACT

In diverse sectors of the industrial activity, there's been an increasing demand for short periods of development and/or perfecting of products to be inserted into the market. Through the technique of the stereolithography process, parts and prototypes are obtained in shorter periods of time, helping the field of rapid prototyping become an important tool for industrial activity. Aiming to extend the opportunities created by this technique, this work has an objective to initiate a new line of research in the Engineering Mechanical Program, through an investigation into the application of the superficial metallization process to parts obtained by the stereolithography process. Amongst the current usual techniques of superficial metallization, experiments have been carried through using a process of superficial metallization originally applied to pieces manufactured in ABS polymer. The first experiment was carried through using the installations of a company specialized in the superficial metallization of ABS plastic pieces, and had an objective to identify the main stages of the metallization process, as well as to identify important parameters of the process to be better evaluated. The following experiments used the installations of the UFSC's laboratories, aiming at the accomplishment of the stages associated with the superficial metallization process that had been carried through in the company comprised in the first experiment. However, prior to superficial metallization, the priming of the piece surface, where metallization will be applied, is also an important parameter of the process to be analyzed through the use of equipment, such as: roughness meter, light microscope, and multimeter. This way, it was possible to congregate information that allowed the adjustment of the superficial metallization process in parts obtained by the stereolithography process.

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENFOQUE DO TRABALHO E OBJETIVOS

Já não é mais novidade que o consumo de produtos de plástico vem aumentando, continuamente, no mercado mundial. Em quase todos os setores o plástico está presente servindo, inclusive, como indicador do desenvolvimento e sofisticação de um país [1, 2].

O mercado da América do Sul tem sido apontado como um dos mais promissores do mundo [3], especialmente o do Brasil, que com a globalização atraiu os concorrentes estrangeiros, forçando as empresas brasileiras a buscarem alternativas para se manterem competitivas, tais como: investimentos em novos equipamentos e qualificação dos funcionários [4, 5].

Em se tratando de empresas voltadas ao segmento de projeto de peças de plástico, por exemplo para o processo de moldagem por injeção, é cada vez maior a necessidade de utilizar tecnologias que reduzam o tempo de desenvolvimento – “lead-time” - e de inserção do produto no mercado – “time-to-market” -, independente de ser novo ou reprojeto [6, 7]. Além disso é preciso assegurar que o produto possua a qualidade e características estabelecidas no projeto visando atender às exigências do consumidor.

Assim, para cada desenvolvimento de um novo produto ou reprojeto de um produto já existente, é cada vez mais usual a confecção de protótipos através de tecnologias conhecidas por prototipagem rápida [8, 9]. Dentre as diversas tecnologias que são empregadas na área da prototipagem rápida no Brasil se destaca a

estereolitografia, por possuir a capacidade de confeccionar protótipos de elevada precisão dimensional [10, 11, 12].

Em função de muitas vezes existir a necessidade dos protótipos apresentarem aparência mais próximas possíveis do produto final, os confeccionados por prototipagem rápida através da estereolitografia normalmente requerem diferentes processos de acabamento, como lixamento, polimento e pintura [13, 14]. Neste contexto, outra técnica que vem sendo pesquisada mas que é praticamente desconhecida no Brasil é a técnica de metalização superficial, que se torna de grande relevância pela possibilidade de ampliar o campo de aplicação da estereolitografia.

O interesse por esta possibilidade é ainda maior, principalmente quando se verifica que há um esforço por parte da comunidade científica internacional de propiciar o uso da tecnologia de prototipagem rápida para confeccionar a geometria da cavidade de moldes (neste caso denominada de tecnologia de ferramental rápido) usados para os mais diferentes processos de moldagem, como é o caso da moldagem por injeção [15].

No sentido de iniciar uma nova linha de pesquisa junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica o presente trabalho tem por objetivo investigar a respeito da aplicação do processo de metalização superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia. Com base em resultados de testes preliminares realizados mediante uma técnica empregada usualmente para a metalização de peças em plástico ABS, o trabalho tem por objetivo desenvolver experimentos para gerar conhecimento básico capaz de identificar alternativas para adequar o processo de metalização às necessidades de acabamento superficial exigidos para protótipos confeccionados a partir da estereolitografia.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para um melhor entendimento o presente trabalho foi dividido em mais seis capítulos, além deste capítulo de introdução, sendo que :

- **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica**, apresenta uma sucinta descrição da prototipagem rápida, bem como da tecnologia da estereolitografia, que foi utilizada para a confecção das peças utilizadas nos experimentos. Adicionalmente apresenta uma abordagem sobre os tipos mais usuais de técnicas empregadas para o acabamento superficial em peças estereolitografadas, bem como a respeito das técnicas de metalização superficial pesquisadas atualmente para utilização na área da prototipagem rápida.
- **Capítulo 3 – Desenvolvimento Experimental Preliminar**, descreve os objetivos, procedimentos e análise dos resultados do experimento realizado junto a uma empresa que utiliza dois processos de metalização superficial aplicados em peças de plástico ABS.
- **Capítulo 4 – Descrição dos Experimentos Complementares**, onde são descritos os quatro experimentos complementares que foram desenvolvidos com base nas observações e resultados provenientes do experimento preliminar.

- **Capítulo 5 – Resultados e Discussão dos Experimentos Complementares**, onde são apresentados e discutidos os resultados obtidos no desenvolvimento dos experimentos complementares descritos no capítulo 4.
- **Capítulo 6 – Conclusão**, baseado nos resultados obtidos mediante este trabalho, as principais conclusões e considerações finais são apresentadas com relação à influência do acabamento superficial na etapa do ataque químico, nas medições de rugosidades e resistência ôhmica e na adesão da camada metalizada das peças após as metalizações superficiais. São propostos, também, novos temas para futuros trabalhos ligados à área.
- **Capítulo 7 – Bibliografia**, apresenta a listagem das referências bibliográficas e bibliografias consultadas que foram utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROTOTIPAGEM RÁPIDA

O termo prototipagem rápida (RP) se refere a uma tecnologia que pode construir automaticamente modelos físicos tridimensionais (3D) a partir de dados gerados em um sistema CAD 3D em um curto período de tempo [16, 17, 18]. Originou-se há aproximadamente 17 anos com o aparecimento do processo de estereolitografia e causou um grande impacto na indústria, em especial nas empresas que atuam na área de projetos [19, 20].

No exterior, a prototipagem rápida é largamente utilizada principalmente por empresas que atuam no segmento automotivo, aeroespacial, médico e no desenvolvimento de projetos de produtos de consumo em geral. Diversas tecnologias são utilizadas para a fabricação de protótipos, tais como a Estereolitografia (SL - Stereolithography), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS - Selective Laser Sintering), a Manufatura de Objetos Laminados (LOM - Laminated Object Manufacturing) e a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM - Fused Deposition Modeling) [18, 21]. Com os avanços tecnológicos da usinagem a altas velocidades (HSM - High Speed Machining) alguns autores têm considerado também o processo de fresamento como uma alternativa para a confecção rápida de protótipos. Apesar disso, quando se refere ao termo prototipagem rápida normalmente são consideradas somente as tecnologias que fabricam os protótipos por processos de adição sucessiva de finas camadas sobrepostas umas sobre as outras [20] e não pela remoção de material, como é o caso do fresamento [19].

Dentre as diversas tecnologias utilizadas para a fabricação de protótipos pelo processo de adição de camadas, destaca-se a estereolitografia pela elevada precisão dimensional de seus protótipos (na faixa dos centésimos de milímetro) e por ser a tecnologia pioneira nesta área e atualmente utilizada como referência para as demais tecnologias que estão em desenvolvimento [18]. Desde o seu registro em 1986 até os dias atuais, ocorreram várias melhorias, abrangendo desde os softwares CAM, usados para gerar os programas que controlam a máquina, até os diferentes tipos de resina que podem ser utilizadas no equipamento para confeccionar os protótipos.

O propósito da prototipagem rápida, como o próprio nome diz, é obter um modelo físico 3D, disponível para manuseio e realização de testes durante as fases de desenvolvimento de produtos, em um curto espaço de tempo [22]. Embora existam diversas técnicas de prototipagem rápida, todas empregam, basicamente, os mesmos cinco passos. Primeiramente é feito o desenho do modelo no computador, utilizando-se de um sistema CAD 3D; o segundo passo é converter o arquivo CAD no formato STL que consiste na interface, entre o CAD e a máquina de estereolitografia, mais comumente utilizada e reconhecida como padrão pela indústria de prototipagem rápida [23]. Este formato representa as três dimensões da superfície do modelo através de triângulos planos (ver Figura 1) armazenando nesse novo arquivo as coordenadas dos vértices e a direção normal de cada triângulo. O terceiro passo consiste no fatiamento do modelo STL em finas camadas (ver Figura 1) que fornecerá dados das coordenadas vetoriais necessárias para gerar o programa de comando numérico que controlará o sistema da máquina que irá fabricar o protótipo. O quarto passo então, é a construção do protótipo na máquina camada por camada até a sua obtenção total. O quinto e último passo é a limpeza e o acabamento superficial da peça, denominado por muitos autores como a etapa de pós-processamento.

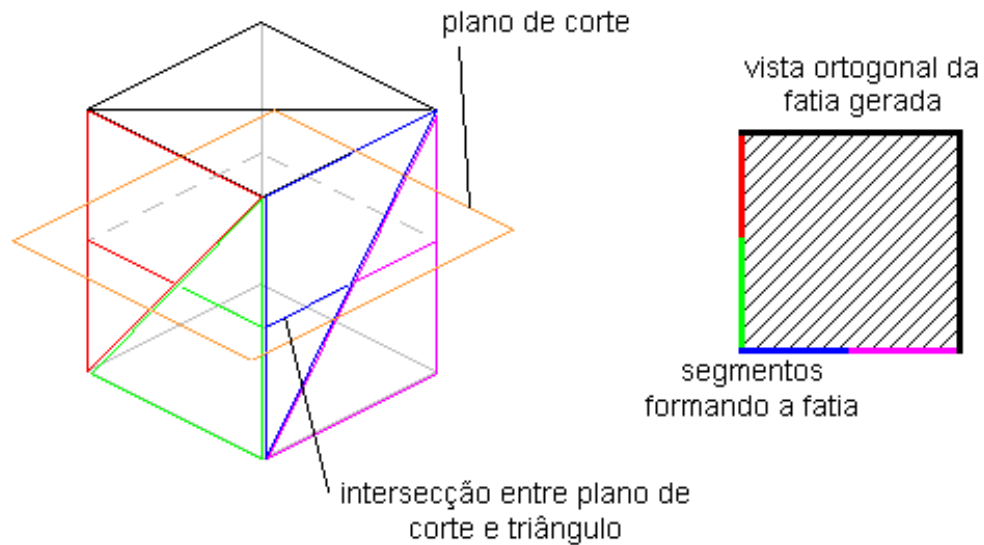


Figura 1 – Triangularização e fatiamento do modelo STL [23].

Dentre as diversas tecnologias de prototipagem rápida citadas anteriormente, será feita uma abordagem sobre a tecnologia da estereolitografia em função de ser o objeto de estudo desta dissertação. Informações mais detalhadas sobre as demais tecnologias podem ser encontradas, por exemplo, no estudo realizado por Gomide [4] e no site www.mmsonline.com [18].

2.1.1 Estereolitografia

A tecnologia da estereolitografia é baseada na fotopolimerização de uma resina através de um feixe de laser UV (Ultra Violeta). O sistema é formado basicamente por uma plataforma que se movimenta dentro de uma cuba com resina, cujo direcionamento do feixe é dado por um conjunto ótico de espelhos galvanométricos.

O controle numérico da máquina posiciona a plataforma na superfície da resina e os espelhos galvanométricos para que direcionem o feixe de laser na superfície da

resina desenhando a primeira camada do objeto a ser construído. Por onde o feixe do laser incide na superfície da resina inicia-se uma polimerização localizada, ocorrendo a sua solidificação [9].

Como a resina é um composto de monômeros de epóxi, acrílico ou vinil, fotoiniciadores e aditivos, quando o feixe do laser incide sobre a superfície da resina, os fotoiniciadores iniciam uma reação localizada que promove a formação da cadeia polimérica entre as moléculas do monômero disperso na resina. Quando a camada é terminada, a plataforma desce, mergulhando a camada fabricada dentro da cuba com resina. A plataforma sobe novamente, mas retorna com um decréscimo correspondente à espessura de camada desejada (ou limitante).

Devido à alta viscosidade da resina, um subsistema regulariza a nova camada de líquido para que ela fique plana [12, 14, 15]. Os espelhos novamente direcionam o feixe de laser sobre a superfície da resina, formando uma nova camada aderindo-a sobre a camada anterior. O processo segue continuamente até a completa finalização do objeto, conforme mostra a Figura 2 [24].

Devido a construção ocorrer por camadas alguns efeitos indesejáveis na sua confecção podem surgir, que devem ser minimizados durante a etapa de pós-processamento, ou seja, no acabamento final da peça [24, 25].

Dentre os erros gerados nos protótipos obtidos por estereolitografia, têm-se como principais os provenientes do efeito escada (“*step*”) e os erros de concavidade (“*concave*”) e de convexidade (“*convex*”) [26].

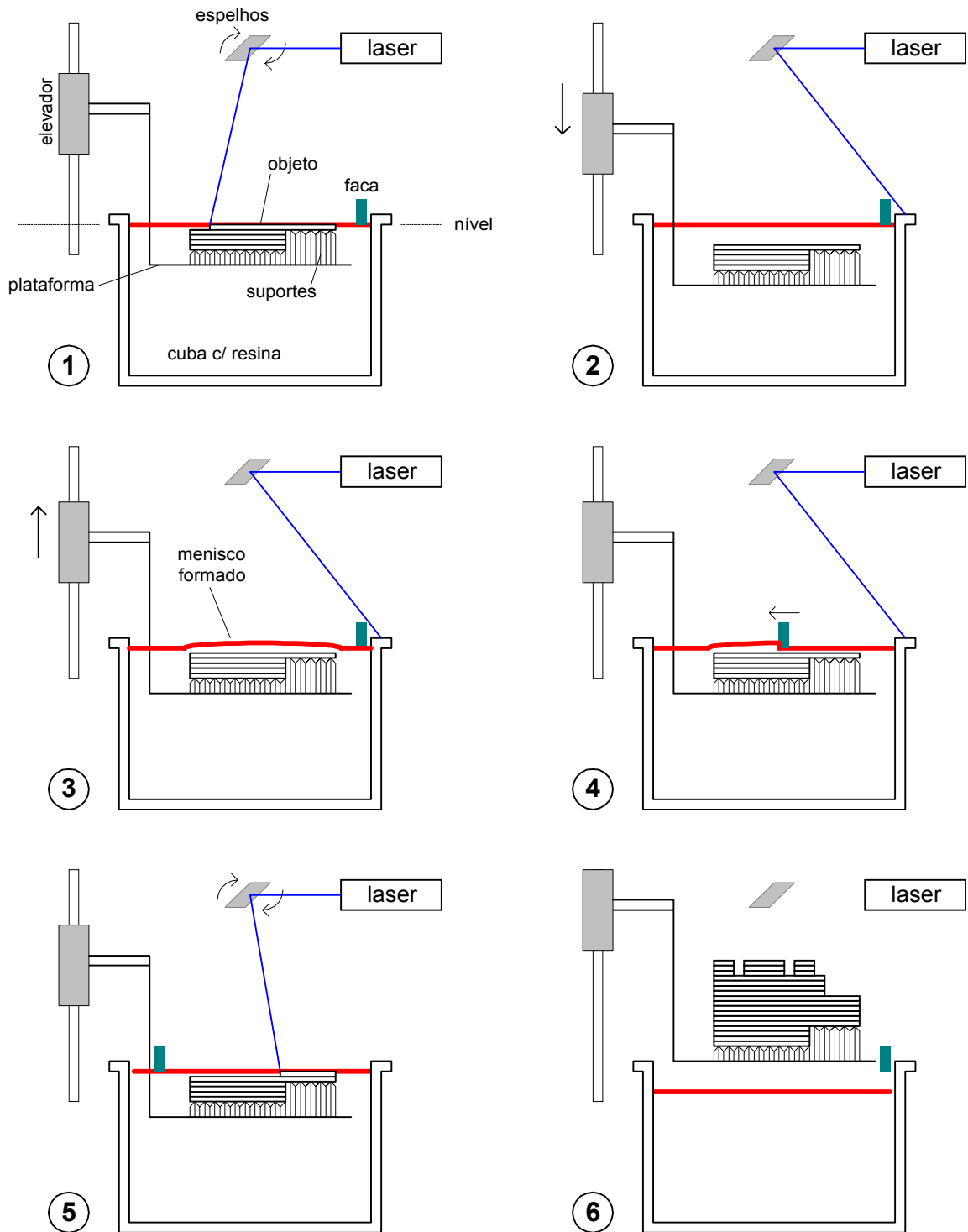


Figura 2 - 1) Construção de uma camada; 2) Descida da plataforma em direção ao eixo Z, 3) Recobrimento; 4) Regularização da camada; 5) Construção de mais uma camada, 6) Objeto pronto para ser retirado de dentro da máquina [24].

A Figura 3 mostra, esquematicamente, o efeito escada em uma peça obtida por estereolitografia. O contorno em negrito representa a dimensão real da peça, porém, devido ao efeito escada produzido pelas diversas camadas sobrepostas para a sua confecção o contorno da peça será formado pelo representado pela linha mais fina.

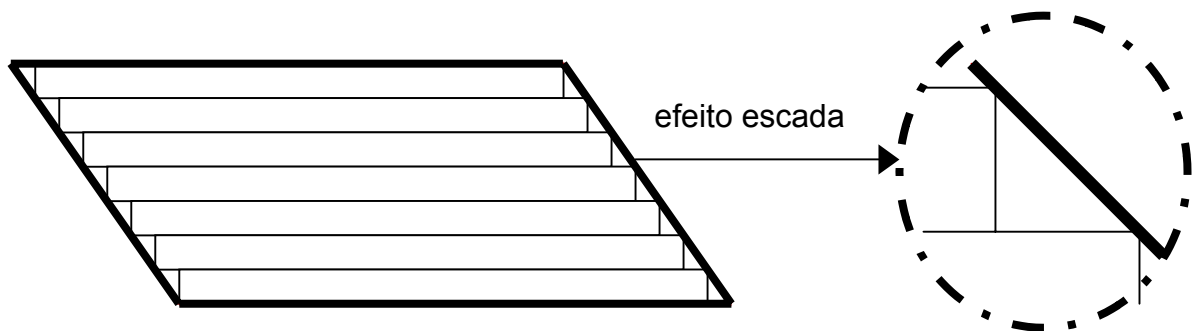


Figura 3 – Efeito escada.

Os erros de concavidade e convexidade são mostrados na Figura 4, onde de maneira semelhante ao efeito escada, ocorre uma infidelidade das dimensões reais projetadas da peça que é representada pelo contorno em negrito. Na concavidade é mais fácil de se obter a dimensão real no pós-processamento, pois ocorre um excesso de material no local, podendo, então, ser retirado com algum dos diferentes tipos de processos de acabamento, porém na convexidade existe uma falta de material, do mesmo modo que acontece no efeito escada.

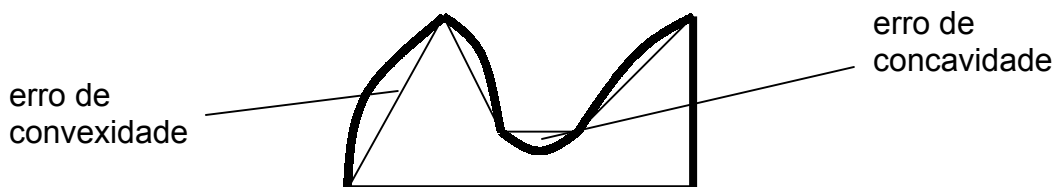


Figura 4 – Erro de concavidade e convexidade.

Vale salientar que o efeito escada ocorre na confecção da peça na máquina de prototipagem rápida de acordo com a espessura de camada característica de cada equipamento (efeito de processo). O erro de concavidade e convexidade ocorre no interfaceamento do desenho em sistema CAD para o sistema CAM da máquina de estereolitografia, ou seja, quando o arquivo é configurado no formato STL, característico de cada software CAD utilizado (erros de interface) [26, 27, 28].

2.1.2 Acabamento Superficial em Peças Estereolitografadas

Como já mencionado anteriormente, após o término do processo de fabricação de uma peça na máquina de estereolitografia, são necessárias algumas etapas de pós-processamento para que seja obtido o acabamento superficial desejado. Essas etapas consistem basicamente em retirar o excesso da resina epóxi, através de um solvente ou centrifugando a peça em equipamentos apropriados [16], inserir a peça em um forno ultravioleta para aumentar o grau de cura da resina epóxi e, após isso, trabalhar sobre sua superfície utilizando materiais abrasivos como esferas de vidro, lixas e massa de polir conforme o acabamento superficial a ser obtido. As ferramentas mais utilizadas nos acabamentos superficiais das peças obtidas pelo processo da estereolitografia consistem de lixas, máquinas de polir, máquinas de jatear e retificadoras manuais [29].

A) Lixamento

As lixas, também conhecidas como abrasivos revestidos, são constituídas de costados, grãos abrasivos e adesivos. O costado é a base da lixa, podendo ser de papel, combinação de pano ou fibra, conforme sua finalidade. Os grãos abrasivos são

obtidos através de minerais triturados formando partículas que são classificadas de acordo com o tamanho da malha da peneira utilizada para separá-los, também conhecidos como “grana”. A peneira possui uma quantidade de furos por polegada quadrada (“mesh”) que define o tamanho dos grãos de uma lixa (granulometria). Os adesivos são responsáveis pela fixação dos grãos no costado e pela proteção durante a operação. A Tabela 1 mostra as lixas com costado de papel que são utilizadas para operações manuais de acabamento superficial e em operações mecânicas em geral.

Tabela 1 – Classificação das lixas com costado de papel [30].

CÓDIGO	GRAMATURA	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
A	70 g/m ²	FLEXÍVEL E LEVE	Operações manuais e em lixadeiras portáteis, a seco ou refrigeradas.
B	90 g/m ²		
C	110 g/m ²	FLEXÍVEL E RESISTENTE	Operações mecanizadas em geral
D	150 g/m ²		
E	220 g/m ²	PESADO	Desbaste e acabamento
F	280 g/m ²		

As lixas podem ainda ter o costado combinado que é obtido a partir de pano e papel ligados entre si por um adesivo de grande resistência, tipo muito utilizado nas indústrias madeireiras pesadas, para assoalhos e em lixadeiras de cilindros no formato de folhas grandes. As lixas possuem também costado somente de pano que é empregado principalmente para operações manuais e mecânicas que necessitam de grandes esforços; porém é o costado de fibra que apresenta a mais alta resistência mecânica, sendo a sua aplicação mais usual em discos para lixadeiras portáteis.

Existe, portanto, uma grande variedade de formatos, tamanhos e granulometrias das lixas que são indicadas para aplicações profissionais e industriais nas operações de desbaste, acabamento e polimento em materiais como madeira, vidro, couro, metais ferrosos e não-ferrosos.

Para trabalhos manuais com ou sem o uso de equipamentos portáteis, como é o caso das peças obtidas pelo processo de estereolitografia, as folhas de lixa são as mais indicadas para operações de desbaste e acabamentos de superfícies [31].

De acordo com os diversos tipos de folhas de lixa, a mais indicada para a operação de acabamento superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia é a lixa d'água, que possui costado impermeável e pode ser utilizada nos processos de lixamento, pré-polimento e pré-pintura. As gramaturas apropriadas para essa lixa d'água são os códigos A e C, uma vez que o código A, devido à sua flexibilidade, propicia uma maior agilidade para serviços manuais de acabamento e o código C auxilia no lixamento com movimento orbital. Associada à gramatura vem acompanhada, impressa na parte de trás da folha de lixa, um número chamado grana que diz respeito à granulometria do abrasivo agregado ao costado. Para lixas d'água a grana pode variar de 60 a 2000; quanto maior a grana menor é a granulometria do grão abrasivo.

No processo de lixamento das peças obtidas por estereolitografia, utiliza-se quase sempre a água associada à folha de lixa, pois ela funciona como um lubrificante e mantém a folha de lixa livre de empastamento, ou seja, o espaço entre os grãos abrasivos é mantido o mais limpo possível. Como regra geral inicia-se o lixamento pela folha de lixa mais áspera (menor grana) utilizando-se progressivamente lixas de granas maiores até a obtenção do acabamento superficial desejado. Usualmente, para peças obtidas pelo processo de estereolitografia, inicia-se o processo de lixamento por uma

folha de lixa de grana 100 e gramatura A (dependendo da geometria da peça) até a grana em que o acabamento superficial desejado será obtido [29].

Devido à importância do acabamento superficial diversas empresas estrangeiras possuem uma série de níveis padronizados de procedimentos para operações de pós-processamentos (acabamentos) em peças de estereolitografia de acordo com o propósito da peça. A empresa americana Eagle Design & Technology [31], por exemplo, oferece seis tipos de procedimentos para o pós-processamento em peças de estereolitografia que constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Níveis de procedimentos de pós-processamento em peças obtidas pelo processo de estereolitografia da empresa Eagle Design & Technology [31].

NÍVEL	FORNO UV	FORNO ELÉTRICO	LIXA (grana)	JATEAMENTO	POLIMENTO	CARACTERÍSTICAS
1	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	Acabamento mais básico possível.
2	SIM	OPCIONAL	180	SIM	NÃO	Suave jateamento para melhora da aparência.
3	SIM	OPCIONAL	230	OPCIONAL	NÃO	Peças prontas para pintura e montagem.
4	SIM	OPCIONAL	400	OPCIONAL	NÃO	Lixamento com auxílio de água, podem ser usadas para pintura e como padrão para a fabricação de moldes.
5	SIM	OPCIONAL	600	OPCIONAL	SIM	Idem ao nível 4, porém com aparência translúcida.
6	SIM	OPCIONAL	800	OPCIONAL	SIM	Idem ao nível 4, porém com aparência transparente.

B) Polimento

O polimento em peças obtidas pelo processo de estereolitografia é normalmente utilizado somente para propósitos visuais, pois o processo de polimento desgasta demasiadamente a sua superfície e conseqüentemente altera significativamente as dimensões reais da peça [32]. A Figura 5 mostra uma peça obtida pelo processo de estereolitografia em que foi realizado um polimento até o nível 6 da Tabela 2, de acordo com os procedimentos da Eagle Design & Technology. Sempre é necessária uma fase de pré-lixamento para o início do processo de polimento. Realizada a etapa de pré-lixamento, têm início os procedimentos usualmente recomendados para o polimento, que são:

- Lixar em movimentos elípticos, manualmente.
- Dispensar equipamentos para polimento (do tipo retificadoras manuais) pois diminuem a sensibilidade do operador.
- Somente operadores que já possuem domínio da técnica do polimento manual devem usar retificadoras e outros equipamento para polir.
- Usar o bom senso “visual” ou experiência para definir a granulometria inicial de lixamento.
- Executar o lixamento manual com lixa grana 800 ou maior, assistido com água.
- Realizar o polimento com massa de polir.
- Refinar o polimento com líquido de polir.
- Uma cera apropriada pode ser usada para aumentar o brilho superficial, a estética e proteção contra intempéries (gordura, poeira e umidade).



Figura 5 – Peça obtida por estereolitografia (ao centro) polida até o nível 6 (Tabela 6) de acordo com procedimentos da Eagle Design & Technology [31].

C) Jateamento

O jateamento consiste em um processo de acabamento superficial que também é utilizado em peças obtidas pelo processo de estereolitografia. Consiste basicamente na propulsão de grãos abrasivos, auxiliados pelo uso do ar comprimido, contra a superfície a ser jateada. A mistura grão abrasivo mais ar comprimido é propulsionada à superfície da peça através de uma pistola de jateamento (Figura 6) que é manuseada pelo operador [33]. Os grãos abrasivos são arrastados junto ao ar comprimido pela ação da gravidade, geralmente através de um pequeno reservatório localizado na parte superior da pistola de jateamento, ou por diferencial de pressão, criando dessa maneira uma força de sucção que age na pistola de jateamento ou na própria linha de ar comprimido.



Figura 6 - Típica pistola de jateamento [33].

O jateamento pode produzir efeitos que combinam ação de limpeza e/ou acabamento da peça substituindo o lixamento manual. O processo é feito em um tempo 25% a 75% menor em relação ao lixamento manual. Após o jateamento a superfície da peça encontra-se química e mecanicamente “limpa”, com espaços e picos uniformes em uma superfície plana e robusta. Dessa maneira, fornece também uma melhor superfície para processos posteriores tais como pintura, recobrimento ou metalização [34, 35].

O controle de diversos fatores como a dureza e o tamanho do grão abrasivo, a velocidade do grão abrasivo ao atingir a peça, o ajuste do ar comprimido, a distância e o ângulo da pistola de jateamento em relação à peça, influenciam no método de aplicação para que o processo de jateamento alcance a superfície desejada. Os grãos abrasivos mais utilizados são a sílica (areia), óxido de alumínio, granalha de aço e esferas de vidro. São relativamente baratos e, dependendo do equipamento, reutilizáveis. O uso de gabinetes para jateamento torna possível a reutilização dos grãos abrasivos, melhora o manuseio da peça e conseqüentemente o seu acabamento superficial; porém, a principal vantagem da utilização de gabinetes diz respeito à

segurança do operador, principalmente na utilização de grãos abrasivos com a presença da sílica livre, pois a literatura atual não recomenda o seu uso devido aos problemas pulmonares que ela acarreta, como por exemplo a silicose.

Os grãos abrasivos são classificados de acordo com o tamanho da malha da peneira utilizada para separá-los. Quanto maior for o número de furos mais fina será a malha da peneira e menor será o tamanho do grão abrasivo. A grana de um grão abrasivo se refere à quantidade de furos da peneira por polegada quadrada e é a mesma classificação utilizada nas folhas de lixa, ou seja, quanto maior a grana menor o tamanho do grão abrasivo [30]. A Tabela 3 fornece algumas especificações sobre os grãos abrasivos mais utilizados para o processo de jateamento.

Tabela 3 - Especificações sobre os grãos abrasivos mais utilizados para o processo de jateamento [adaptada de 37].

MATERIAL	MALHA (GRANA)	DENSIDADE (kg/m ²)	MOHS	RESISTÊNCIA DO GRÃO	PRESSÃO USUAL (atm)	APLICAÇÕES
Sílica (areia)	6 – 270	488	5.0 – 6.0	Alta	1,36 – 6,12	Preparo da superfície para pintura e limpeza.
Granalha de aço	8 – 200	1367	8.0	Baixa	1,36 – 6,12	Limpeza e descascamento superficial.
Óxido de alumínio	12 – 325	610	8.0 – 9.0	Média	1,36 – 6,12	Limpeza, acabamento, rebarbação e cauterização.
Esfera de vidro	10 – 400	415 – 440	5.5	Média	1,36 – 3,74	Limpeza e acabamento

Para o acabamento superficial, em peças obtidas pelo processo de estereolitografia, algumas empresas que confeccionam protótipos utilizam grãos abrasivos de microesferas de vidro que oferecem as seguintes vantagens [37]:

- A limpeza e o acabamento da peça são feitos com rapidez em uma única operação.
- As microesferas não são tóxicas e são reutilizáveis através de dispositivos de recirculação.
- As tolerâncias dimensionais das peças ficam pouco alteradas, pois não há remoção significativa de material da peça.
- As microesferas não contaminam a superfície, pois são inertes quimicamente.
- As microesferas permitem acesso às mínimas reentrâncias das peças e aumentam a compactação da superfície, diminuindo a porosidade.

De acordo com a literatura atual, os seguintes procedimentos para o processo de jateamento devem ser adotados [33]:

- Ângulo da pistola de jateamento e a superfície da peça: 45°.
- Distância entre a pistola de jateamento e a peça: 25 a 30 cm.
- Pressão do ar comprimido: 2 a 2,40 atm.

D) Retificação Manual

A retificação manual, aplicada à peças obtidas por estereolitografia, tem por função a remoção de material em regiões da peça de difícil acesso, como por exemplo, o acabamento de um furo, que geralmente encontra-se com marcas dos suportes que auxiliaram na sua fabricação ou ainda um acabamento em um canto qualquer da peça

onde o lixamento ou o jateamento não permitiu obter o efeito desejado. É, portanto, um processo de “acabamento localizado” em partes da peça, que acabam usualmente apresentando, nestas regiões, níveis diferentes de acabamento que podem ser obtidos pela quantidade de acessórios disponíveis nas retificadoras manuais.

Um tipo de retificadora manual que é utilizada pelo segmento de prototipagem rápida pode ser vista na Figura 7. Ela possui uma rotação variável de 5.000 até 30.000 rpm e vem acompanhada de acessórios que possibilitam retificar, furar, polir e lixar [38].



Figura 7 – Exemplo de retificadora e acessórios utilizados para operações de acabamento na prototipagem rápida [38].

E) Rugosidade

Rugosidades são, essencialmente, marcas de ferramentas inerentes ao processo de fabricação. Medir e controlar a rugosidade é uma importante etapa no acabamento superficial nas peças obtidas pelo processo de estereolitografia [39]. A

norma brasileira adota o sistema de linha média para avaliação da rugosidade que é avaliada em relação a uma linha **P**, de comprimento **C**, que representa uma amostra do perfil real da superfície examinada. A linha média acompanha a direção geral do perfil, determinando áreas superiores **A1** e áreas inferiores **A2**, de tal forma que a soma das áreas superiores seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostra, conforme mostra a Figura 8.

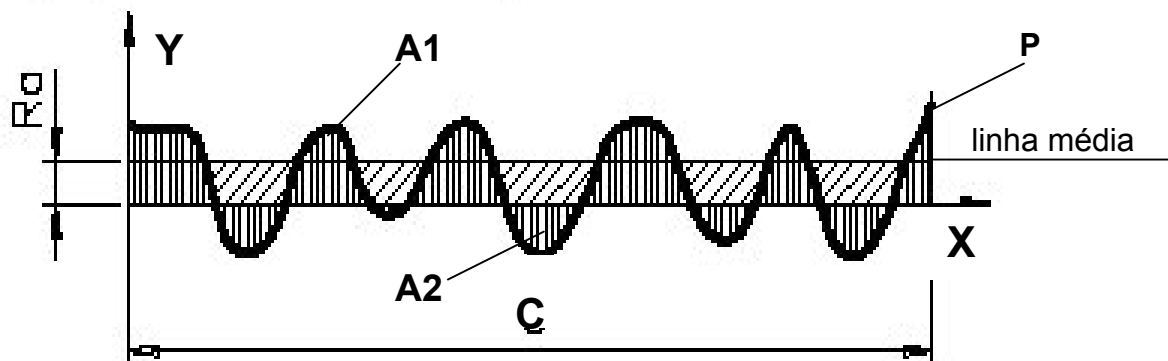


Figura 8 – Representação gráfica da rugosidade média (R_a) [40].

A medida da rugosidade é o desvio médio aritmético (R_a) calculado em relação à linha média [40], e é definida em 12 classes de rugosidade, que correspondem a determinados desvios médios aritméticos (R_a) expressos em micrometros (μm). A Tabela 4 reproduz as 12 classes de rugosidades e os valores dos desvios correspondentes [40].

A rugosidade média é o parâmetro de medida mais comumente utilizado para medição da rugosidade superficial, porém não fornece todo o histórico sobre a superfície medida [41].

Tabela 4 – Classes da rugosidade média (R_a) e os desvios correspondentes [40].

CLASSES DE RUGOSIDADE	DESVIO MÉDIO ARITMÉTICO R_a (μm)	CLASSES DE RUGOSIDADE	DESVIO MÉDIO ARITMÉTICO R_a (μm)
N1	0,025	N7	1,60
N2	0,05	N8	3,20
N3	0,10	N9	6,30
N4	0,20	N10	12,50
N5	0,40	N11	25,00
N6	0,80	N12	50,00

Apesar de existirem mais de 100 parâmetros que podem fornecer uma extensa análise da superfície, a maioria das aplicações de medições de rugosidades utilizam apenas a combinação de alguns parâmetros [29]. Na literatura sobre rugosidade em peças estereolitografadas é normalmente encontrada uma combinação dos parâmetros R_a e R_z [29]. O parâmetro R_z , reconhecido pela ISO, refere-se à média da distância entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos da superfície dentro da distância medida, a partir de uma linha de referência. Estes dois parâmetros foram utilizados para as medições de rugosidades dos experimentos presentes neste trabalho (ver Capítulo 4 e 5).

2.2 TECNOLOGIAS PARA METALIZAÇÃO

Entre as tecnologias de metalização mais empregadas atualmente na área da prototipagem rápida destacam-se a pulverização metálica, a eletrodeposição metálica, a deposição química, a pintura metálica e a metalização a vácuo, descritas a seguir.

2.2.1 Pulverização Metálica

A técnica da pulverização metálica, conhecida comercialmente como “spray metal”, é utilizada intensivamente em uma ampla variedade de aplicações industriais [42, 43]. Tem sido utilizada nos últimos 40 anos, mas somente na última década tem sido vista como uma revolução tecnológica na capacidade de produzir revestimentos nos mais variados materiais e com excelente performance em diferentes substratos. Essa revolução tecnológica tem sido alcançada através da introdução de novas técnicas de pulverização, do melhor controle do processo de pulverização, do melhoramento dos materiais utilizados para o revestimento e através do uso de modernas técnicas de controle de qualidade [43].

O princípio da pulverização metálica consiste na fundição do material (em forma de pó, arame ou fio) que será pulverizado e na aceleração das partículas do material fundido para impactar a peça que se deseja recobrir. Portanto, uma fonte de aquecimento e um sistema de aceleração do material são requeridos. A alta temperatura para a fundição do material pode ser alcançada quimicamente (por combustão) ou eletricamente (por arco elétrico), e possui também, juntamente com o auxílio do ar comprimido, a função de acelerar as partículas do material fundido que atingirão a peça, onde o material irá solidificar formando o depósito, que é constituído por sucessivos impactos individuais dessas partículas fundidas sobre a peça.

No caso de peças em resina epóxi, obtido pelo processo de estereolitografia, é necessário utilizar somente metais ou ligas metálicas com baixo ponto de fusão, tais como o estanho, zinco, cobre ou alumínio. Caso contrário poderão ocorrer danos na peça devido ao fato da resina epóxi utilizada não resistir a altas temperaturas [25].

Os vários processos de pulverização metálica são classificados de acordo com as características do material (pó, arame ou fio) e a fonte de calor empregada para a sua fusão. Dentre os processos existentes, três deles se destacam no campo da prototipagem rápida.

O primeiro processo consiste na combustão do oxigênio ou ar comprimido misturado com um dos vários combustíveis que podem ser utilizados, tais como o acetileno, propileno, propano e hidrogênio. Todos têm a função de fundir e propulsionar as partículas do material [43]. A Figura 9 ilustra um sistema de pulverização de material metálico por combustão de oxigênio e hidrogênio, onde ambos são alimentados por um sistema de pré-mistura no interior da câmara de combustão a alta pressão onde ocorre a queima dos componentes (oxigênio e hidrogênio) produzindo um fluxo de gás de alta temperatura e pressão [44, 45].

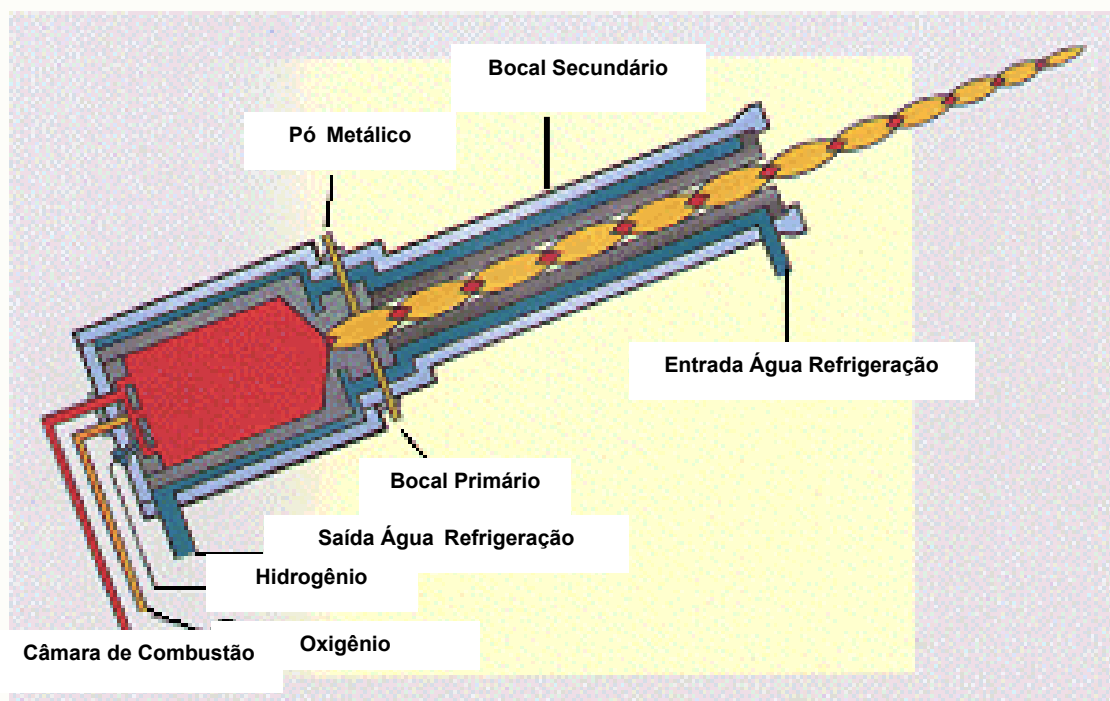


Figura 9 – Sistema de pulverização metálica por combustão denominado de HVOF (“high velocity oxy/fuel spraying”) [45].

Este fluxo se estende através de um bocal primário que aumenta a velocidade do gás e diminui a pressão até um valor um pouco acima da atmosférica. Neste estágio o pó metálico pode facilmente ser injetado no fluxo de gás. Este fluxo de gás aquece e acelera as partículas do pó que estão confinadas no bocal secundário, propiciando que as partículas atinjam com grande energia a peça que se deseja revestir. Este processo é comercialmente denominado de HVOF (“high velocity oxy/fuel spraying”) ou pulverização metálica a gás [14, 45, 46].

O segundo processo é denominado de pulverização metálica por arco elétrico ou EASP (“electric arc spraying”). Consiste basicamente de dois arames metálicos, que são constituídos pelo material que se deseja fundir, carregados eletricamente e que se encontram em um bocal onde ocorre o arco elétrico promovendo a fundição desses dois arames.

Simultaneamente, com o auxílio de ar comprimido, que é introduzido no sistema, o material fundido é propelido diretamente à peça que se deseja revestir. O material pulverizado solidifica-se rapidamente na superfície da peça formando um denso, forte e aderente revestimento. A maior vantagem do processo por arco elétrico consiste na rápida disponibilidade do revestimento logo após a sua formação, não necessitando de secagem ou tempo de cura e quase sem nenhum risco de danificação na peça. A Figura 10 ilustra um sistema de pulverização por arco elétrico [45].

Também utilizando um arco elétrico, o terceiro processo é relativamente direto no seu conceito, mas complexo na função [43]. É denominado de pulverização metálica por plasma ou PSP (“plasma spraying”). Na Figura 11 pode ser observado que a pistola sustenta um cátodo de tungstênio toriado e um ânodo anular de cobre que forma uma câmara onde o gás, geralmente argônio ou outro gás inerte, é introduzido [43].

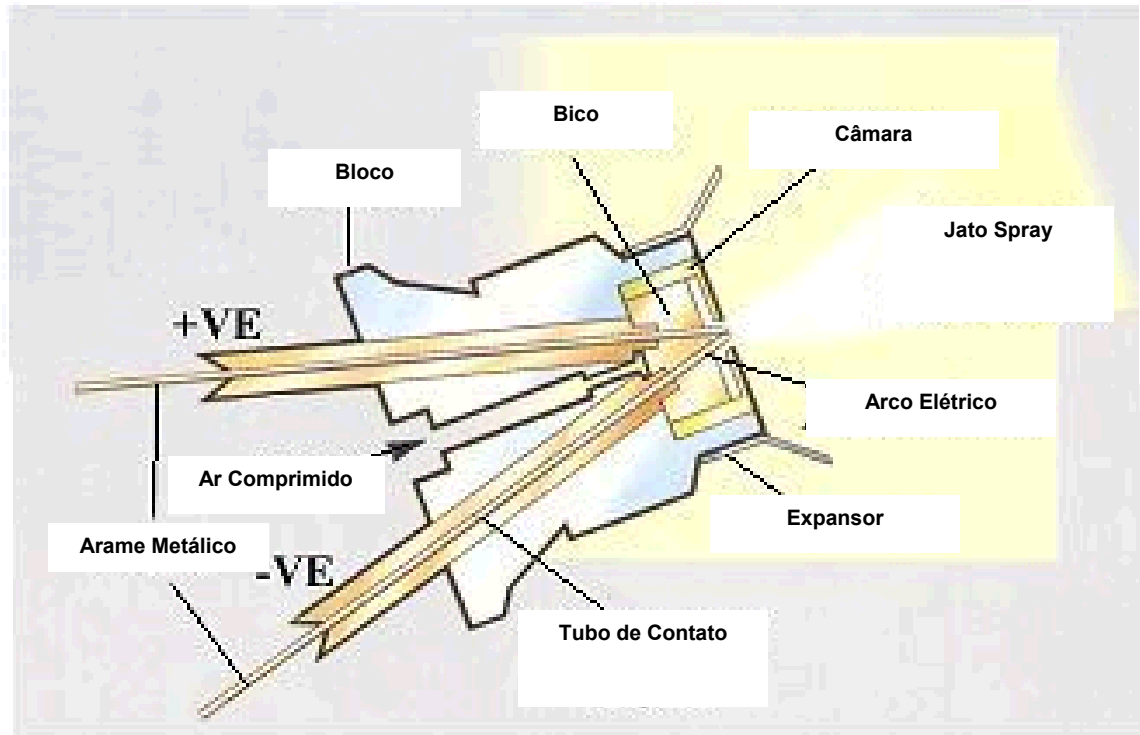


Figura 10 – Sistema de pulverização metálica por arco elétrico denominado EASP (“electric arc spraying”) [48].

O arco elétrico formado entre o cátodo e o ânodo eleva a temperatura do gás até a sua ionização tornando-o eletricamente condutivo. O gás emerge do bocal da pistola na forma de uma chama de plasma a qual rotaciona axialmente.

Partículas do pó do material que se deseja fundir são injetadas nessa chama onde são fundidas e depois impactadas na superfície da peça a uma alta velocidade produzindo um revestimento extremamente aderente. Quase todo tipo de substrato pode ser revestido, incluindo metais, cerâmicas e plásticos. É o processo mais utilizado atualmente para a área da prototipagem rápida devido, principalmente, ao fato da temperatura nas peças revestidas permanecerem quase que inalteradas, pois a maior temperatura do plasma está localizada na pistola.

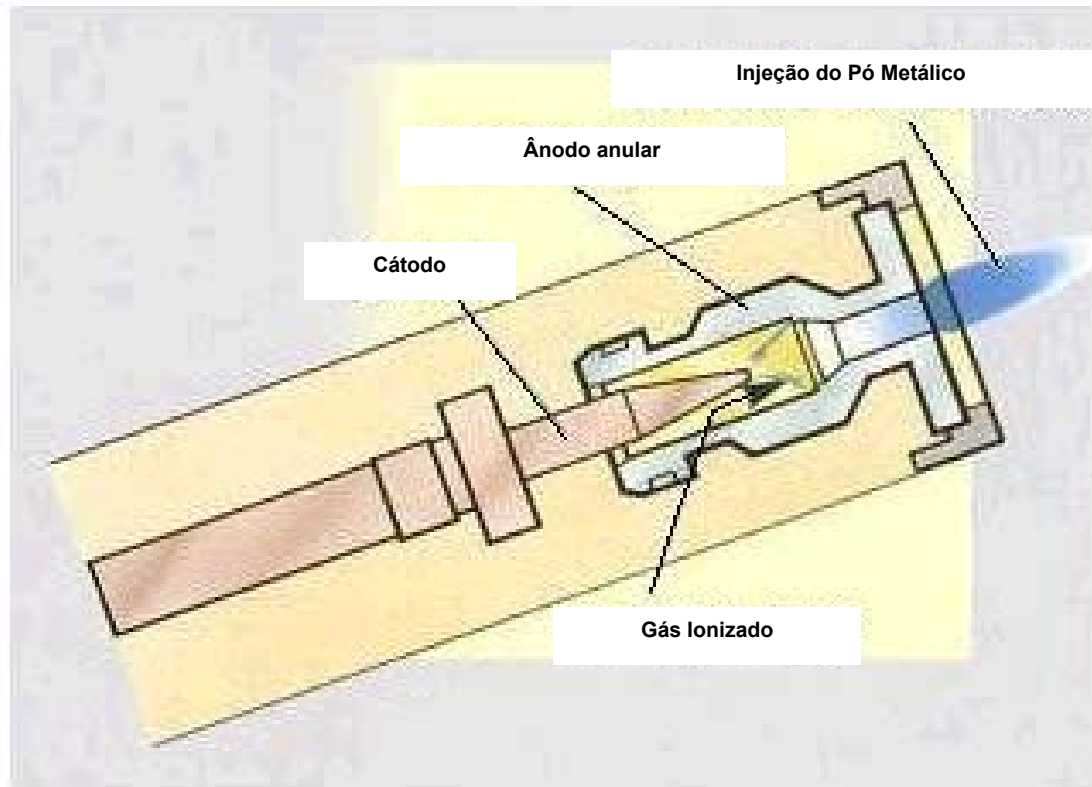


Figura 11 – Sistema de pulverização metálica por plasma denominado PSP (“plasma spraying”) [43].

Um estudo conduzido por Zhang [47] obteve grande êxito utilizando esse processo para obtenção de ferramental rápido a partir de um modelo confeccionado por prototipagem rápida, processo conhecido como método indireto (item 2.3) de fabricação de moldes. Atualmente, até metais com elevado ponto de fusão estão sendo utilizados no campo da prototipagem rápida com a utilização da pulverização metálica por plasma.

Outro estudo, desenvolvido por McHugh [42], do Laboratório de Idaho Falls, representa um grande desenvolvimento da pulverização metálica no campo da prototipagem rápida. Um exemplo de peça obtida mediante esse desenvolvimento pode ser observado na Figura 12, que mostra um revestimento metálico de um material de elevado ponto de fusão aplicado em um protótipo de resina sem danificá-lo.



Figura 12 – Protótipo com revestimento metálico (à direita) após aplicação pelo processo da pulverização metálica por plasma [42].

Porém, a maior limitação da pulverização metálica são as características da peça a ser revestida, que devem ser restritas à superfícies grandes e ligeiramente curvas, pois em outras situações a passagem e, conseqüentemente, a deposição uniforme do metal pulverizado é mais difícil [48]. A alta porosidade obtida pelo processo da pulverização metálica também é outro importante fator limitante da tecnologia, pois reflete diretamente nas suas baixas propriedades mecânicas e térmicas quando comparadas aos aços convencionais [14].

2.2.2 Eletrodeposição Metálica

Eletrodeposição metálica consiste em um processo eletroquímico pelo qual o metal é depositado em um substrato através da passagem de uma corrente elétrica por uma solução aquosa. Usualmente há um ânodo (eletrodo carregado positivamente), que é a fonte de metal que será utilizado e um cátodo (eletrodo carregado negativamente), que é o substrato em que será feito o depósito do metal. O cátodo deverá ser condutor de corrente elétrica para que o processo possa ocorrer, ou pelo

menos a sua superfície deverá ser condutora. No caso de superfícies não-metálicas ocorre uma deposição química (item 2.2.3) ou uma pintura metálica (item 2.2.4) anterior ao processo para obter-se a propriedade desejada (condução). A metalização ocorre em um tanque de revestimento que usualmente é feito de material não-metálico (plástico). O tanque é preenchido por uma solução aquosa que contém íons do metal, que serão depositados no substrato, dissolvidos na solução [49].

O ânodo, (também denominado contra-eletrodo), que é constituído pelo metal a ser utilizado na eletrodeposição, é conectado em uma fonte de energia carregada positivamente e será consumido pela solução aquosa. O cátodo, que é o substrato a ser recoberto pelo metal, é conectado em uma fonte de energia carregada negativamente. O processo é regulado através do controle de vários parâmetros, incluindo voltagem, amperagem, temperatura e tempo de permanência do substrato na solução.

Esses parâmetros são regulados de maneira a evitar ondulações na superfície do substrato, bem como distribuir uniformemente a corrente desejável, de acordo com as variações de carga que são encontradas nestes tanques de revestimento. À medida que a corrente é aplicada, os íons positivos do metal, que estão dissolvidos na solução aquosa, são atraídos pelo cátodo (substrato) carregado negativamente e depositados sobre ele. Para repor os íons positivos do metal que estavam dissolvidos na solução aquosa, o ânodo sofre um processo de oxidação através do fornecimento de íons positivos para a solução aquosa a fim de balancear o potencial iônico da solução [50, 51]. A Figura 13 ilustra todo o mecanismo da eletrodeposição metálica.

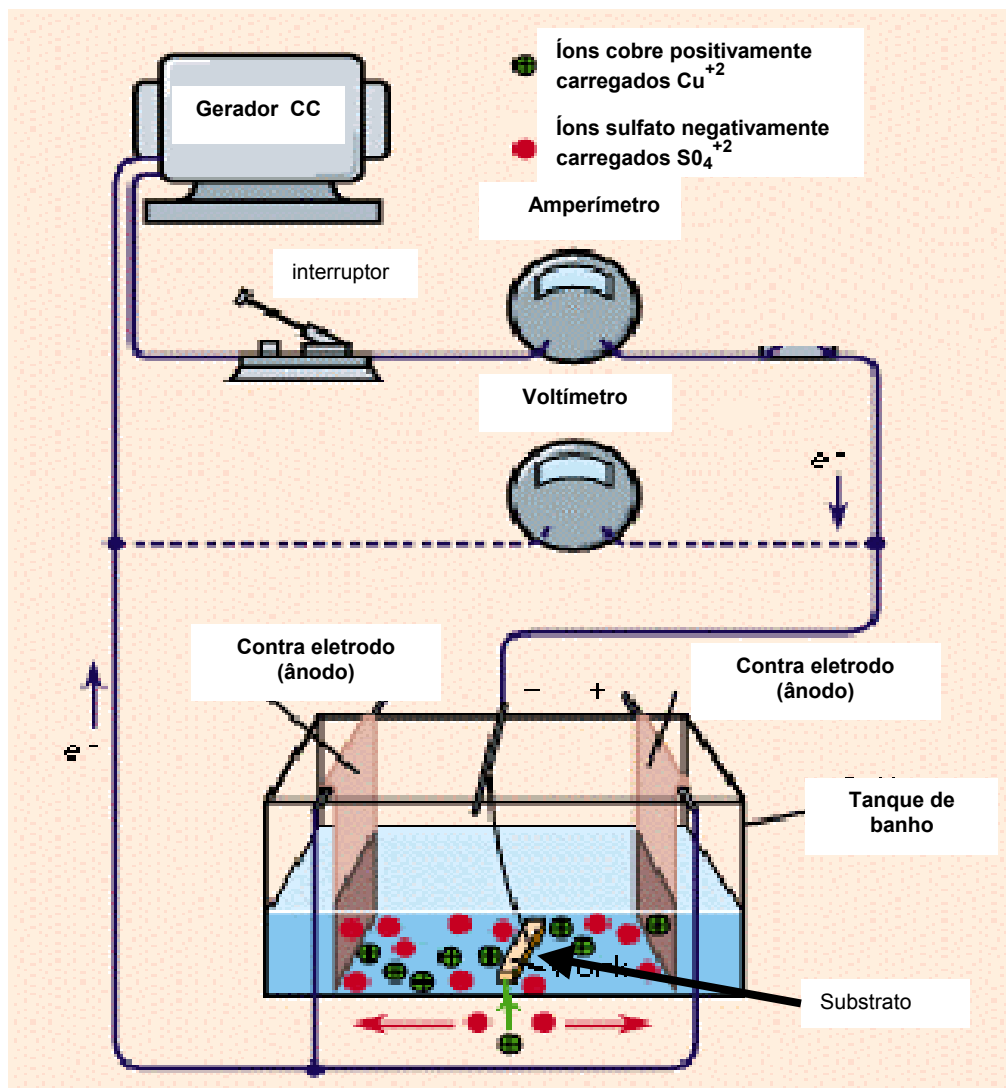


Figura 13 – Esquema do mecanismo de eletrodeposição metálica [51].

O revestimento metálico é governado pela lei de Faraday, que diz que o peso de um revestimento formado em um eletrodo é proporcional à quantidade de corrente conduzida através da célula e que os pesos de diferentes revestimentos produzidos em um eletrodo pela mesma quantidade de corrente são proporcionais aos seus pesos equivalentes.

Um Faraday de carga é equivalente a 1 mol de elétrons liberado pelo ânodo. Por exemplo, no caso do AgNO_3 , 1 mol de Ag ou 107,87g de Ag é depositado quando 1 Faraday de carga percorre a solução aquosa (do ânodo para o cátodo). Para o CuSO_4 ,

$\frac{1}{2}$ mole de Cu ou 31,77g de Cu é depositado quando 1 Faraday percorre a solução aquosa (do ânodo para o cátodo). Portanto, para uma corrente de 100 Ampéres-hora por exemplo, em uma solução de CuSO_4 o revestimento ocorrerá de acordo com a seguinte fórmula:

$$100 \text{ A.h} = 100 \text{ A} \times 60 \text{ min/h} \times 60\text{s/min} \times 1\text{h} \quad \Rightarrow \quad 100 \text{ A.h} = 36 \times 10^4 \text{ coulomb}$$

$$\Rightarrow \quad 100 \text{ A.h} = 36 \times 10^4 \text{ coulomb} / [(96485,34 \text{ coulomb/mol.Faraday}) \times 1 \text{ mol}]$$

$$\Rightarrow \quad 100 \text{ A.h} = 3,73 \text{ Faraday}$$

Conforme citado anteriormente, 1 Faraday depositará 31,77g de cobre, portanto 3,73 Faraday depositará 118,54g de cobre. Baseado na massa do metal depositado, a espessura pode ser calculada para objetos em que a área superficial é conhecida, pois: Massa depositada = Densidade do metal x Área da superfície x Espessura.

Um estudo conduzido por Arthur et al [49] visa a obtenção de eletrodos para máquinas de eletroerosão através da eletrodeposição metálica, em eletrodos produzidos por estereolitografia. A peça de estereolitografia que foi recoberta com a técnica da eletrodeposição de cobre teve a sua espessura limitada em 180 μm (ver Figura 14), uma vez que estudos recentes demonstraram que para valores menores que esta espessura a peça poderá falhar prematuramente. Uma boa adesividade entre o cobre e a peça de resina epóxi foi alcançada, porém a distribuição uniforme do material eletrodepositado é muitas vezes difícil de ser obtida tornando-se um problema para o controle do processo. É recomendável eletrodepositar cobre sobre o níquel químico para melhorar as propriedades mecânicas através da combinação dos dois metais. Devido à sua ductilidade, o cobre adere sobre o níquel químico com boa adesividade servindo, inclusive, como ligação para a etapa seguinte que consiste na eletrodeposição do níquel que se adere fortemente com o cobre e o protege contra a corrosão [49].

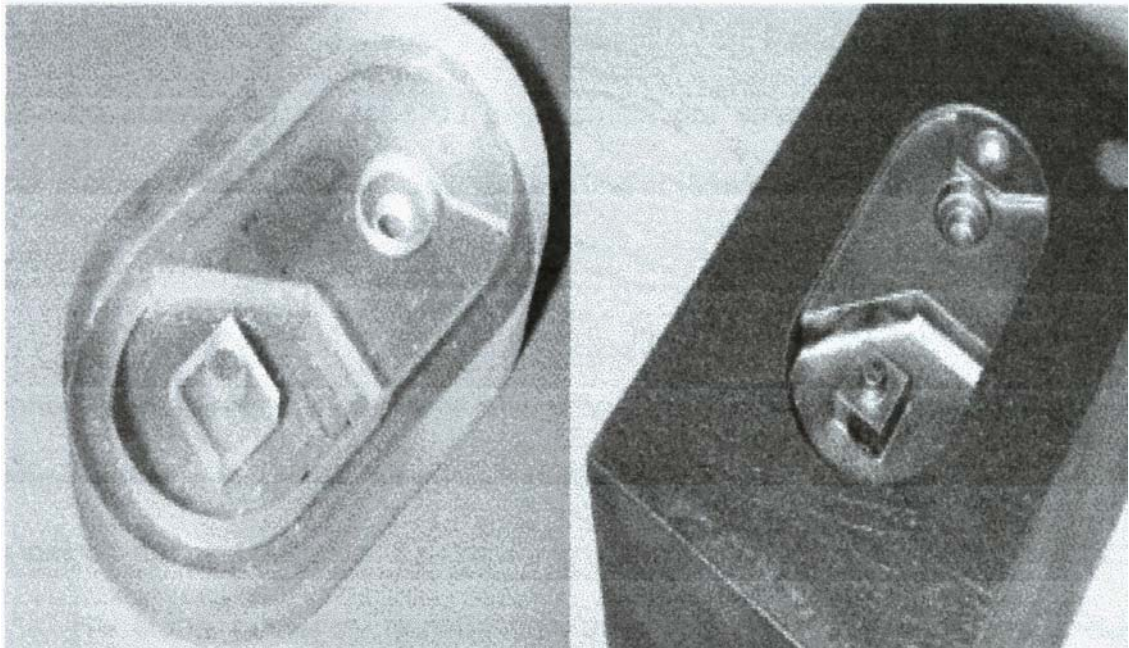


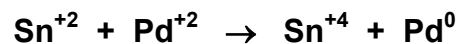
Figura 14 – Peças em resina epóxi obtidas por estereolitografia sem recobrimento (esquerda) e com recobrimento por eletrodeposição de cobre (direita) [52].

2.2.3 Deposição Química

A deposição química consiste no depósito metálico em superfícies metálicas e não-metálicas sem o uso de energia elétrica externa e sem a necessidade de uma pintura metálica anterior - caso o substrato não seja metal - na superfície a ser metalizada [50].

Consiste em uma deposição de um metal no substrato utilizando reações químicas ao invés da eletricidade. Os constituintes básicos de uma solução para a deposição química são a fonte de metal (dissolvida na solução), um redutor, um agente para manter o metal na solução e vários outros componentes químicos intermediários para manter a estabilidade do banho e aumentar a sua vida útil [51]. São utilizados, usualmente, o cobre, níquel e a prata [53].

No caso dos polímeros, onde não há uma superfície condutora, o ataque químico é a primeira etapa do processo de deposição química e tem a função de criar microcavidades na superfície através de agentes oxidantes (ácidos) preparando a sua superfície para a próxima etapa; a sensibilização com paládio [54]. O ataque químico é realizado através da inserção da peça em uma solução contendo ácido sulfúrico e crômico em uma certa temperatura, concentração e período [55, 56]. A próxima etapa inicia o processo de sensibilização, que consiste em um banho de paládio que promove a infiltração do Pd^{+2} nas microcavidades geradas pelo ataque químico [54, 55]. As microcavidades possuem a função de ancoragem física e/ou química do paládio e, conseqüentemente, da camada depositada quimicamente [57]. Na etapa posterior, denominada de processo de ativação, ocorre a deposição química do metal através da redução do Pd^{+2} em Pd^0 pela seguinte equação [54] :



Como o Pd^0 , que está ancorado nas microcavidades, possui uma grande afinidade com os metais, ocorre uma deposição metálica em sua volta criando dessa maneira uma primeira camada metalizada depositada quimicamente. A espessura depositada depende do tipo de metal a ser depositado e pode ser controlada através do tempo de banho na solução aquosa. Essa é a última etapa do processo da deposição química.

Vários estudos têm sido desenvolvidos na área da eletrodeposição em eletrodos fabricados pelo processo de estereolitografia para máquinas de eletroerosão [49, 58, 59]. Esses eletrodos utilizam a deposição química para a obtenção de uma superfície condutora para ser possível, a partir disso, o processo da eletrodeposição. Para as peças de estereolitografia que forem recobertas com a técnica da deposição química, deve-se tomar os devidos cuidados com a sua orientação na hora da deposição

metálica, por exemplo, uma cavidade deverá ficar voltada para cima para que a solução alcance todos os detalhes da mesma [60]. A Figura 15 mostra uma peça em estereolitografia com recobrimento por deposição química de níquel.

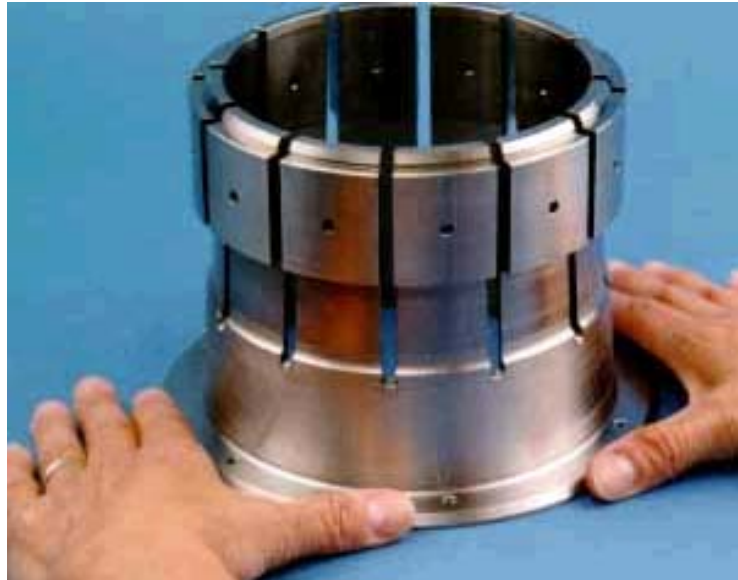


Figura 15 – Peça em resina epóxi obtida pelo processo de estereolitografia com recobrimento por deposição química de níquel [50].

2.2.4 Pintura metálica

A pintura é um termo genérico usado para a aplicação de um fino revestimento metálico superficial em um substrato para fins de decoração, proteção ou propósitos funcionais. Esse revestimento ou película, no estado líquido, constitui-se no agente transportador dos pigmentos que estão dispersos e que darão a cor, opacidade e outras propriedades da tinta quando ocorrer a cura da película [61, 62]. Muitas outras substâncias podem ser adicionadas para incrementar uma propriedade específica da película, tais como secadores para auxiliar na cura da tinta, plastificantes para dar flexibilidade e estabilizadores para diminuir os efeitos de deterioração causados pelo calor e luminosidade [63].

A pintura metálica tem como principal objetivo a obtenção de uma camada condutora em uma superfície não-condutora, tais como plásticos e materiais não-ferrosos [61]. É realizada com o auxílio de uma pistola de pintura (“spray”) ou pincel, e possui como principais vantagens a versatilidade de se obter rapidamente uma superfície condutora, pois a sua aplicação é rápida e simples (Figura 16).

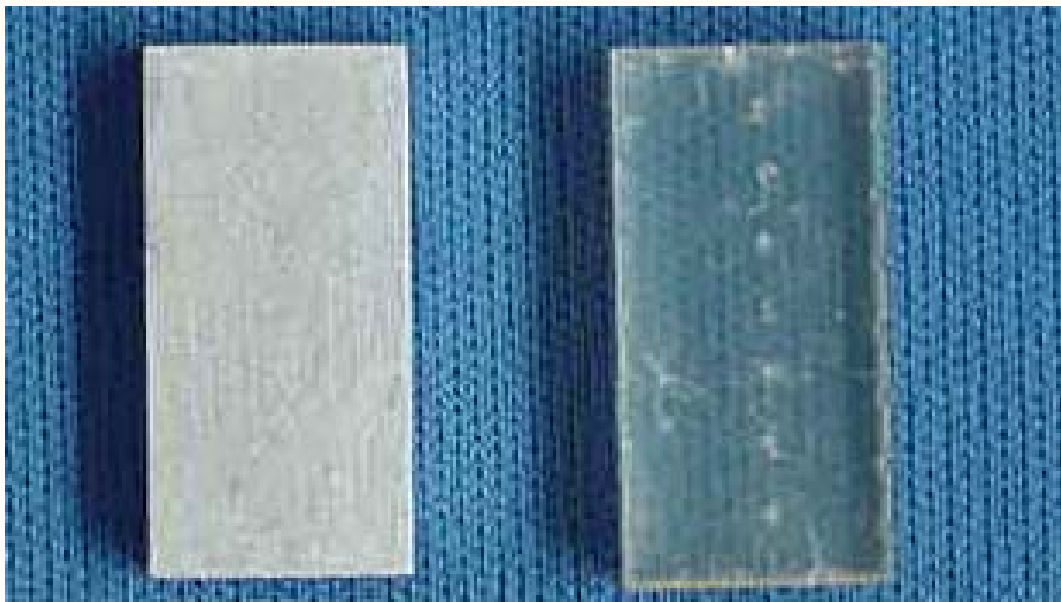


Figura 16 - Peças em resina epóxi obtidas pelo processo de estereolitografia sem recobrimento (direita) e com pintura metálica de prata (esquerda).

2.2.5 Metalização a Vácuo

Metalização a vácuo é uma deposição física e/ou química de um vapor de metal na peça que se deseja metalizar (substrato). O vapor migra através do metal fonte (“target¹”) e condensa na superfície do substrato. Este é um processo onde todas as

¹Possui a função de fornecer o vapor de metal a ser impactado no substrato e está posicionado no interior da câmara de vácuo.

partes que estão localizadas no interior da câmara de vácuo, inclusive o substrato, são recobertas com um filme metálico [64, 65]. Antes da metalização na câmara de vácuo, um pré-tratamento deverá ser considerado para melhorar a adesão entre a camada de metal formada e o substrato, que depende principalmente do material do substrato e do tipo de metal depositado [56].

No caso dos polímeros é realizada uma limpeza na peça a ser metalizada com o auxílio de um pano limpo e seco [66]. A melhor solução é manter a peça limpa após a sua moldagem e metalizá-la o mais breve possível, ou alternativamente armazenar as peças a serem metalizadas em compartimentos limpos e secos [67].

Outro pré-tratamento utilizado para os polímeros consiste em uma descarga luminosa (“glow discharge”) que ocorre no interior da câmara de vácuo na presença de um gás inerte como o Argônio ou o Nitrogênio. Através da aplicação de uma corrente alternada com alta frequência, uma descarga do gás é iniciada e converte o gás, ainda na câmara de vácuo, para o estado ionizado (plasma). Radicais químicos eletricamente neutros, partículas carregadas (íons e elétrons) e radiação ultravioleta reagem na superfície do polímero promovendo o pré-tratamento. Os produtos voláteis oriundos da reação na superfície do polímero são retirados da câmara por uma bomba de vácuo.

Banhos químicos para decapagem (“etching”) da superfície do polímero também são largamente utilizados, promovendo uma superfície rugosa através de pequenas crateras de dimensões micrométricas, onde a camada metalizada poderá aderir fisicamente [52, 56, 68]. Soluções de ácido crômico e sulfúrico podem ser utilizadas para se fazer o pré-tratamento superficial desses polímeros.

Com a etapa do pré-tratamento finalizada parte-se para a metalização a vácuo. Dentre os diversos métodos de metalização a vácuo existentes, dois deles se destacam no campo da metalização dos polímeros. O primeiro consiste na evaporação

térmica que utiliza uma “nuvem atômica” formada pela evaporação do metal fonte na câmara de vácuo através de uma corrente elétrica de grande amperagem, para recobrir todas as superfícies à mostra entre o substrato (neste caso o polímero) e o metal fonte. É utilizado freqüentemente na produção de finas camadas (na faixa de $5\mu\text{m}$) de brilho intenso para fins de decoração. A camada metálica depositada, entretanto, é frágil e não indicada para aplicações de desgaste. O método da evaporação térmica pode utilizar metais como níquel, cromo, alumínio e alguns tipos de ligas [44]. A Figura 17 ilustra um equipamento de metalização a vácuo por evaporação térmica da indústria BOC Edwards [69].

O segundo método, que é o mais difundido e utilizado atualmente para o campo dos polímeros, é a metalização a vácuo por bombardeio (“sputtering”) de átomos do metal fonte sobre o substrato. Tem como principais vantagens a metalização de substratos em uma temperatura relativamente baixa, boa adesão e uniformidade, se comparado com outros métodos, e ideal no caso dos polímeros devido a temperatura de transição vítrea (T_g) ser relativamente baixa em relação a outros materiais [70].



Figura 17 – Equipamento de metalização a vácuo por evaporação térmica [69].

Este método consiste basicamente na criação de um campo elétrico entre o substrato, que funciona como a ligação terra, e um eletrodo negativo, que é o metal fonte. Esse campo elétrico é gerado por um equipamento de alta voltagem e faz com que o gás presente na câmara de vácuo fique ionizado. Normalmente é utilizado o gás Argônio ou mais recentemente o Xenônio [69]. As partículas do gás ionizado, carregadas positivamente, são atraídas pela carga negativa do metal fonte. Devido à grande aceleração dessas partículas, elas chocam-se no metal fonte e transferem energia para os átomos do metal fonte que, por sua vez, se desprendem do mesmo e são atraídos pelo substrato. Este funciona como a ligação terra, iniciando-se um bombardeio de átomos na superfície do substrato, promovendo um recobrimento metálico com o material original do metal fonte [64, 65]. Um equipamento de metalização a vácuo por bombardeio (“sputtering”) de átomos pode ser observada na Figura 18 [69].

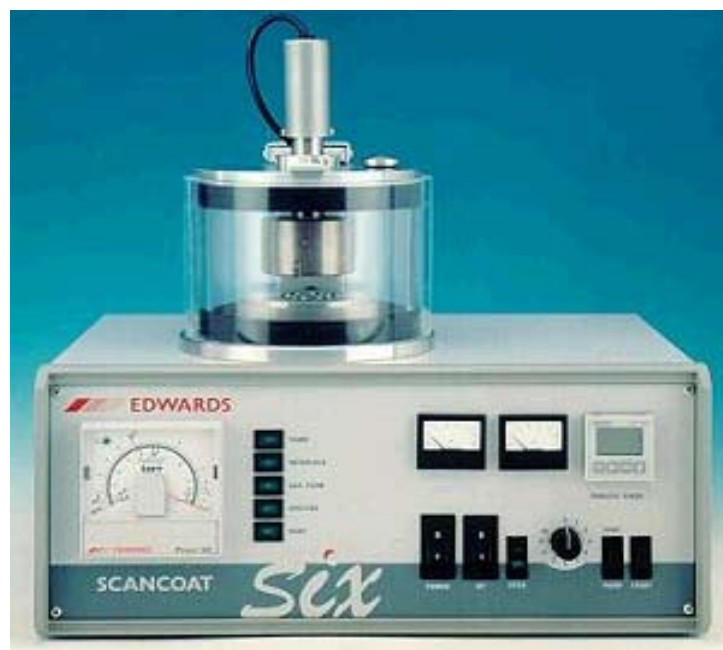


Figura 18 – Equipamento de metalização a vácuo por bombardeio de átomos [69].

2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DA METALIZAÇÃO SUPERFICIAL PARA ACABAMENTO EM MOLDES CONFECCIONADOS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA

A obtenção de insertos (parte do ferramental que forma a região moldante) de moldes fabricados a partir do processo de estereolitografia, vem se beneficiando das vantagens das tecnologias para metalização superficial através de pesquisas e utilização no método direto e no método indireto de obtenção de insertos [53, 71].

O método direto consiste na fabricação geométrica do inserto (também denominada negativo da peça) diretamente em resina epóxi utilizando, neste caso, a máquina de estereolitografia. O inserto obtido por esse método, sem o uso da metalização superficial da região moldante, fornece uma ferramenta que é classificada como “soft tooling”, pois a quantidade de moldagens que podem ser produzidas por esse tipo de inserto dificilmente alcança mais que 500 ciclos. Com a utilização da metalização superficial no inserto procura-se obter um prolongamento da vida útil da ferramenta.

A metalização superficial no método direto consiste na combinação de duas técnicas de metalização superficial; a deposição química (item 2.2.3) e a eletrodeposição (item 2.2.2). Primeiramente ocorre a deposição química de níquel sobre o inserto para deixar a sua superfície condutora, sobre essa superfície condutora é realizada uma eletrodeposição de cobre e, posteriormente, uma eletrodeposição de níquel. Após isso ocorre o preenchimento da parte anterior do inserto com material adequado (massa epóxi ou metal com baixo ponto de fusão) e montagem no porta moldes para a injeção plástica [72, 73]. A Figura 19 ilustra esquematicamente os passos descritos da metalização superficial no método direto.

A empresa REPLIFORM COMPANY [74] vem utilizando a combinação de duas técnicas de metalização superficial para a obtenção de insertos pelo método indireto, que consiste em fabricar na máquina de estereolitografia a peça a ser moldada (também denominada positivo da peça) com algumas modificações geométricas [73, 74]. Na peça é realizada uma montagem com duas máscaras, geralmente de alumínio, que são fixadas ao longo de sua borda. Sobre o conjunto peça e máscara é aplicada uma pintura metálica (item 2.2.4) à base de tinta prata com o objetivo de deixar a superfície condutora. Após a pintura metálica é iniciada a eletrodeposição de cobre em espessuras de 2 a 4 mm [74] e, posteriormente, o conjunto máscara e peça são separados, onde a máscara, agora, tem fixado junto a ela uma casca de cobre. A etapa seguinte assemelha-se ao método direto; é preenchido a parte anterior da máscara e montado no porta moldes para a injeção de plástico.

Dependendo do método pode-se produzir centenas a milhares de ciclos, justificando a denominação de “bridge tooling” a este método de fabricação de moldes, por ser esta uma quantidade de ciclos menor que o número alcançado pelos moldes denominados de “hard tooling²”. A Figura 20 ilustra esquematicamente os passos descritos da metalização superficial no método indireto.

² As ferramentas denominadas “hard tooling” são obtidas por usinagem, normalmente utilizando aços, e podem produzir milhares a milhões de ciclos.

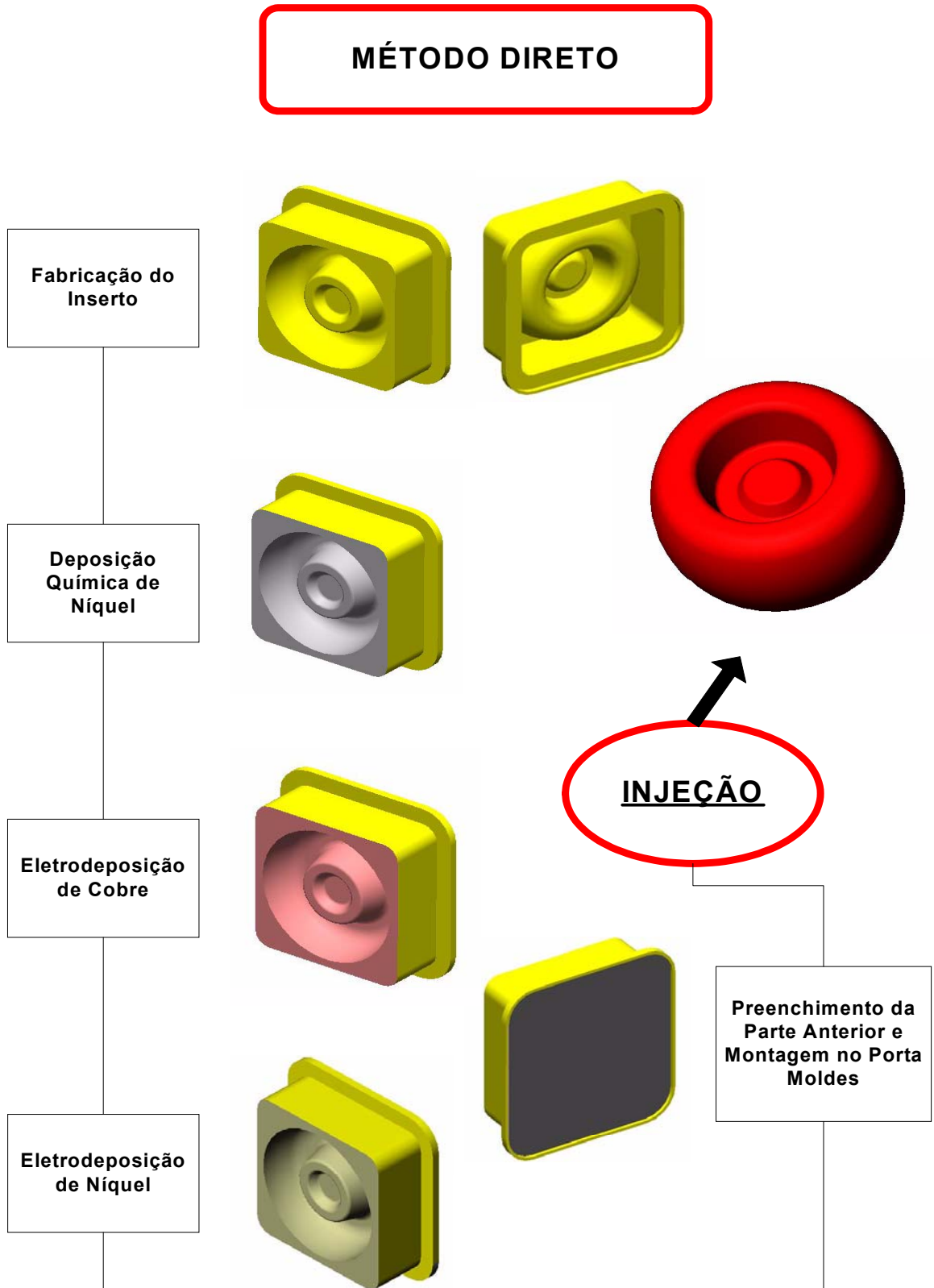


Figura 19 – Esquema do método direto utilizando duas técnicas de metalização superficial.

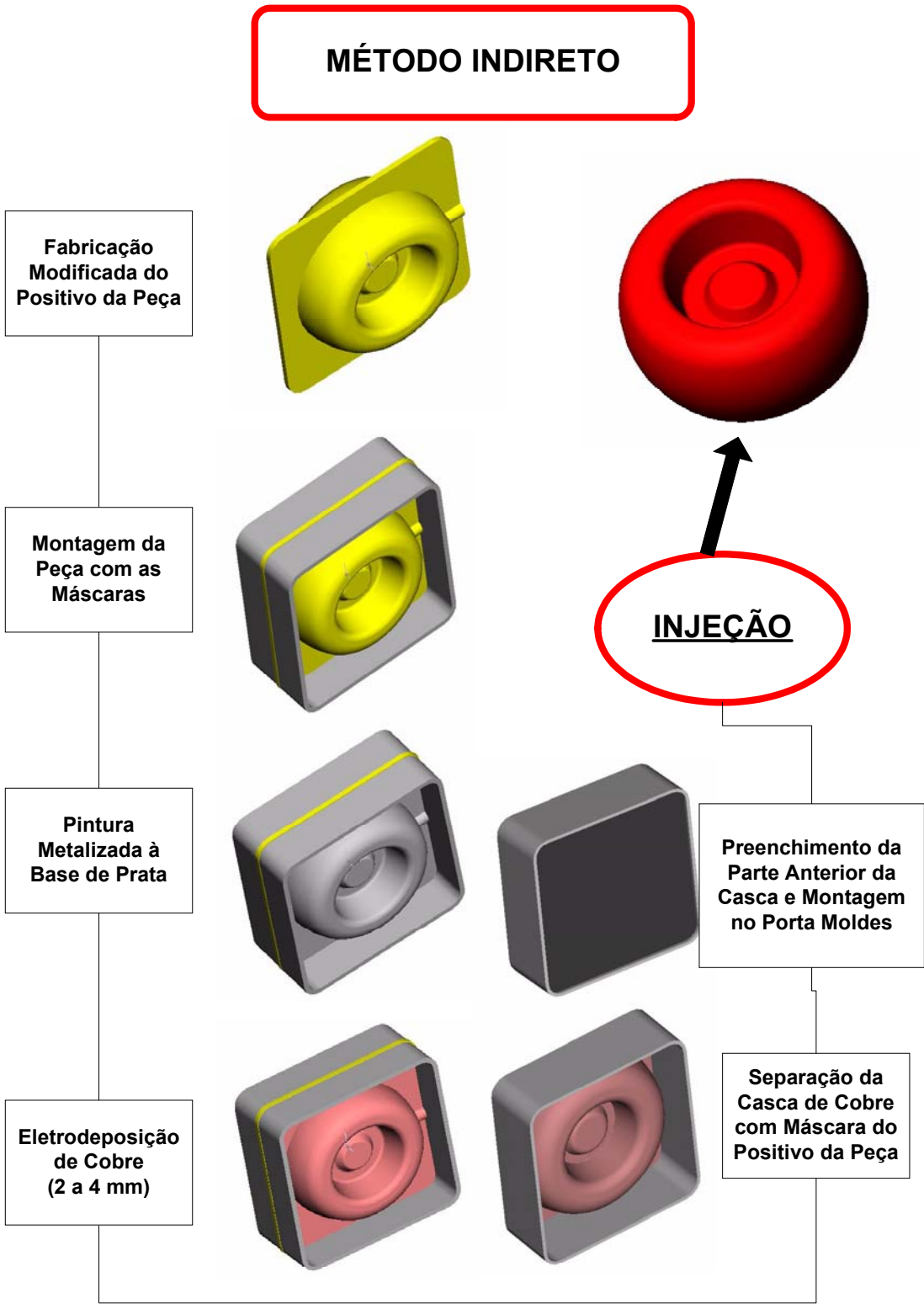


Figura 20 – Esquema do método indireto utilizando duas técnicas de metalização superficial [adaptado de 74].

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para atingir os objetivos desta dissertação foi realizado inicialmente um experimento preliminar e posteriormente foram desenvolvidos mais quatro experimentos complementares (descritos no Capítulo 4), cujos objetivos foram estabelecidos com base nos resultados obtidos do experimento preliminar.

Com exceção do experimento preliminar, que foi realizado com a infraestrutura de equipamentos e material disponível na empresa Boreal Tratamentos de Superfície, sediada na cidade de Joinville, os demais experimentos foram desenvolvidos utilizando-se os equipamentos e materiais disponíveis nas instalações do Laboratório de Efeito Mossbauer e do Laboratório de Filmes Finos e Superfícies, ambos localizados no Departamento de Física da UFSC, e nas instalações do Laboratório de Materiais (LABMAT) e Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), ambos localizados no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Uma parte dos materiais utilizados nos experimentos foi doada à Universidade Federal de Santa Catarina pela empresa ATOTECH, através de uma parceria com o Laboratório CIMJECT.

As amostras dos experimentos foram modeladas utilizando-se o software de CAD Solidworks e fabricadas em resina epóxi SOMOS 7110 utilizando a máquina de estereolitografia SLA 250-30A ajustada previamente e automaticamente pelo equipamento, através do software 3D Lightyear, com os valores padrões utilizados nos parâmetros de fabricação do equipamento (valores típicos encontram-se descritos em [14, 75]).

Estes softwares e o equipamento de estereolitografia utilizados fazem parte dos disponíveis no Laboratório de Projeto e Fabricação de Componentes de Plástico Injetados (CIMJECT) localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

3.2 OBJETIVOS

Tendo em consideração a inexistência de qualquer experiência prévia por parte dos laboratórios envolvidos nesta pesquisa, em relação às possibilidades de metalizar satisfatoriamente peças fabricadas pelo processo de estereolitografia, foi realizado inicialmente este experimento preliminar.

O experimento preliminar, realizado junto às instalações da empresa Boreal, especializada na metalização superficial de peças em plástico ABS, teve por objetivo identificar na prática as principais etapas do processo de metalização que, neste caso, utiliza as técnicas de deposição química (item 2.2.3) e eletrodeposição metálica (item 2.2.2), bem como identificar importantes parâmetros do processo a serem melhor avaliados, em função de sua possível influência na qualidade da superfície metalizada.

3.3 PROCEDIMENTOS E RESULTADOS

Foram confeccionadas duas peças iguais (denominada amostras) que possuem uma reentrância (A), uma protuberância (B), uma superfície principal (C) e ângulos de saída (“draft angles”) de 3°, representando, simplificada, geometrias típicas de peças e insertos obtidos pelo processo de estereolitografia [76] (Figura 21).

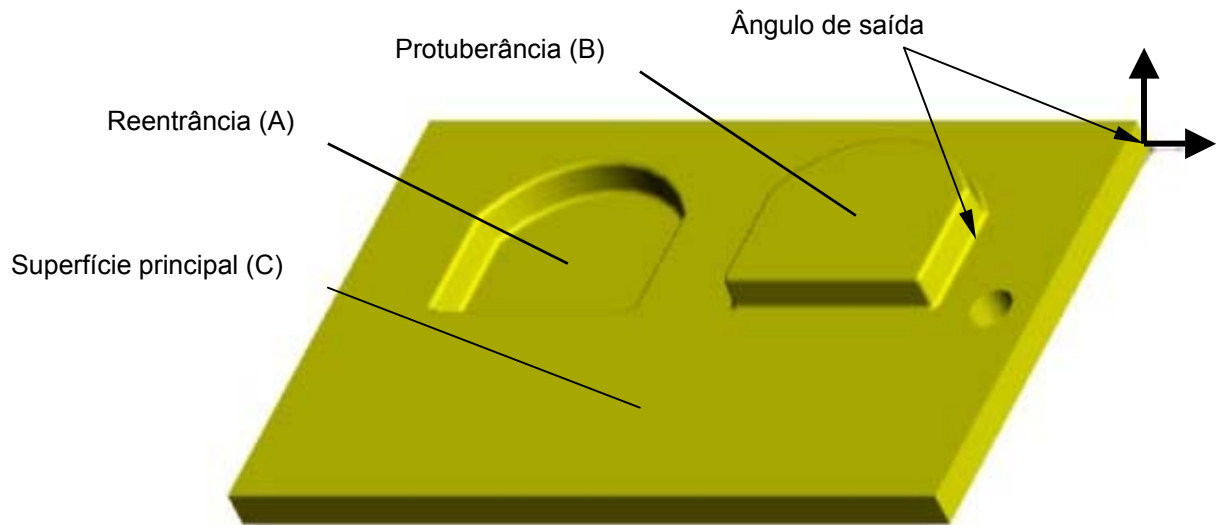


Figura 21 – Modelagem de uma amostra confeccionada para o experimento preliminar.

Nenhum acabamento superficial foi realizado sobre as duas amostras confeccionadas. Somente a retirada manual dos suportes, limpeza das amostras e pós-cura em forno ultravioleta foram realizados, segundo os procedimentos recomendados por Gomide [14].

Posteriormente, as duas amostras foram submetidas às etapas de metalização superficial na empresa Boreal (Tabela 5) abrangendo os processos de deposição química e eletrodeposição.

No processo da deposição química de níquel sobre a amostra, foi observado visualmente, com auxílio de um engenheiro químico da empresa ATOTECH, que o ataque químico (etapa 1.a, da Tabela 5) não foi realizado eficientemente, provavelmente devido aos valores inadequados de rugosidade apresentadas pela superfície principal (letra C da Figura 21) das amostras.

Tabela 5 – Etapas da metalização superficial realizada na empresa Boreal.

1. DEPOSIÇÃO QUÍMICA DE NÍQUEL	
Etapas	Observações
1.a - Ataque Químico	Foram utilizadas as duas amostras em uma solução sulfocrômica durante 35 min. a 60°C.
1.b - Lavagem	Lavagem com água corrente e secagem com flanela.
1.c - Sensibilização	Banho de paládio durante 15 min.
1.d - Ativação	Deposição do níquel durante 12 min.
2. ELETRODEPOSIÇÃO	
Etapas	Observações
2.a - Eletrodeposição de Cobre	Eletrodeposição de cobre em somente uma amostra durante 17 min.
2.b - Eletrodeposição de Níquel	Eletrodeposição de níquel na amostra anterior em 12 min.

Apesar do ineficiente ataque químico foi dado prosseguimento ao processo. O resultado da última etapa (etapa 1.d, da Tabela 5) referente à deposição química de níquel nas amostras pode ser observado na Figura 22.

São observadas, em ambas as vistas, manchas escuras decorrentes da ineficiência do ataque químico, onde não foi promovida uma boa ancoragem do paládio na superfície da amostra e, conseqüentemente, do níquel químico (item 2.2.3).

O processo seguinte consistiu na eletrodeposição de cobre em somente uma amostra e, posteriormente, a eletrodeposição de níquel, que finalizou a metalização superficial na empresa Boreal.

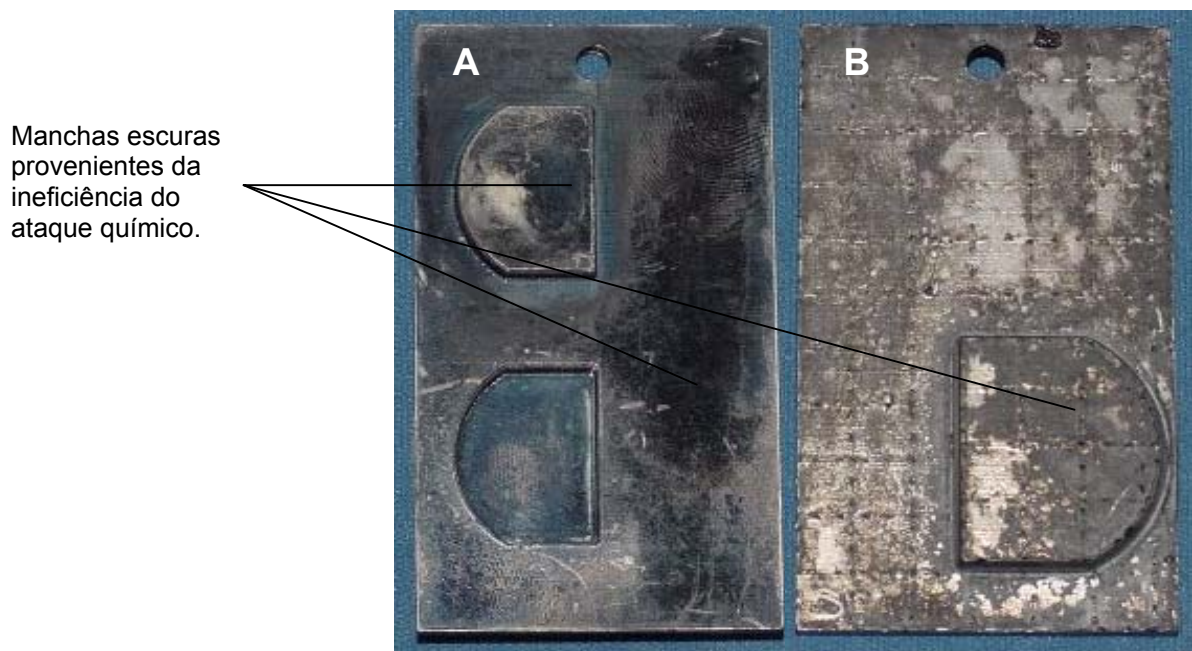


Figura 22 - Amostra com recobrimento de níquel por deposição química: vista superior (A) e vista inferior (B).

A Figura 23 ilustra a amostra após a última etapa do processo que consiste na eletrodeposição de níquel (etapa 2.b, da Tabela 5).

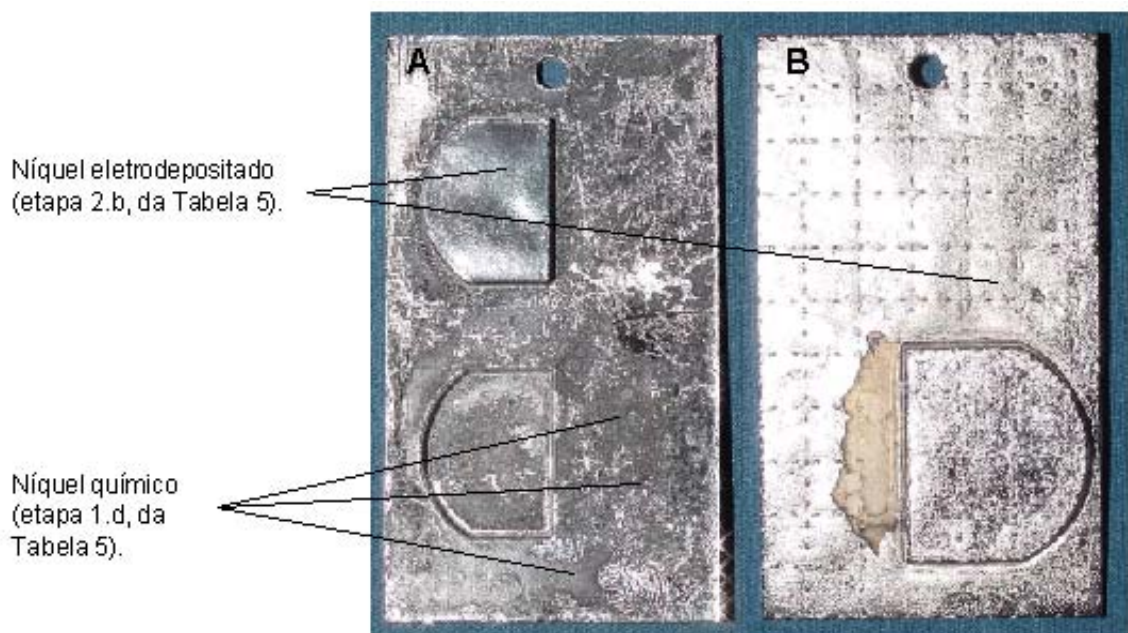


Figura 23 – Amostra com recobrimento de níquel eletrodepositado: vista superior (A) e vista inferior (B).

Pode ser observado que nas duas vistas o recobrimento do níquel eletrodepositado não está uniforme e possui várias falhas deixando transparecer a camada referente ao níquel químico. Na vista inferior (B) a camada de níquel eletrodepositada possui uma uniformidade melhor, porém com uma fraca adesão.

Provavelmente, devido à vista inferior (B) possuir uma rugosidade maior que a vista superior (A), pois os suportes que auxiliaram na confecção da amostra na máquina de estereolitografia estavam localizadas nessa superfície, ocorreu um melhor ataque químico em relação à superfície principal (letra C da Figura 21) da amostra, levando a uma melhor deposição química de níquel e, conseqüentemente, a um melhor recobrimento superficial na eletrodeposição de cobre e níquel. Visando dispor de valores de referência (utilizados no item 5.2.3) para o tempo de fabricação desta amostra, que consiste desde a sua modelagem no CAD até a obtenção completa da camada metalizada após a última etapa (etapa 2.b, da Tabela 5), foram cronometradas as etapas do processo (Tabela 6).

Tabela 6 – Tempo utilizado pelas etapas do processo e o tempo total.

LEGENDA	PRINCIPAIS ETAPAS	MINUTOS
1	Modelagem Amostra CAD	50
2	3D LIGHTYEAR	45
3	Máquina estereolitografia	183
4	Forno UV	60
5	Acabamento Superficial	0
6	Ataque Químico	35
7	Sensibilização	15
8	Ativação	12
9	Eletrodeposição de cobre	17
10	Eletrodeposição de níquel	12
TOTAL		429

Conforme apresentado na Tabela 6, a confecção da amostra (item 3 da Tabela 6) levou, aproximadamente, o dobro de tempo necessário para se realizar a completa metalização superficial sobre a amostra (itens 5 a 10 da Tabela 6), ou seja, o tempo utilizado pelo processo completo da metalização superficial não influiu, demasiadamente, no tempo total da Tabela 6.

O experimento preliminar revelou as principais etapas do processo da metalização superficial, bem como os parâmetros mais importantes do processo a serem melhor avaliados, tais como: ataque químico, acabamento superficial e rugosidade; e foi fundamental para definir os procedimentos dos experimentos complementares.

4. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS COMPLEMENTARES

4.1 ESCOPO DA PESQUISA

Com o objetivo de buscar um aprofundamento dos conhecimentos sobre a metalização em peças obtidas pelo processo de estereolitografia, foram realizados quatro experimentos complementares; o primeiro experimento consistiu na confecção de peças (corpos de ensaio) sobre as quais foram realizados diversos tipos de operações de acabamento superficial antes do processo de metalização. No segundo e terceiro experimento complementar foram realizadas metalizações superficiais em peças com as mesmas dimensões e características da amostra (Figura 21) metalizada na empresa Boreal (item 3.3). O quarto experimento complementar consistiu em uma primeira aplicação do processo da metalização superficial para a obtenção de insertos em cobre pelo método indireto, que foi detalhadamente descrito no item 2.3.

4.2 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 1

4.2.1 Objetivos Específicos

Um dos objetivos específicos foi realizar junto aos laboratórios da UFSC, o processo de metalização superficial que foi empregado na empresa Boreal, no sentido de obter um maior entendimento e domínio dos dois processos de metalização superficial envolvidas, quais sejam: a deposição química e a eletrodeposição.

Neste sentido, para melhor avaliar os parâmetros definidos pelo experimento preliminar (item 3.3), foi definido aplicar sobre os corpos de ensaio diferentes

acabamentos superficiais, mostrados na Tabela 7, procurando identificar o tipo mais adequado para a primeira etapa do processo da deposição química do níquel, que consiste na importante etapa do ataque químico.

Tabela 7 – Acabamentos superficiais aplicados nos corpos de ensaio.

Acabamento Superficial	Quantidade	Observações
Sem Acabamento	02	Pós-processamento padrão seguindo as recomendações de Gomide [14].
Lixamento # 100	03	Lixa com costado de papel.
Lixamento # 220	03	Lixa com costado de papel.
Lixamento # 400	03	Lixa com costado de papel.
Lixamento # 600	03	Lixa com costado de papel.
Jateamento	03	Foram utilizados esferas de vidro.

4.2.2 Procedimentos

Para analisar os diferentes acabamentos superficiais da Tabela 7, foram medidas as rugosidades R_a e R_z (letra E do item 2.1.2) utilizando um rugosímetro manual Mitutoyo SJ 201 com apalpador mecânico, conforme normas padrões, disponível no laboratório LMP. Para auxiliar na análise foi utilizado um microscópio óptico, modelo NEOPHOT 30, disponível no laboratório LABMAT.

O microscópio óptico analisou os corpos de ensaio após o término de três procedimentos (análises descritas no item 5.1.1) e que caracterizam os principais parâmetros revelados pelo experimento preliminar (item 3.3), quais sejam: análise após

o acabamento superficial, após o ataque químico e após a deposição química de níquel.

Adicionalmente, foi utilizado um multímetro (fabricante: Dower, modelo DM 1010) para a medição da resistência ôhmica da camada metalizada após a etapa da deposição química de níquel. A medição da resistência ôhmica (item 5.1.1) foi uma importante ferramenta que auxiliou nas decisões sobre a qualidade da superfície metalizada, decidindo, inclusive, sobre a continuidade dos corpos de ensaio para as próximas etapas da metalização superficial, que diz respeito ao processo da eletrodeposição. Ao término da última etapa da eletrodeposição, foram realizados testes de adesão (item 5.1.2).

Para o primeiro experimento complementar foi definida uma geometria simples, plana e de pequenas dimensões (20 mm X 10 mm X 2 mm), porém, suficiente para a aplicação da metalização superficial. Foram confeccionadas um total de dezessete peças (denominados de corpos de ensaio) como as visualizadas na Figura 24.

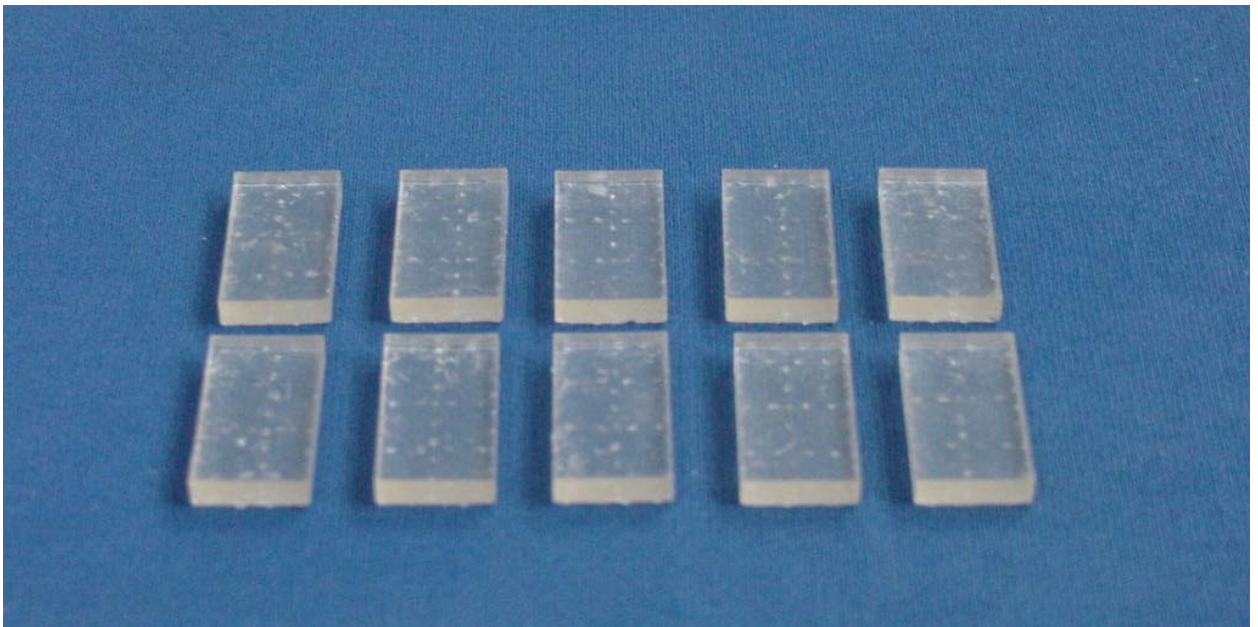


Figura 24 – Corpos de ensaio confeccionados na máquina de estereolitografia e utilizados para o experimento complementar 1.

Os corpos de ensaio foram submetidos ao processo de deposição química de níquel e ao processo de eletrodeposição de cobre e níquel, conforme descrito a seguir.

4.2.3 Deposição Química de Níquel

Em função dos resultados ineficientes obtidos no experimento preliminar, as etapas da Tabela 5 (item 3.3) relativas à metalização superficial realizadas na empresa Boreal foram modificadas, seguindo recomendações da empresa ATOTECH [57]. A Tabela 8 mostra as etapas adicionais (etapas novas) sendo que a etapa de Sensibilização da Tabela 5 foi dividida em duas etapas denominadas Ativação I e Ativação II respectivamente, enquanto que a etapa Níquel Químico da Tabela 8 refere-se à etapa Ativação da Tabela 5.

Tabela 8 – Etapas referentes à deposição química de níquel realizada no Laboratório de Efeito Mossbauer da UFSC [57].

1. DEPOSIÇÃO QUÍMICA DE NÍQUEL	
Etapas	
1.a - Ataque Químico	1.f - Ativação I (Sensibilização)
1.b – Lavagem de Recuperação	1.g - Lavagem
1.c – Neutralização (etapa nova)	1.h – Ativação II (Sensibilização)
1.d - Lavagem	1.i - Lavagem
1.e – Pré-ativação (etapa nova)	1.j – Níquel Químico (Ativação)

A Tabela 9 fornece as concentrações de cada produto químico para a preparação da solução sulfo-crômica utilizada na etapa 1.a da Tabela 8.

Tabela 9 – Concentrações recomendadas para preparação da solução sulfo-crômica [57].

ETAPA	PRODUTO QUÍMICO	CONCENTRAÇÃO
ATAQUE QUÍMICO	Ácido Sulfúrico Q.P. ³	400 ml/l
	Ácido Crômico	400 ml/l
	Humectante Cr® ⁴	2,0 – 4,0 ml/l

A quantidade produzida da solução sulfo-crômica foi de 51ml, e os produtos foram dissolvidos em água deionizada e bidestilada.

A foto da Figura 25 ilustra o momento do ataque químico, realizado no Laboratório de Efeito Mossbauer, em quatro corpos de ensaio (indicados pelo número 1 na foto); dois com acabamento em lixa #100 e dois com acabamento em lixa #220.

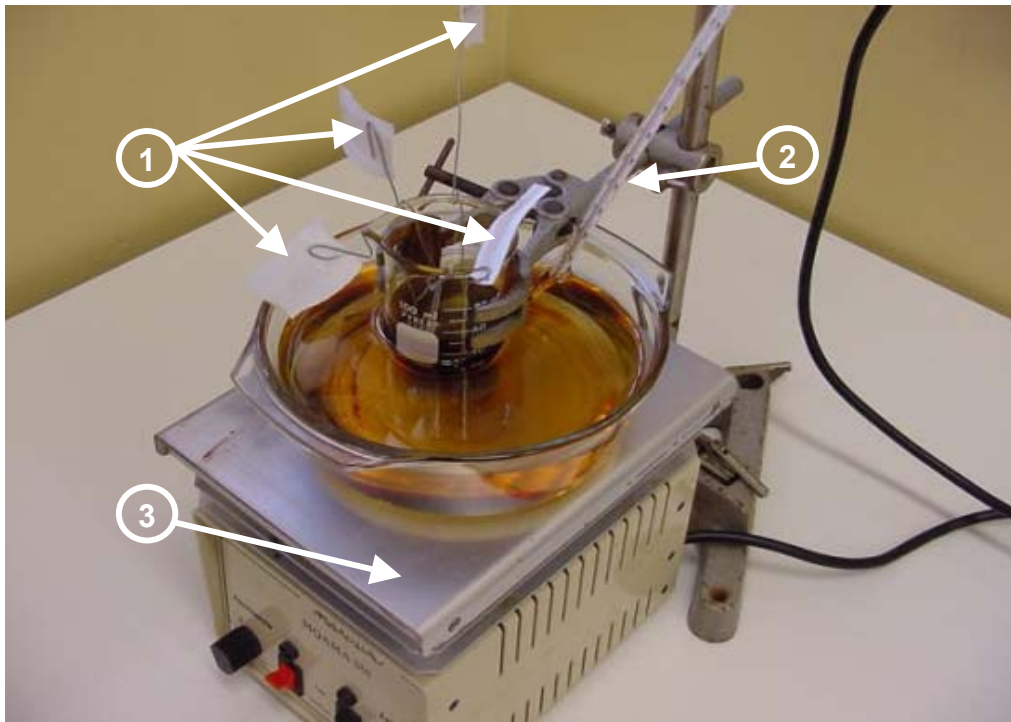


Figura 25 – Ataque químico realizado no laboratório de Física.

³ Q.P. = Quimicamente Puro

⁴ O Humectante Cr® é um produto utilizado para prevenir a formação de vapores [44].

A solução sulfo-crômica foi aquecida em banho de óleo até a temperatura de 65°C com o auxílio de um aparelho de aquecimento, indicado pelo número 3 na foto (fabricante: Micro Química, modelo MQAMA 301), sendo que temperatura foi medida com um termômetro, indicado pelo número 2 na foto (termômetro de coluna de mercúrio). O ataque químico foi realizado, para este corpo de ensaio, em 30 min. segundo as recomendações de Luan et al [55].

Após o ataque químico os corpos de ensaio receberam uma lavagem de recuperação (etapa 1.b, da Tabela 8) com água corrente. Posteriormente iniciaram-se as etapas de neutralização (etapa 1.c, da Tabela 8) e pré-ativação (etapa 1.e, da Tabelas 8), intercaladas por outra etapa de lavagem (etapa 1.d, da Tabela 8), neste caso, com água deionizada e bidestilada. As etapas de neutralização e pré-ativação consistiram em lavar os corpos de ensaio à temperatura ambiente com os produtos e concentrações indicados pela Tabela 10.

Tabela 10 – Produtos utilizados nas etapas de neutralização e pré-ativação [57].

ETAPA	PRODUTO QUÍMICO	CONCENTRAÇÃO
NEUTRALIZAÇÃO	Bissulfito de Sódio	20 g/l
PRÉ-ATIVAÇÃO	Ácido Clorídrico	300 ml/l

A Figura 26 ilustra as soluções utilizadas nessas etapas. Primeiramente, os corpos de ensaio foram mergulhados na solução de neutralização durante 45 s [57] (indicado pelo número 1 na foto) para reduzir qualquer resíduo de cromo hexavalente remanescente, indesejável por ser nocivo ao meio ambiente. Depois os corpos de ensaio seguiram para a lavagem com água deionizada e bidestilada (indicado pelo número 2 na foto).

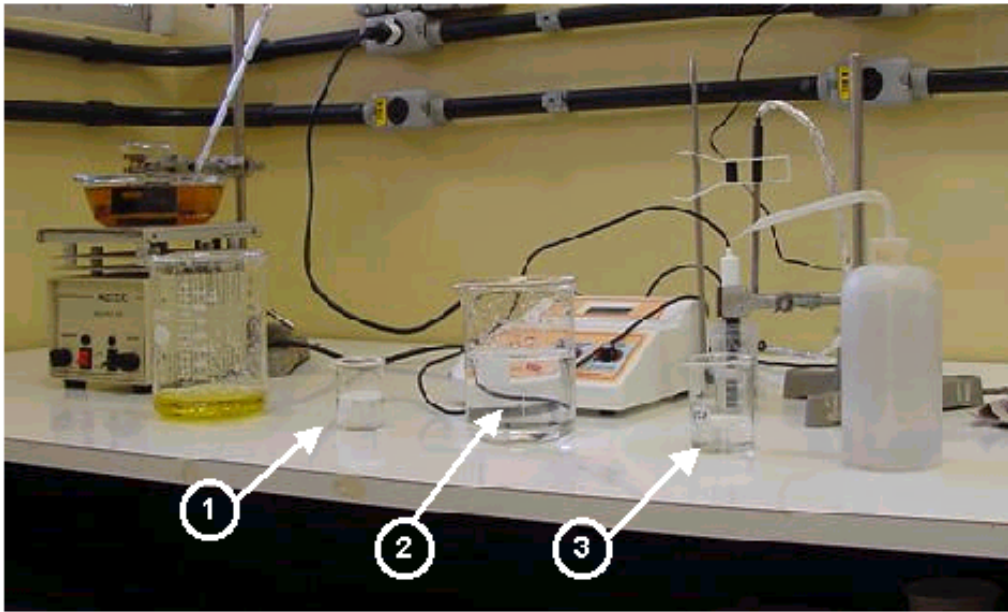


Figura 26 – Etapas de neutralização (1) e pré-ativação (3) com uma lavagem intermediária em água deionizada e bidestilada (2).

Dando prosseguimento, os corpos de ensaio foram mergulhados na solução de pré-ativação (etapa 1.e, da Tabela 8) durante o tempo de 1 min. [57] (indicado pelo número 3 na foto). A etapa de pré-ativação tem a função de evitar a diluição e contaminação da solução da etapa seguinte, que consistiu no Ativador Noviganth AK I® (etapa 1.f, da Tabela 8). Este ativador é um catalisador ácido com alta concentração de paládio e deve ser usado logo após a etapa de pré-ativação sem lavagem intermediária. A Tabela 11 fornece as concentrações recomendadas de cada produto químico para a preparação da solução Ativador Noviganth AK I®.

Tabela 11 - Concentrações recomendadas para preparação da solução Ativador Noviganth AK I® [57].

ETAPA	PRODUTO QUÍMICO	CONCENTRAÇÃO
ATIVAÇÃO I	Ativador Noviganth AK I®	20 – 25 ml/l
	Ácido Clorídrico Q.P.	300 ml/l

A Figura 27 mostra um recipiente com quatro fios metálicos ligados em cada corpo de ensaio separadamente (indicado pelo número 1 na foto), e que foram mergulhados na solução Ativador Noviganth AK I®. Os corpos de ensaio permaneceram durante 10 min. [57] na solução e foram retirados e lavados com água deionizada e bidestilada durante 30 s (etapa 1.g, da Tabela 8).

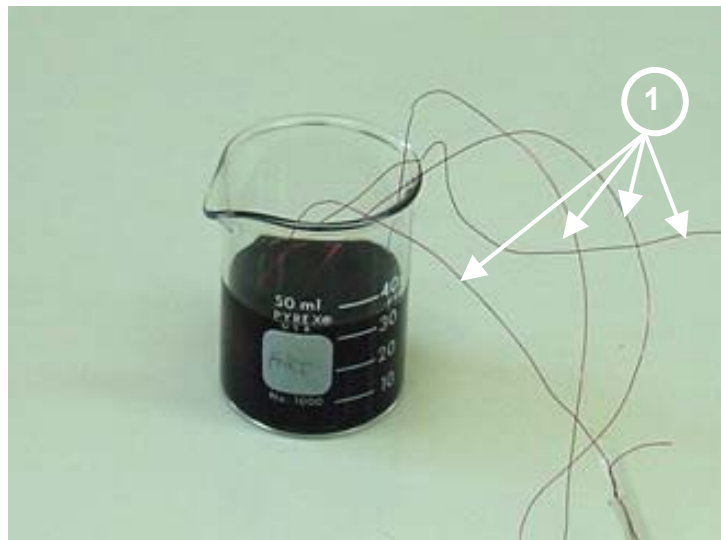


Figura 27 – Corpos de ensaio mergulhados na solução Ativador Noviganth AK I®.

Após a lavagem, os corpos de ensaio foram mergulhados na solução Ativador Noviganth AK II® (etapa 1.h, da Tabela 8) em uma concentração recomendada conforme a Tabela 12.

Tabela 12 – Concentração recomendada para a preparação da solução Ativador Noviganth AK II® [57].

ETAPA	PRODUTO QUÍMICO	CONCENTRAÇÃO
ATIVACÃO II	Ativador Noviganth AK II®	100 g/l

A solução Ativador Noviganth AK II® tem a função de fixar o paládio na superfície. O tempo de permanência dos corpos de ensaio na solução foi de 60 s [57]. A Figura 28 mostra dois corpos de ensaio (indicados pelo número 1 na foto) mergulhados na solução Ativador Noviganth AK II® com um sistema de insuflação de ar gerado por uma pequena bomba elétrica, indicado pelo número 2 na foto (fabricante: Rebello & Ferreira, modelo ouro).

O número 3 indicado na foto mostra o aparelho utilizado para aquecer a solução em um banho de óleo até a temperatura de 45°C. Novamente, após a retirada dos corpos de ensaio da solução Ativador Noviganth AK II®, foi feita uma lavagem (etapa 1.i, da Tabela 8) com água deionizada e bidestilada durante 30 s [57].

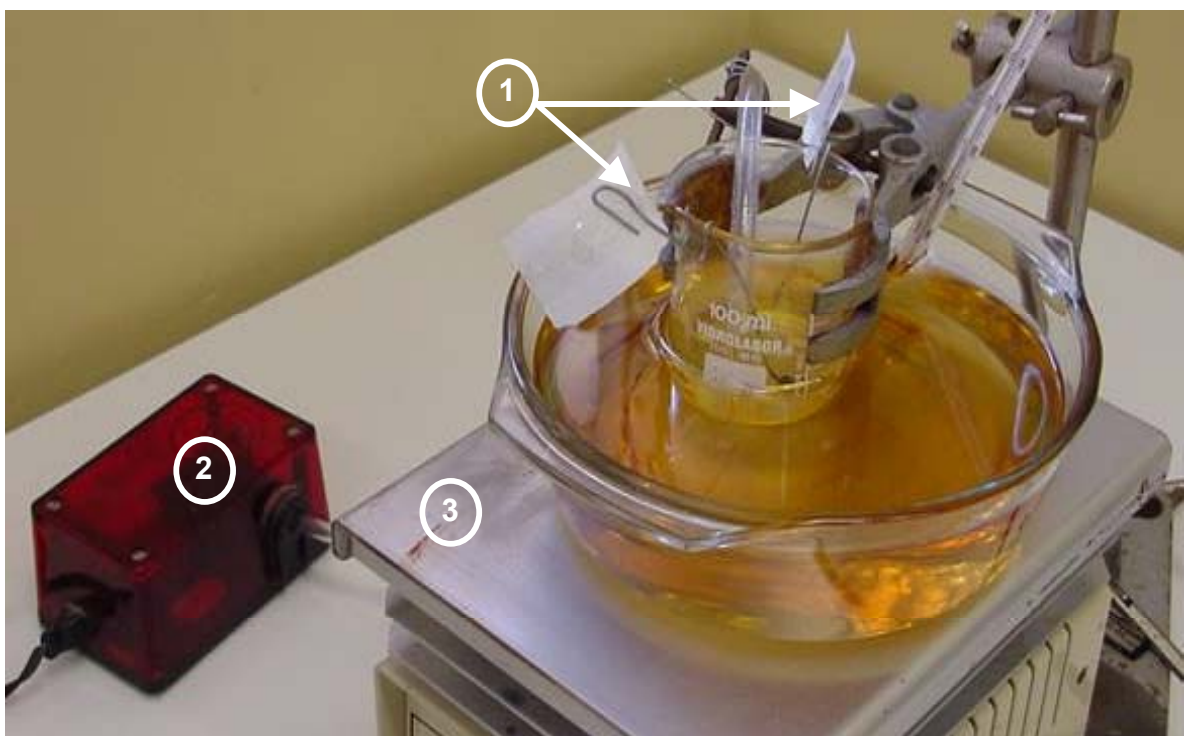


Figura 28 - Corpos de ensaio mergulhados na solução Ativador Noviganth AK II®.

A última etapa do processo da deposição química, denominada níquel químico (etapa 1.j, da Tabela 8) consistiu em mergulhar os corpos de ensaio na solução Noviganth AK®. A Tabela 13 fornece as concentrações recomendadas de cada produto químico para a preparação da solução Noviganth AK®.

Tabela 13 – Concentrações recomendadas para preparação da solução Noviganth AK® [57].

ETAPA	PRODUTO QUÍMICO	CONCENTRAÇÃO
NÍQUEL QUÍMICO	Noviganth Ni AK® Parte A	60 ml/l
	Noviganth Ni AK® Parte B	60 ml/l
	Noviganth Ni AK® Parte C	65 ml/l

Para a preparação da solução recomenda-se colocar no recipiente 70% da quantidade total de água deionizada e bidestilada calculada para a solução. Adicionar sob agitação o Noviganth Ni AK® Parte C e após a total dissolução, colocar o Noviganth Ni AK® Parte A e o Noviganth Ni AK® Parte B sob agitação e completar a solução com o restante da água deionizada e bidestilada [57].

Após a montagem da solução Noviganth AK® de acordo com a Tabela 13, os corpos de ensaio foram mantidos na solução durante 17 min. [57]. Nesta etapa, visualizada na Figura 29, foi utilizado um sistema de insuflação a ar (indicado pelo número 1 na foto) e um aparelho para aquecimento da solução em banho de óleo (indicado pelo número 2 na foto). A temperatura da solução foi mantida em 50°C através do auxílio de um termômetro.

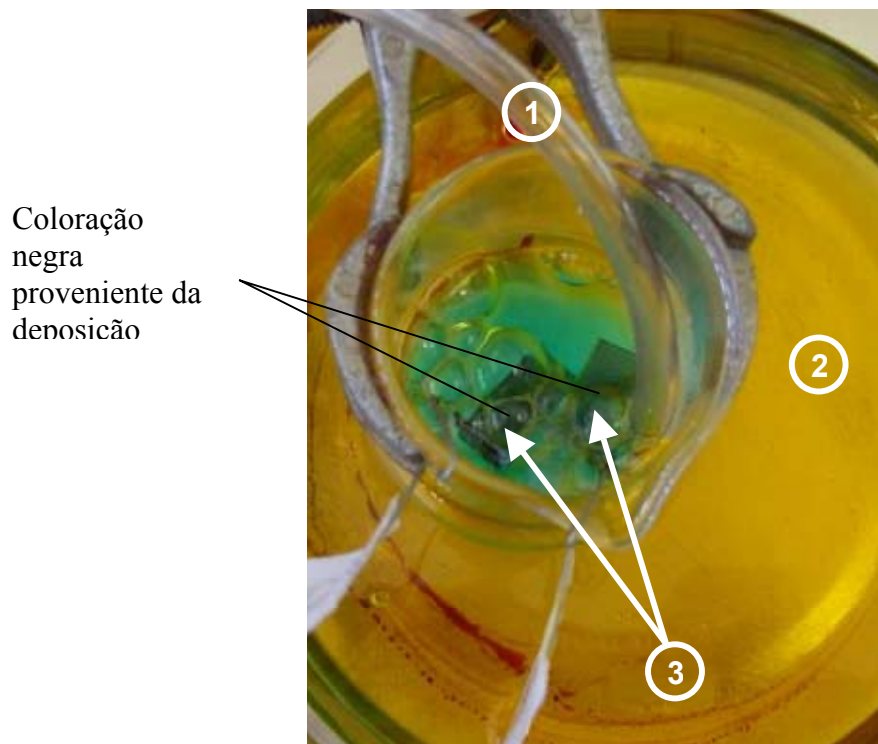


Figura 29 – Corpos de ensaio mergulhados na solução Noviganth AK®.

Nos dois corpos de ensaio (indicados pelo número 3 na foto), que permanecem mergulhados na solução Noviganth AK®, pode-se notar a deposição química do níquel através da coloração negra que ocorreu em suas superfícies.

4.2.4 Eletrodeposição de Cobre e Níquel

Finalizada a deposição química de níquel nos corpos de ensaio, teve início o segundo processo da metalização superficial, que consistiu na eletrodeposição de cobre e níquel. Com base nos resultados fornecidos pelas análises dos corpos de ensaio, apenas dois se apresentaram adequados para a eletrodeposição (ver resultados no item 5.1.1). A primeira etapa da eletrodeposição consistiu na eletrodeposição de cobre sobre o níquel químico da etapa anterior. A Tabela 14

fornece as concentrações recomendadas de cada produto químico para a preparação da solução CUPRACID 300®⁵ utilizada no experimento.

Tabela 14 - Concentrações recomendadas para preparação da solução CUPRACID 300® [57].

ETAPA	PRODUTO QUÍMICO	CONCENTRAÇÃO
ELETRODEPOSIÇÃO DE COBRE	Sulfato de Cobre (II) Penta Hidratado	200 – 240 g/l
	Ácido Sulfúrico Q.P.	50 – 65 g/l
	Ácido Clorídrico ou Cloreto de Sódio Q.P.	0,1 g/l
	Abrilhantador Cupracid 300®	2,3 – 3,5 g/l
	Nivelador Cupracid 300®	0,4 – 0,6 g/l
	Humectante Cupracid 300®	2,5 – 3,5 g/l

Na preparação de 250 ml de solução CUPRACID 300®, o sulfato de cobre foi dissolvido em 2/3 da quantidade total requerida de água deionizada e bidessdilada. Para acelerar a dissolução, a água foi aquecida a 45°C e colocada sobre um agitador magnético (fabricante: Quimis, modelo Q-261-2) conforme mostra a Figura 30.

Após a total dissolução do sulfato foi adicionado o ácido sulfúrico. A temperatura do banho neste momento foi mantida em 30°C. A solução foi complementada com a adição do ácido clorídrico, Abrilhantador Cupracid 300®, Nivelador Cupracid 300®, Humectante Cupracid 300® e 1/3 restante da água deionizada e bidestilada [57].

⁵ Nome comercial da solução química usada para o processo de eletrodeposição de cobre.



Figura 30 – Solução contendo sulfato de cobre sendo dissolvido em água deionizada e bidestilada agitada magneticamente e aquecida até 45°C.

Uma barra de cobre fosforoso foi usinada no Laboratório LMP, e teve a função de servir como contra-eletrodo da solução (Figura 31).

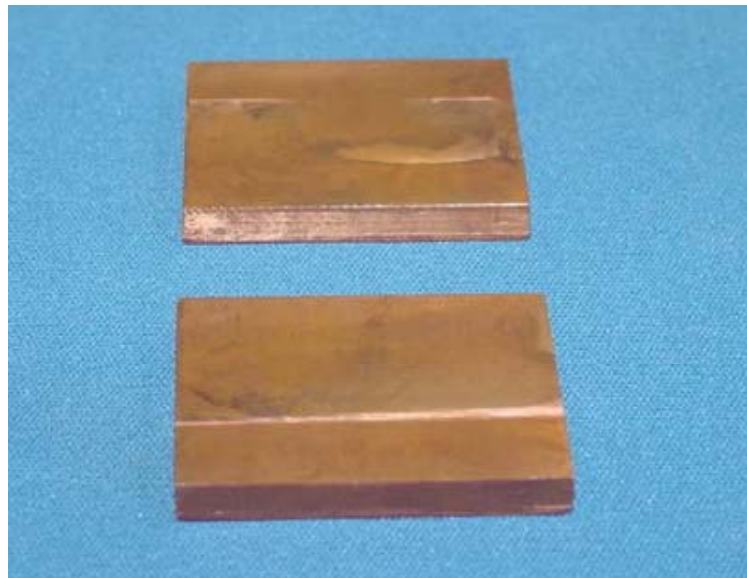


Figura 31 – Contra-eletrodo em cobre fosforoso usinado no Laboratório LMP e utilizado na solução CUPRACID 300®.

Finalizada a preparação da solução CUPRACID 300®, teve início a preparação da solução da segunda etapa da eletrodeposição, que consistiu na eletrodeposição de níquel sobre o cobre da eletrodeposição anterior. A Tabela 15 fornece as concentrações recomendadas de cada produto químico utilizado para a preparação da solução Níquel Brilhante®⁶.

Tabela 15 - Concentrações recomendadas para preparação da solução Níquel Brilhante® [57].

ETAPA	PRODUTO QUÍMICO	CONCENTRAÇÃO
ELETRODEPOSIÇÃO DE NÍQUEL	Sulfato de Níquel (NiSO ₄ .6H ₂ O)	250 – 300 g/l
	Cloreto de Níquel (NiCl ₂ .6H ₂ O)	40 – 60 g/l
	Ácido Bórico	40 – 45 g/l
	Abrilhantador Supreme Plus®	1,0 g/l
	Nivelador A-5®	30 – 50 g/l
	Humectante NP-A® (agitação a ar)	4,0 g/l

Para a preparação de 250 ml da solução Níquel Brilhante®, foi aquecida 40% da quantidade total requerida de água deionizada e bidesdilada até a temperatura de 75°C. Primeiramente foi adicionado o ácido bórico, e para acelerar a dissolução foi utilizado o agitador magnético. Após a dissolução total do ácido bórico foi adicionado à solução o cloreto e o sulfato de níquel sob agitação vigorosa e constante.

A quantidade restante de água deionizada e bidestilada (60%) foi acrescida à solução; juntamente com o Abrilhantador Supreme Plus®, Nivelador A-5® e o humectante NP-A®, respectivamente, de acordo com as recomendações da ATOTECH

⁶ Nome comercial da solução química usada para o processo de eletrodeposição de níquel.

[57]. Uma barra de níquel foi usinada no Laboratório LMP, e teve a função de servir de contra-eletródo da solução. O contra-eletródo em níquel utilizado na solução Níquel Brilhante® está na Figura 32.



Figura 32 – Contra-eletródo em níquel usinado no Laboratório LMP e utilizado na solução Níquel Brilhante®.

A preparação dos dois corpos de ensaio consistiu basicamente na colagem de cada corpo de ensaio em uma chapa de alumínio, que serviu para a condução de corrente elétrica até o corpo de ensaio em questão; para isso foi utilizada uma cola condutora denominada cola prata. Depois da colagem na chapa de alumínio, o conjunto é colocado em uma estufa durante 30 min. para secagem da cola prata conforme ilustrado pela Figura 33, onde são observados dois corpos de ensaio (indicados pelo número 1 da foto).

Posteriormente foi montada uma máscara em torno do corpo de ensaio utilizando uma fita de dupla face. Esta máscara possui a função de delimitar a área do corpo de ensaio a ser eletrodepositada e evitar a contaminação da solução pela cola prata e pela chapa de alumínio.

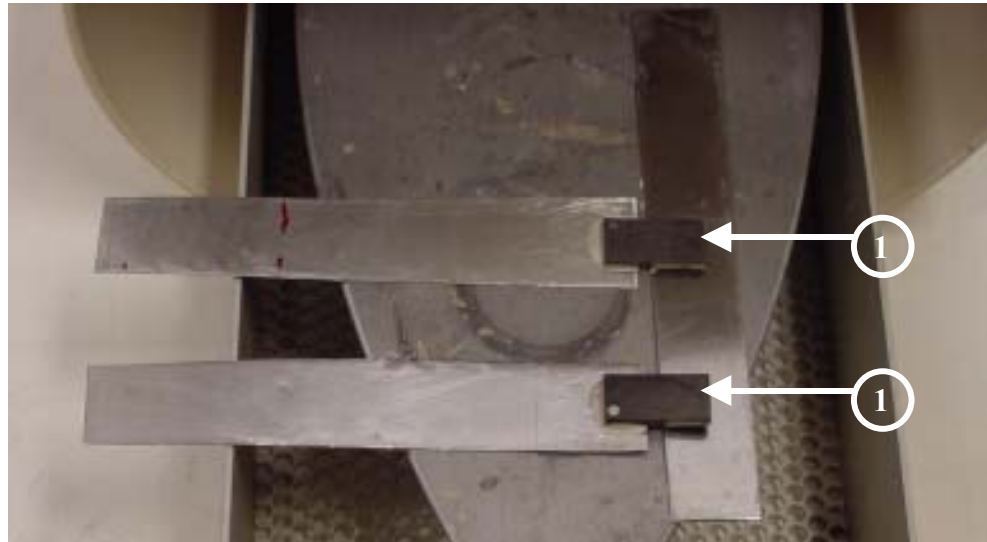


Figura 33 – Dois corpos de ensaio na estufa para secagem da cola prata.

Com os corpos de ensaio devidamente colados em suas respectivas chapas de alumínio e com as máscaras feitas, foi realizada a eletrodeposição. O processo de eletrodeposição adota um sistema galvanométrico onde a corrente elétrica é mantida constante através da variação da tensão nominal [51, 57]. O potenciostato (fabricante: EG & G, modelo 362) que ilustra a Figura 34, disponível no Laboratório de Filmes Finos e Superfícies, foi utilizado para o processo da eletrodeposição.



Figura 34 – Potenciostato utilizado no processo de eletrodeposição.

As Tabelas 16 e 17 fornecem as condições recomendadas de operação durante a eletrodeposição para ambas as soluções [57]. Com esses dados foi possível controlar o processo e fazer a estimativa da espessura depositada de cada metal. A primeira etapa da eletrodeposição consistiu na deposição do cobre. A corrente calculada, de acordo com a velocidade de deposição e a área do corpo de ensaio a ser eletrodepositada, registrou um valor de 1,13 mA, e a espessura almejada de 3 μm exigiu um tempo de aproximadamente 4 min. e 30 s.

Tabela 16 - Condições recomendadas de operação durante a eletrodeposição de cobre [57].

CUPRACID 300®	
Temperatura do banho	20 - 30°C. Ideal 24 -28°C
pH	Não necessita controle
Densidade de corrente catódica (eletrodo)	1,1 – 6,5 A/dm ²
Densidade de corrente anódica (contra-eletrodo)	0,5 – 2,7 A/dm ²
Taxa de deposição	0,7 $\mu\text{m}/\text{min}$ com 3 A/dm ²
Tensão	2,0 – 6,0 V

Tabela 17 - Condições recomendadas de operação durante a eletrodeposição de níquel [57].

Níquel Brilhante®	
Temperatura do banho	50 - 70°C. Ideal 55°C
PH	3,8 – 4,6
Densidade de corrente catódica (eletrodo)	3,0 – 6,0 A/dm ²
Densidade de corrente anódica (contra-eletrodo)	Menor que 2,5 A/dm ²
Taxa de deposição	0,7 $\mu\text{m}/\text{min}$ com 3 A/dm ²
Tensão	6,0 – 10,0 V

Após a finalização da eletrodeposição de cobre foi iniciada a eletrodeposição de níquel, através do enxágüe do corpo de ensaio (com água deionizada e bidestilada) para não contaminar a solução de níquel e a troca do contra-eletrodo. A corrente foi mantida em 1,13 mA e a espessura almejada de 3,5 μm exigiu um tempo de aproximadamente 5 min. A apresentação e discussão dos resultados são descritos no Capítulo 5.

4.3 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 2

4.3.1 Objetivos Específicos

O segundo experimento complementar teve como objetivo realizar as etapas de metalização superficial para a mesma amostra (Figura 21, item 3.3) utilizada no experimento preliminar (Capítulo 3). Porém, neste caso, foram levadas em consideração as recomendações baseadas nos melhores resultados obtidos do primeiro experimento complementar, relativamente ao tipo de operação de acabamento das superfícies dos corpos de ensaio confeccionados pelo equipamento de estereolitografia (Tabela 7, item 4.2.2). O objetivo deste experimento é comprovar visualmente uma melhor qualidade das amostras metalizadas se comparadas às metalizadas junto à empresa Boreal (experimento preliminar), sem aumentar significativamente os tempos de fabricação (Tabela 6, do item 3.3).

4.3.2 Procedimentos

Os mesmos procedimentos descritos no item 3.3 foram repetidos para a confecção de duas amostras, em resina epóxi SOMOS 7110, pela máquina de estereolitografia. Os acabamentos superficiais aplicados nas duas amostras foram baseados nos resultados obtidos do primeiro experimento complementar (descritos no item 5.1.1). Uma das amostras confeccionadas pelo processo de estereolitografia pode ser observada na Figura 35.



Figura 35 – Amostra confeccionada pelo processo de estereolitografia e utilizada no segundo experimento complementar.

O processo da deposição química seguiu as mesmas etapas descritas no item 4.2.3, e os valores utilizados para este experimento constam da Tabela 18. As figuras 36 a 39 ilustram as principais etapas do processo da deposição química de níquel que foram aplicadas às duas amostras deste segundo experimento complementar.

Tabela 18⁷ – Valores utilizados no processo da deposição química de níquel para o experimento complementar 2.

ETAPA	PRODUTO UTILIZADO	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (minutos)
Ataque Químico	Sulfo-crômico	65 - 75	43
Lavagem	Água deionizada e bidestilada	ambiente	1
Neutralização	Bissulfito de sódio	ambiente	1
Lavagem	Água deionizada e bidestilada	ambiente	1
Pré-ativação	Ácido clorídrico	ambiente	1
Ativação I	Ativador Noviganth AK I	ambiente	17
Lavagem	Água deionizada e bidestilada	ambiente	1
Ativação II	Ativador Noviganth AK II	40 - 45	1
Lavagem	Água deionizada e bidestilada	ambiente	1
Níquel Químico	Noviganth Ni AK	30 - 45	85
Lavagem	Água deionizada e bidestilada	ambiente	1
Secagem	-	ambiente	-

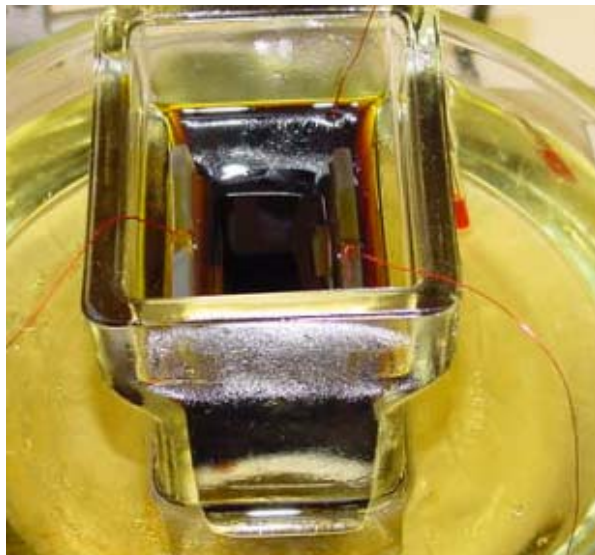


Figura 36 – Ataque químico aplicado nas amostras.

⁷ Os dados completos para a preparação de cada etapa estão descritos no item 4.2.3.

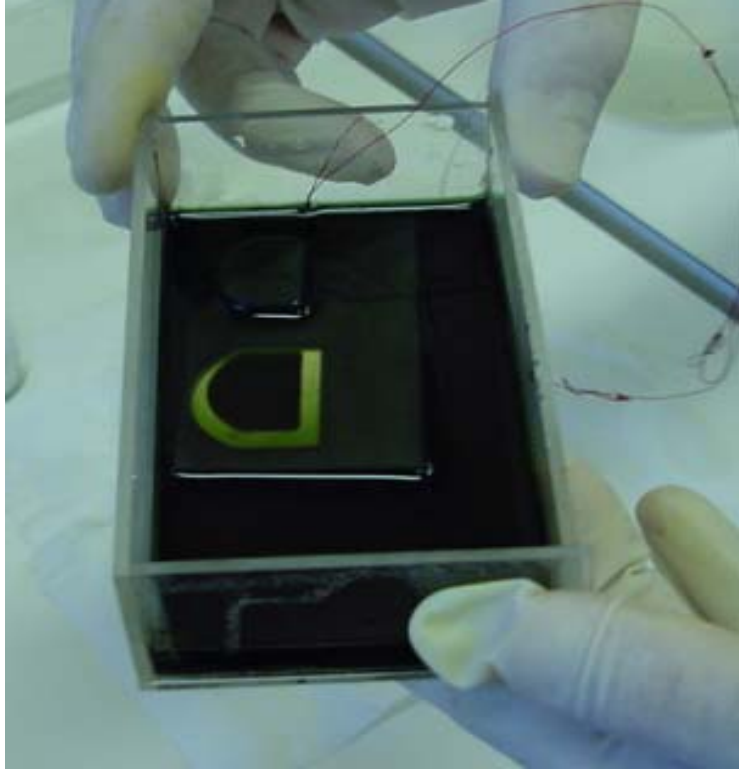


Figura 37 – Ativador Novigant AK I aplicado na amostra.

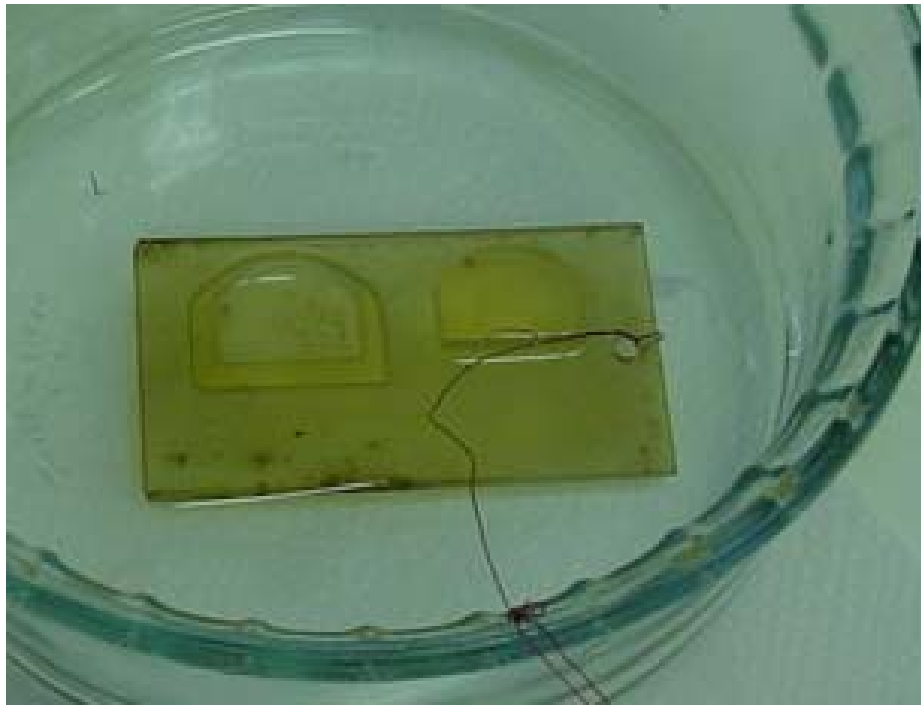


Figura 38 – Ativador Novigant AK II aplicado na amostra.

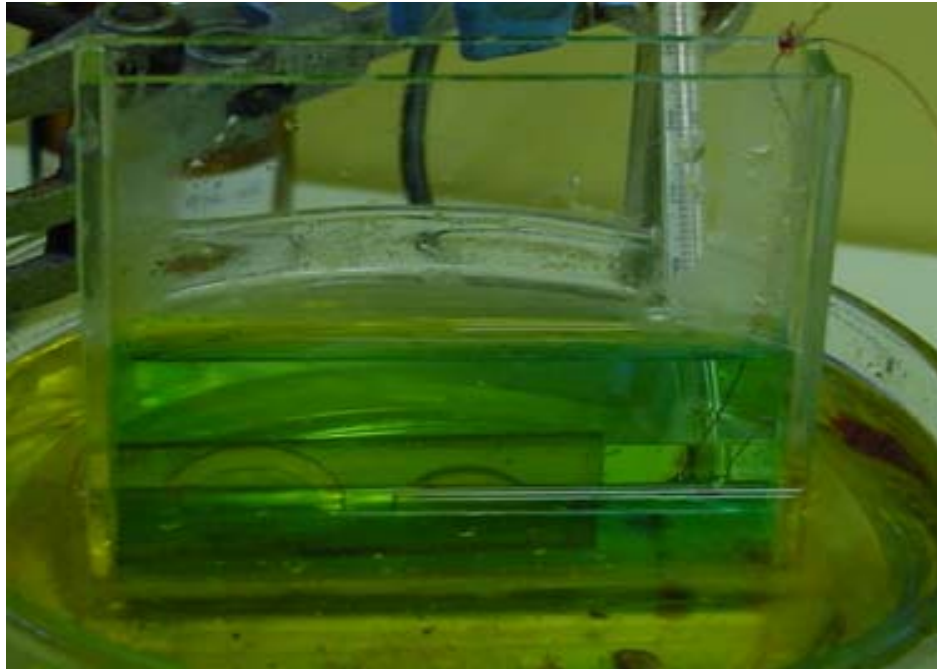


Figura 39 – Noviganth Ni AK referente à última etapa do processo.

Após o término do processo da deposição química de níquel, teve início o processo da eletrodeposição de acordo com os procedimentos descritos no item 4.2.4. As soluções utilizadas nas etapas da eletrodeposição foram as mesmas do primeiro experimento complementar (item 4.2).

Para a realização do último processo da metalização superficial foram confeccionados dispositivos para fixar a amostra e o contra-eletrodo de maneira que as substituições pudessem ser efetuadas rapidamente, sem a necessidade de colar as amostras com cola prata e criar as máscaras que foram utilizadas no primeiro experimento complementar (item 4.2.4).

O dispositivo, baseado na solda de dois prendedores metálicos (indicado pelo número 1 na foto) em suas respectivas placas de alumínio, é mostrado na Figura 40.

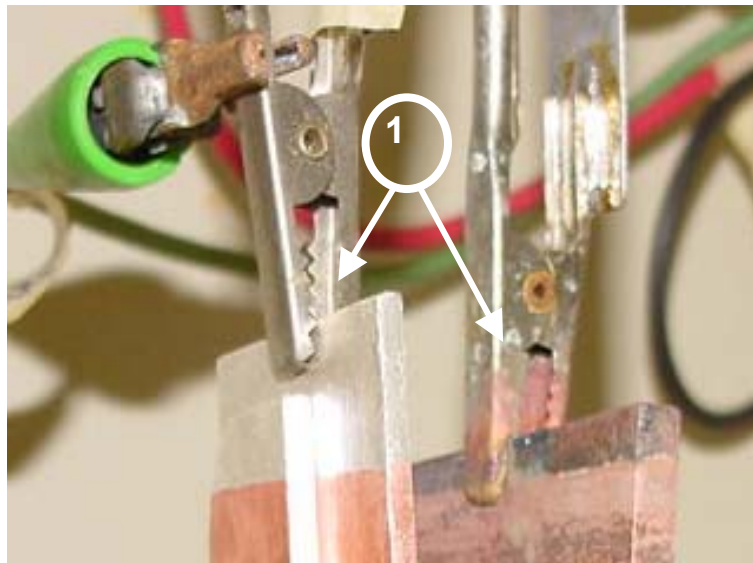


Figura 40 – Dispositivo criado para facilitar a troca da amostra e contra-eletrodo.

Os parâmetros utilizados neste segundo experimento complementar para a eletrodeposição de cobre e, posteriormente o níquel, constam na Tabela 19 e 20.

Tabela 19 – Parâmetros utilizados na eletrodeposição de cobre para o experimento complementar 2.

CUPRACID 300®	
Temperatura do banho	24 - 28°C
Ph	Não necessita controle
Corrente aplicada	1 A
Tempo de deposição	6 minutos
Taxa de deposição	0,7 $\mu\text{m}/\text{min}$ com 3 A/dm^2
Tensão	2,0 – 6,0 V

Tabela 20 – Parâmetros utilizados na eletrodeposição de níquel para o experimento complementar 2.

Níquel Brilhante®	
Temperatura do banho	50 - 70°C
Ph	3,8 – 4,6
Corrente aplicada	1 A
Tempo de deposição	7 minutos
Taxa de deposição	0,7 $\mu\text{m}/\text{min}$ com 3 A/dm^2
Tensão	6,0 – 10,0 V

Da mesma forma que o experimento complementar 1, a apresentação e discussão dos resultados constam no Capítulo 5.

4.4 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 3

4.4.1 Objetivos Específicos

O terceiro experimento complementar utilizou o processo da pintura metálica (item 2.2.4) para substituir o processo da deposição química de níquel através da utilização de uma tinta condutora. Este experimento teve como principal objetivo reduzir e simplificar o processo de obtenção da primeira camada condutora adequando a amostra para o processo da eletrodeposição, sem prejudicar a qualidade da camada eletrodepositada. Essa técnica vem sendo utilizada pela empresa REPLIFORM COMPANY [74].

4.4.2 Procedimentos

Para a realização deste experimento foram utilizadas duas amostras iguais às utilizadas no segundo experimento complementar (Figura 21 do item 3.3) na intenção de comparar os resultados dos dois experimentos. A tinta condutora utilizada para a pintura das amostras foi a tinta prata PC 200B fornecida pela empresa Degussa, cujas principais características estão na Tabela 21.

Tabela 21 – Características da tinta prata PC 200B da empresa Degussa [61].

TINTA PRATA PC 200B	
Emprego	Madeira, papel, couro, pedras, fibras, resinas, plásticos.
Aplicação	Pincel, pistola ou imersão.
Tratamento Térmico	Temperatura ambiente ou máximo de 2h a 130°C.
Teor de Prata	45%
Resistência Superficial (ohm/cm ²)	0,03 – 0,05
Granulação	170 mesh
Formato das partículas	Floco
Consumo (g/100 cm ²)	0,6 – 2,0

As duas amostras tiveram o seu acabamento superficial através do lixamento manual conforme as recomendações baseadas nos melhores resultados obtidos do primeiro experimento complementar (item 5.1.1). A Figura 41 ilustra uma amostra após o acabamento superficial e pronta para o processo da pintura metálica.



Figura 41 – Amostra após o acabamento superficial.

Posteriormente, as duas amostras foram pintadas com a tinta prata PC 200B através da utilização de um pincel adequado para as suas dimensões. Após a aplicação da tinta prata foi verificado, com o auxílio do multímetro, que a superfície das duas amostras apresentaram baixos valores de resistência ôhmica (os valores constam no item 5.5) e, portanto, aptas para o processo final da metalização superficial que consiste na eletrodeposição de cobre e níquel. Os parâmetros utilizados neste experimento, na eletrodeposição de cobre e níquel, foram os mesmos da Tabela 19 e 20 pertencentes ao segundo experimento complementar. No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados deste experimento.

4.5 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 4

4.5.1 Objetivos Específicos

O quarto experimento complementar teve por objetivo testar a aplicação dos processos de metalização superficial para confeccionar insertos em cobre, através do método indireto que foi descrito no item 2.3.

4.5.2 Procedimentos

A geometria da peça definida para esse experimento foi a mesma utilizada no primeiro experimento complementar (corpos de ensaio). O primeiro passo consistiu na aplicação da tinta prata PC 200B sobre um corpo de ensaio, que seguiu os procedimentos obtidos da análise dos resultados do terceiro experimento complementar (item 5.3.2). O segundo passo consistiu na eletrodeposição de cobre que, no método indireto, caracteriza a última etapa da metalização superficial. Neste experimento a eletrodeposição utilizou a mesma solução CUPRACID 300® que foi preparada para os experimentos anteriores. A Figura 42 ilustra o corpo de ensaio antes (direita) e após (esquerda) a aplicação da tinta prata PC 200B. Foi necessário fazer uma colagem do corpo de ensaio em uma chapa de alumínio utilizando uma cola prata e, posteriormente, a montagem de uma máscara sobre o conjunto.

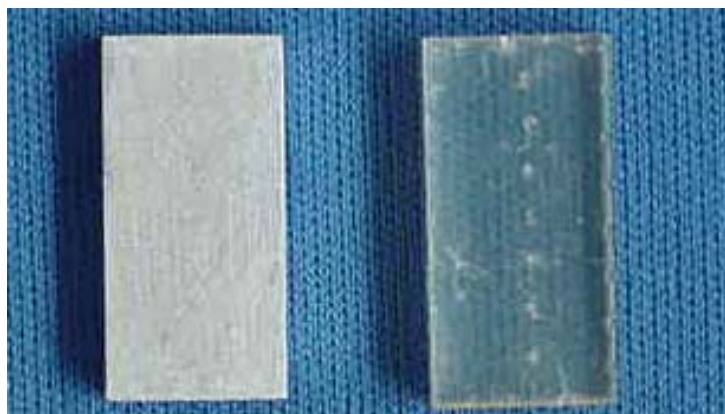


Figura 42 – Corpo de ensaio antes (direita) e depois (esquerda) da pintura com tinta prata PC 200B.

A Figura 43 ilustra no lado esquerdo a colagem do corpo de ensaio com cola prata, e no lado direito a montagem da máscara sobre o conjunto. A montagem da chapa de alumínio com o corpo de ensaio e o contra-eletrodo no momento da eletrodeposição é mostrada na Figura 44. No método indireto o objetivo da camada eletrodepositada é atingir espessuras da ordem de 2 a 4 mm (item 2.3) [74].

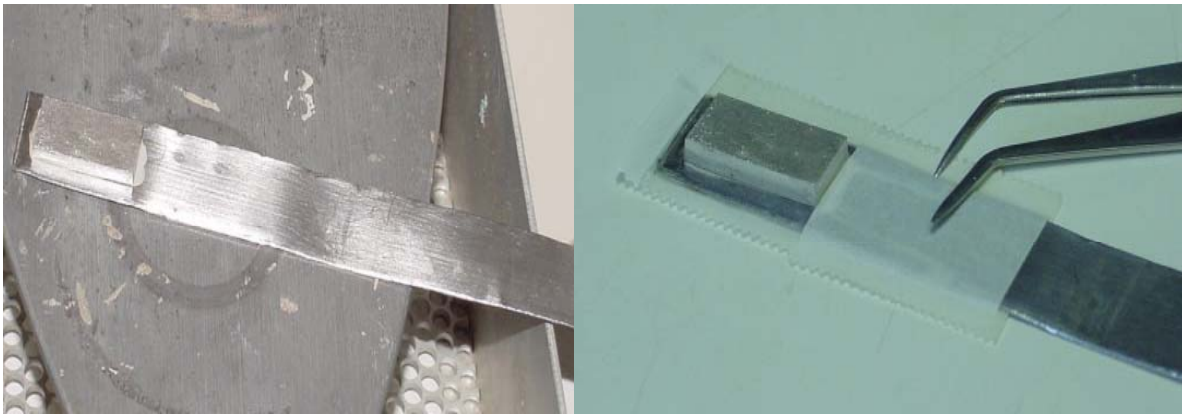


Figura 43 – Colagem do corpo de ensaio sobre chapa de alumínio (esquerda) e montagem da máscara sobre o conjunto (direita).



Figura 44 – Esquema da montagem da chapa de alumínio com o corpo de ensaio e o contra-eletrodo de cobre fosforoso.

A corrente elétrica calculada para a obtenção da espessura desejada, de acordo com a velocidade de deposição e a área da superfície do corpo de ensaio, consta na Tabela 22.

Tabela 22 – Parâmetros utilizados para a eletrodeposição de cobre.

CUPRACID 300®	
Temperatura do banho	24 - 28°C
Ph	Não necessita controle
Corrente aplicada	0,87mA
Tempo de deposição	48 horas
Taxa de deposição	0,7 $\mu\text{m}/\text{min}$ com 3 A/dm^2
Tensão	2,0 – 6,0 V

A apresentação e discussão dos resultados deste quarto experimento complementar constam no Capítulo 5 desta dissertação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS COMPLEMENTARES

5.1 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 1

5.1.1 Referentes ao Processo da Deposição Química de Níquel

No processo da deposição química de níquel os corpos de ensaio foram analisados, principalmente, após três etapas distintas: acabamento superficial, ataque químico e níquel químico (Tabela 8, do item 4.2.3).

A) Após o Acabamento Superficial

As medições das rugosidades nos corpos de ensaio foram realizadas somente nesta etapa, através de um rugosímetro manual (item 4.2.2). As Tabelas 23 e 24 mostram os seis acabamentos superficiais aplicados nos corpos de ensaio com os respectivos valores de R_a e R_z , onde foram efetuadas cinco medições (n) para cada corpo de ensaio.

Posteriormente às medições das rugosidades, foram realizadas fotografias da superfície dos corpos de ensaio, onde foi utilizado um microscópio óptico descrito no item 4.2.2. Para cada um dos seis tipos de acabamento superficial realizados nos corpos de ensaio (Tabela 7, do item 4.2.1) foram obtidas fotografias da superfície para visualização microscópica mostradas nas figuras 45 a 50.

Tabela 23 – Valores de R_a medidos sobre os corpos de ensaio.

R_a (μm)	Acabamento Superficial	1	2	3	4	5
1	Sem Acabamento	0,10	0,15	0,12	0,09	0,09
2	Lixamento # 100	2,25	2,55	2,95	2,70	2,30
3	Lixamento # 220	1,52	1,28	1,48	1,13	1,57
4	Lixamento # 400	0,71	0,67	0,65	0,71	0,74
5	Lixamento # 600	0,62	0,59	0,63	0,60	0,58
6	Jateamento	3,12	4,50	4,23	3,80	3,90

Tabela 24 – Valores de R_z medidos sobre os corpos de ensaio.

R_z (μm)	Acabamento Superficial	1	2	3	4	5
1	Sem Acabamento	0,59	0,60	0,58	0,50	0,50
2	Lixamento # 100	12,34	14,98	15,49	13,40	14,11
3	Lixamento # 220	9,12	7,75	9,08	7,27	8,86
4	Lixamento # 400	4,78	4,75	4,11	4,68	5,09
5	Lixamento # 600	3,81	3,74	3,88	3,51	3,73
6	Jateamento	18,25	17,65	18,97	16,54	16,57

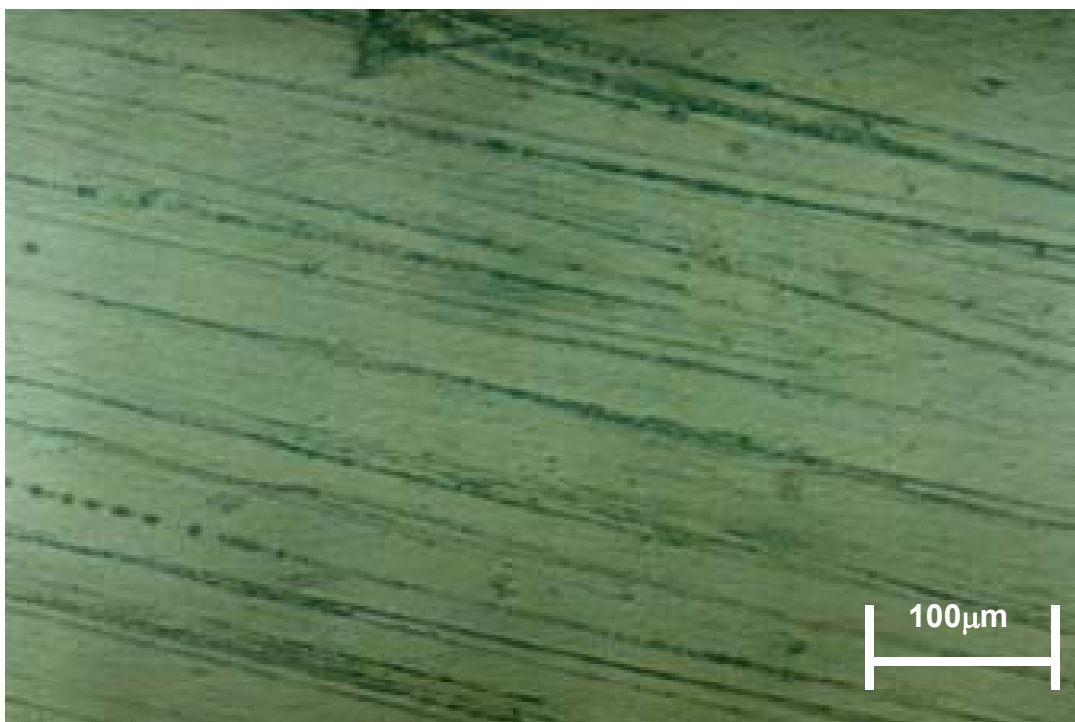


Figura 45 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio sem nenhum acabamento superficial.

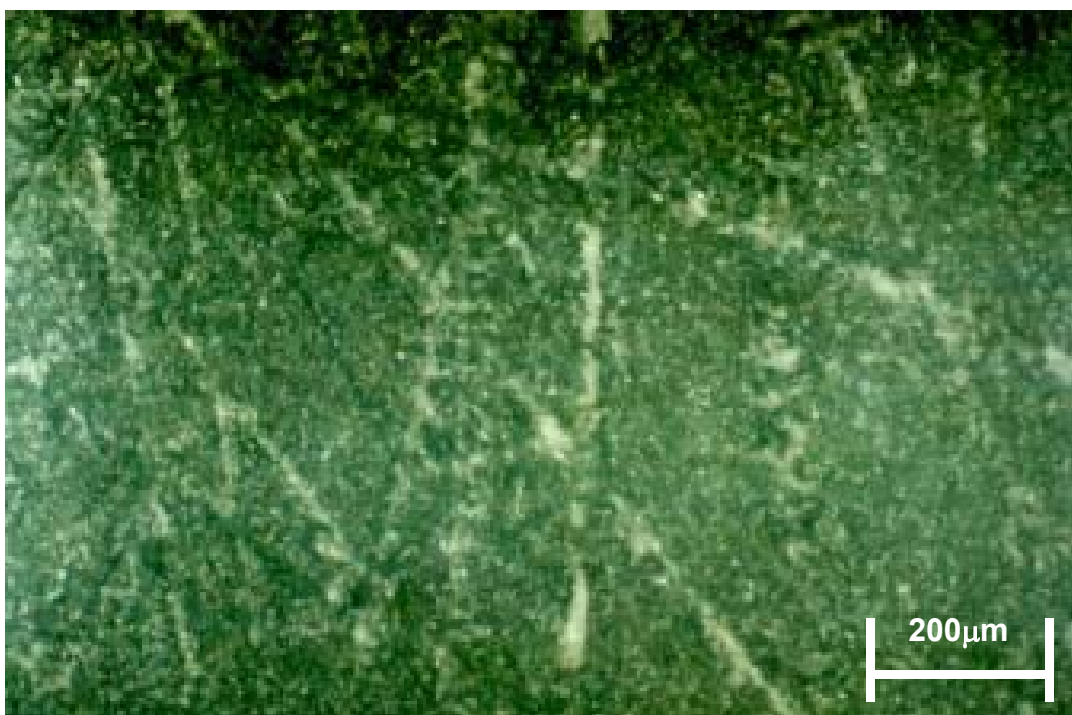


Figura 46 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #100.

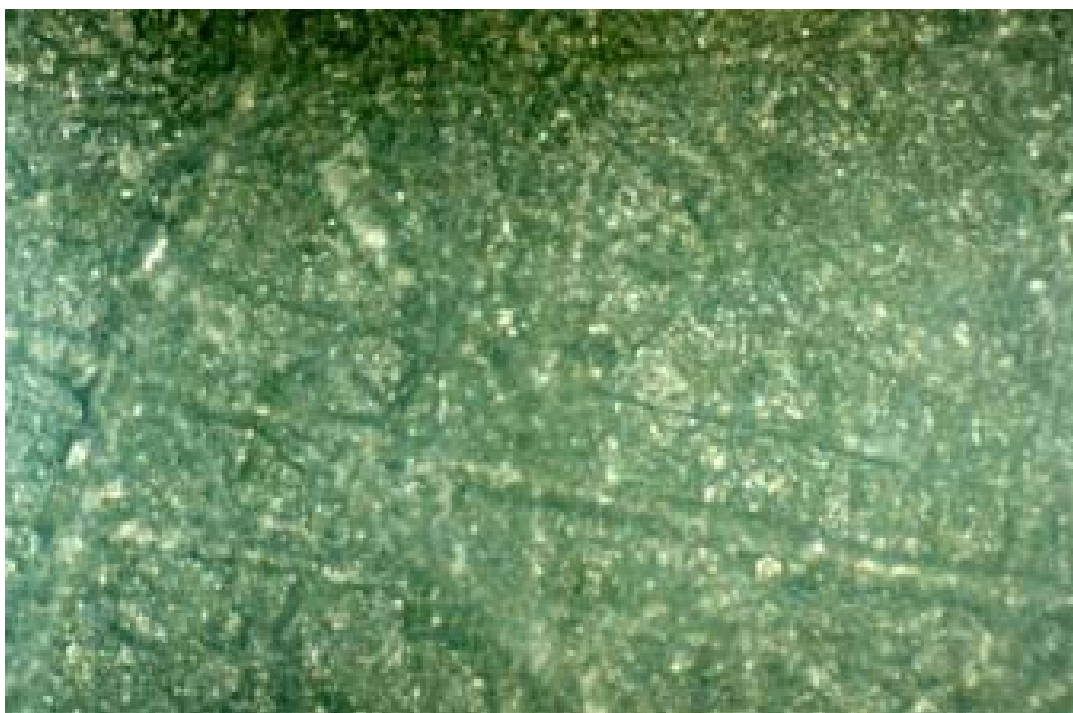


Figura 47 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #220.

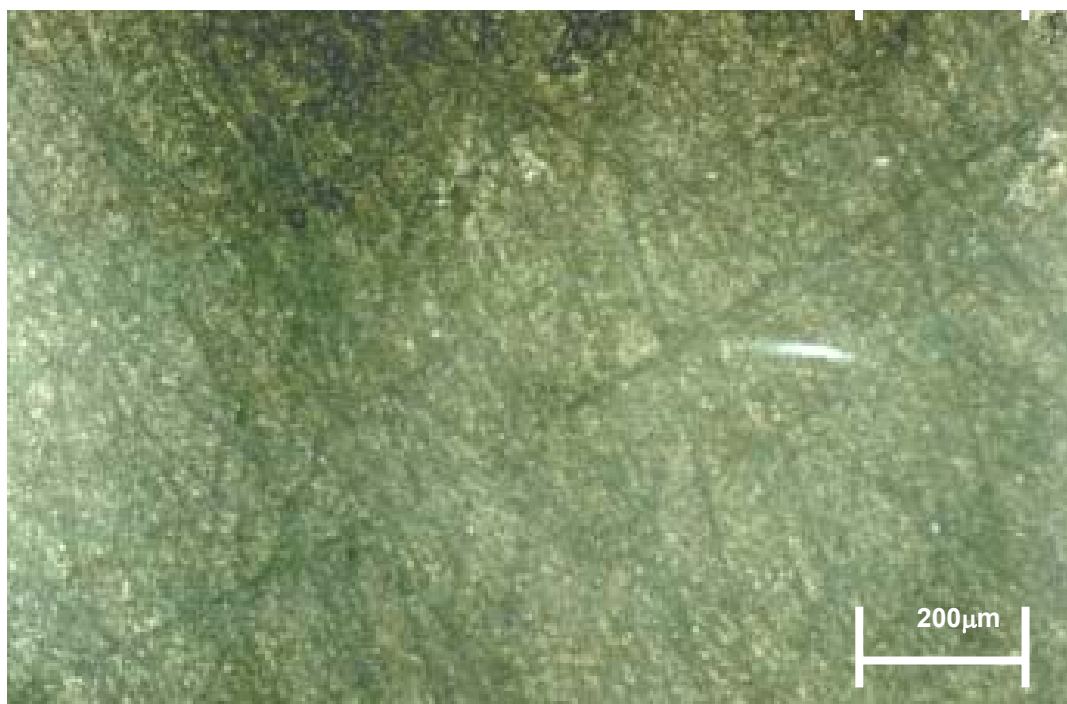


Figura 48 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #400.



Figura 49 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #600.

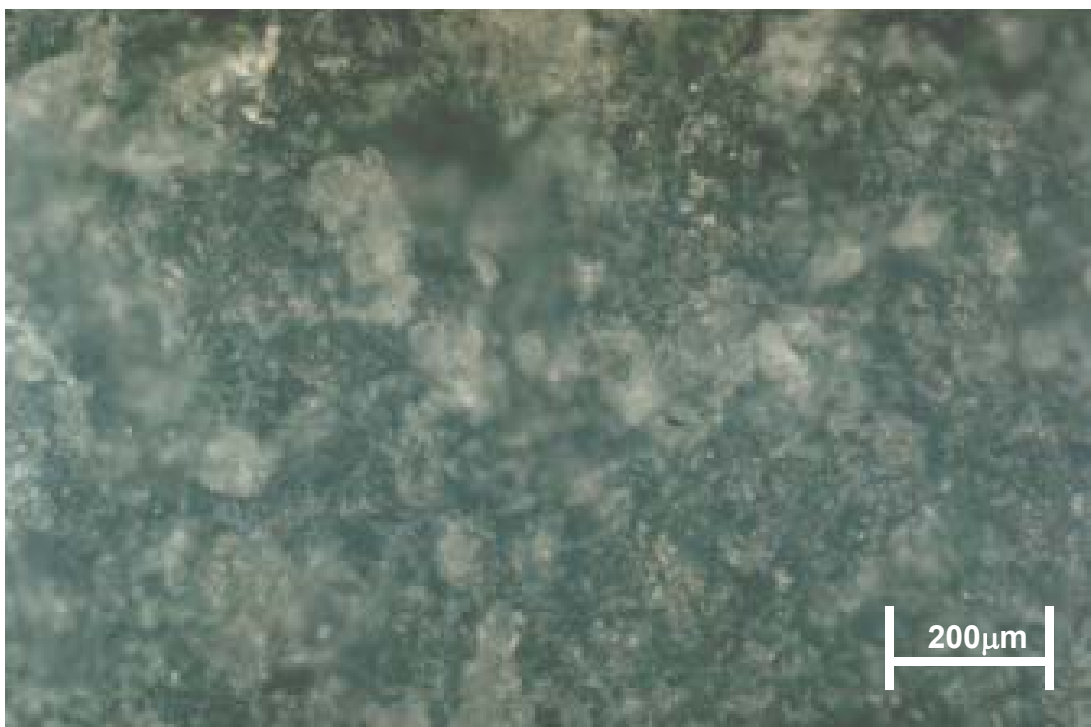


Figura 50 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial por jateamento.

Pelo fato da superfície do corpo de ensaio da Figura 45 não ter nenhum acabamento superficial, não foram detectados sinais originados por operações de lixamento, como mostra claramente a Figura 46, obtida através do lixamento com lixa #100. Devido às características de confecção na máquina de estereolitografia, as rugosidades medidas na superfície do corpo de ensaio da Figura 45 apresentaram os menores valores de rugosidades.

Observando-se as figuras 47 a 49 verifica-se que a visualização dos sulcos é gradativamente menor, em função do aumento da grana utilizada para as operações de lixamento.

Entretanto, a Figura 50 mostra uma superfície homogênea, porém com fácil visualização de sulcos, responsáveis pelos valores mais elevados das rugosidades R_a e R_z apresentadas nas tabelas 23 e 24.

B) Após o Ataque Químico

A análise dos corpos de ensaio, na etapa do ataque químico, utilizou somente as fotografias obtidas pelo microscópio óptico. As figuras 51 a 56 ilustram as superfícies dos corpos de ensaio após terem sido tratadas quimicamente através do ataque químico (sulfo-crômico), conforme descrito no item 4.2.3.

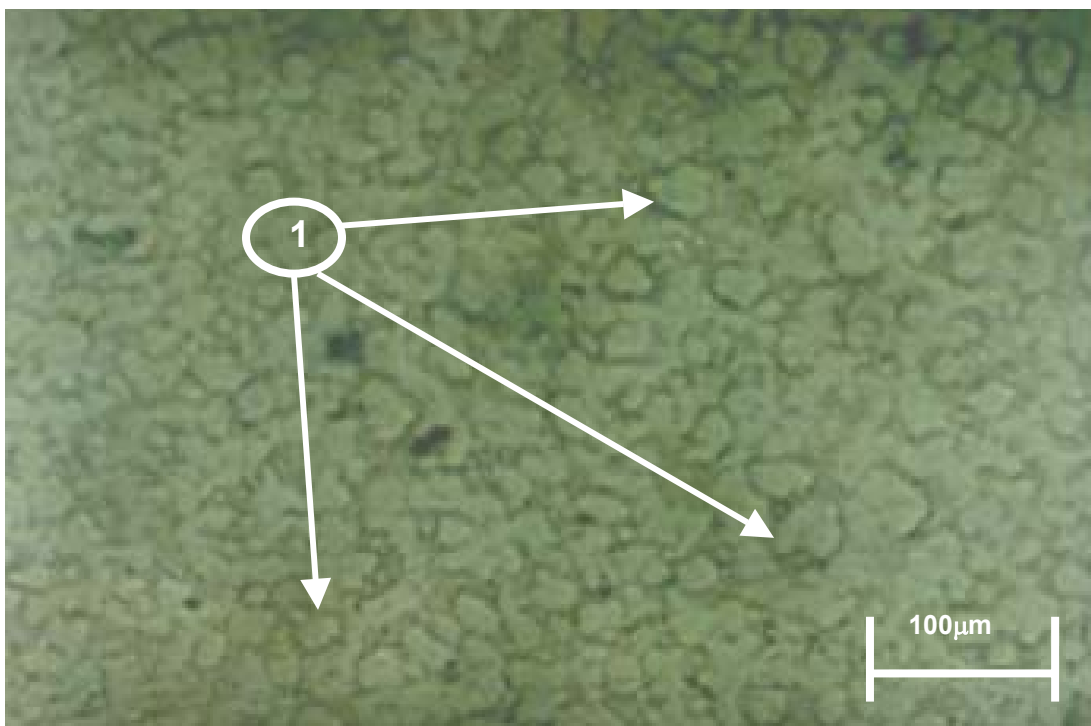


Figura 51 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio sem acabamento superficial após ataque químico.



Figura 52 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #100 após ataque químico.



Figura 53 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #220 após ataque químico.



Figura 54 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #400 após ataque químico.



Figura 55 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #600 após ataque químico.



Figura 56 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial por jateamento após ataque químico.

Em toda a superfície ilustrada pela Figura 51, são observadas pequenas trincas (indicado pelo número 1 na foto) ocasionadas, provavelmente, pela pouca eficiência do ataque químico, onde não ocorreu a descamação química da superfície, responsável pela criação das microcavidades que foram descritas no item 2.2.3. Nas Figuras 52 e 53 notam-se que os sulcos, criados pelo lixamento, estão mais aparentes facilitando a visualização de uma maior quantidade desses sulcos em relação aos da figura 46 e 47. Ocorreu também uma limpeza química [55] da superfície deixando-as com um aspecto mais uniforme, porém com a presença de alguns sulcos mais visíveis.

A limpeza química e a uniformidade também estiveram presentes nos corpos de ensaio lixados com lixa #400 (Figura 54) e lixa #600 (Figura 55). No corpo de ensaio com acabamento superficial por jateamento (Figura 56), a grande rugosidade (Tabela 23 e 24) obtida pelo processo ficou mais suave e menos evidente, porém ocorreu uma presença mais marcante de microcavidades de grandes dimensões em pontos isolados da superfície.

C) Após o Níquel Químico

A análise dos corpos de ensaio, na etapa do níquel químico, utilizou as fotografias obtidas pelo microscópio ótico e um multímetro para medir a resistência ôhmica da camada metalizada. A etapa do níquel químico, correspondente à última etapa do processo de deposição química de níquel, foi aplicada somente em um corpo de ensaio representante de cada acabamento superficial mostrado na Tabela 7 do item 4.2.1. A disposição da camada de níquel, depositada sobre a superfície dos corpos de ensaio, pode ser vista nas figuras 57 a 62 que são mostradas a seguir.

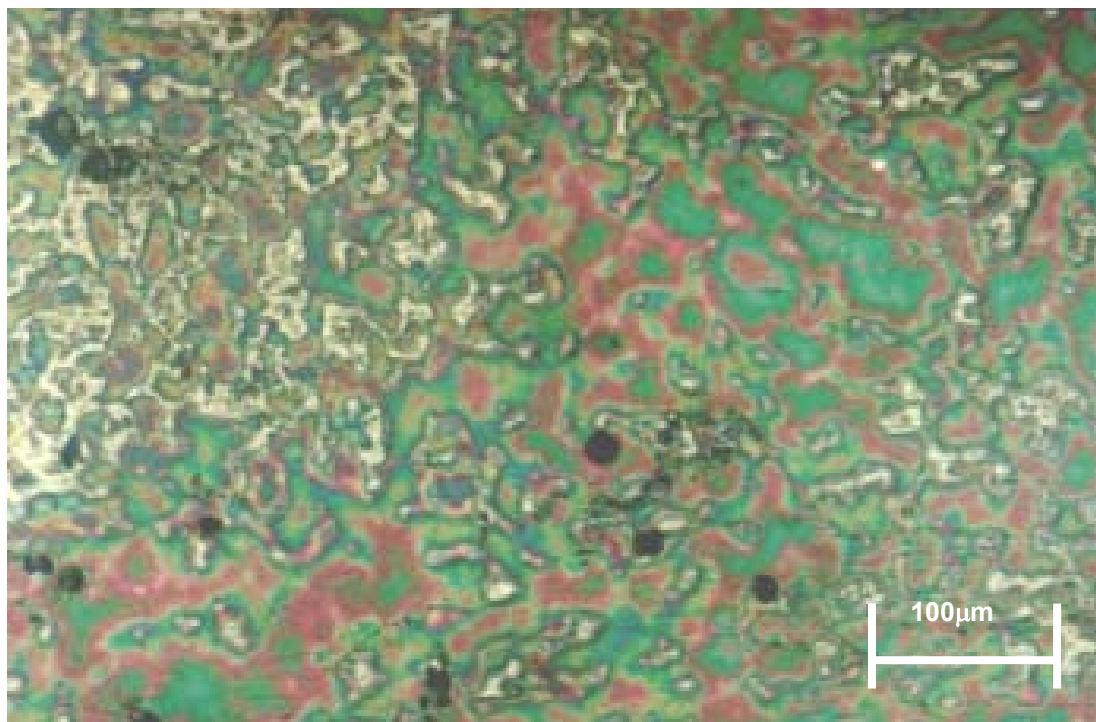


Figura 57 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio sem acabamento superficial após etapa do níquel químico.



Figura 58 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #100 após etapa do níquel químico.

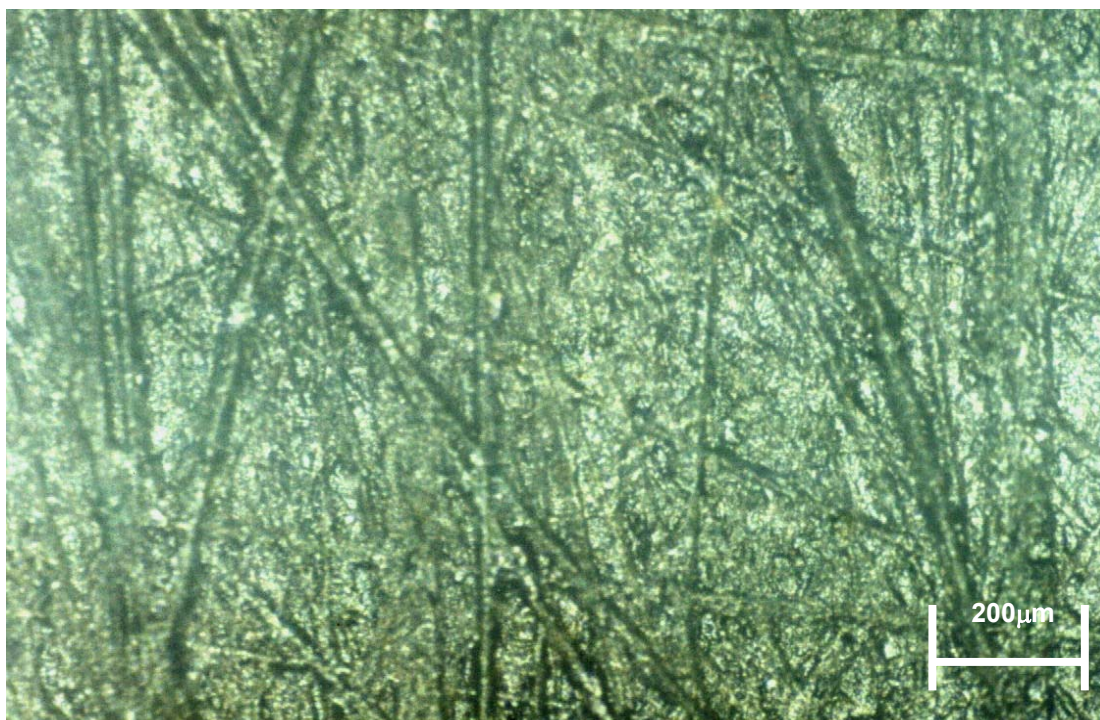


Figura 59 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #220 após etapa do níquel químico.



Figura 60 – Fotografia da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #400 após etapa do níquel químico.



Figura 61 – Foto da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial em lixa #600 após etapa do níquel químico.



Figura 62 – Foto da superfície do corpo de ensaio com acabamento superficial por jateamento após etapa do níquel químico.

Somente nas regiões mais claras ilustradas na Figura 57 ocorreu a deposição do níquel, devido, provavelmente, às pequenas trincas geradas pelo ataque químico na superfície do corpo de ensaio (Figura 51), ocorrendo um depósito da solução sulfo-crômica, tornando ineficiente a lavagem de recuperação e a etapa seguinte, que consistiu na neutralização (Tabela 8, do item 4.2.3). Aconteceu o efeito de arraste [46], onde o cromo, presente na solução sulfo-crômica, não foi totalmente eliminado da superfície e, conseqüentemente, as etapas posteriores ocorreram de maneira ineficiente, comprometendo todo o processo da deposição química de níquel.

A utilização do multímetro para medir a resistência ôhmica (citado no item 4.2.2), após o processo da deposição química de níquel, auxiliou na análise da camada metalizada. O multímetro emitia um sinal sonoro quando a resistência ôhmica era baixa, e nenhum sinal quando a resistência ôhmica era elevada. Esse procedimento era importante pois evitava a sobrecarga do potenciostato (Figura 34, do item 4.2.4) utilizado no processo da eletrodeposição, pois no sistema galvanométrico, a corrente é mantida constante através da variação da tensão (item 4.2.4). Portanto, quando a resistência ôhmica da camada metalizada era elevada, o potenciostato desligava automaticamente evitando a sobrecarga, devido à tensão ser muito alta. Uma baixa resistência ôhmica e uniformidade da camada metalizada são desejáveis, e servem como indicadores de que o processo da deposição química de níquel foi finalizado com eficiência.

As Figuras 58 (lixa #100) e 59 (lixa #220) apresentaram uma camada com aspecto metálico uniforme, porém, através do multímetro foi verificado que ambas as superfícies possuíam uma elevada resistência ôhmica e, conseqüentemente, tornaram o processo da eletrodeposição inviável.

Da mesma maneira ocorreu com a superfície jateada (Figura 62) onde foi observada uma camada metálica não-uniforme e com a presença de grandes cavidades na superfície. Através do multímetro foi constatado que a sua superfície possuía, também, uma elevada resistência ôhmica, não servindo portanto para o processo da eletrodeposição.

Somente as superfícies com acabamento superficial em lixa #400 (Figura 60) e lixa #600 (Figura 61) que possuíam as rugosidades na classe N6 (Tabela 4, do item 2.1.2) e que demonstraram uma resistência ôhmica baixa, ficaram aptas para o processo da eletrodeposição. Os acabamentos superficiais, em lixa #400 e lixa #600, tiveram uma melhor eficiência em relação à etapa do ataque químico e, conseqüentemente, uma melhor deposição do níquel químico com a obtenção de uma camada uniforme, tornando-se adequadas para o processo da eletrodeposição de cobre e níquel consecutivamente. Provavelmente, a baixa resistência ôhmica teve relação com a uniformidade da camada de níquel químico.

Portanto, para a metalização superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia, é recomendável utilizar, anteriormente ao processo da metalização, um acabamento superficial em lixa #400 ou lixa #600. Com os valores de rugosidades obtidos das Tabelas 23 e 24 foi possível traçar gráficos que são visualizados nas Figuras 63 e 64, onde uma faixa destaca no gráfico os melhores valores de R_a e R_z a serem obtidos pelo acabamento superficial para melhorar a eficiência do processo da deposição química de níquel.

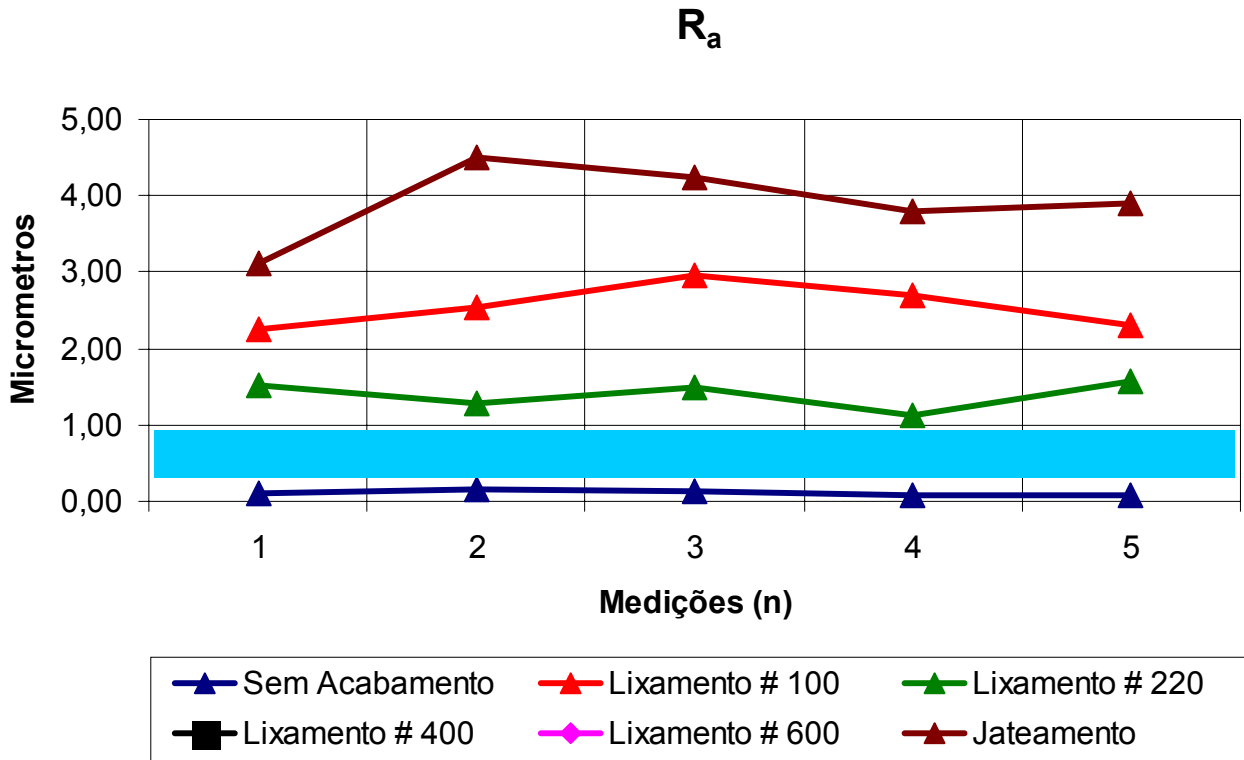


Figura 63 – Rugosidade R_a medida nos corpos de ensaio.

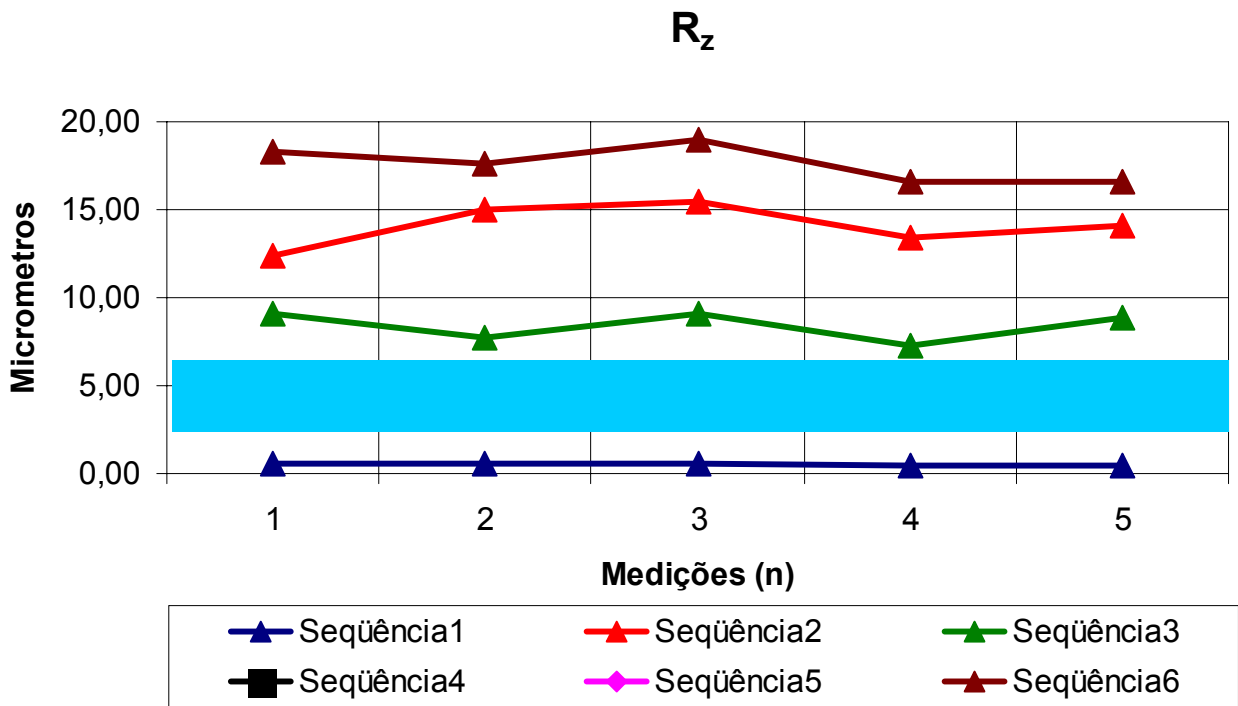


Figura 64 – Rugosidade R_z medida nos corpos de ensaio.

5.1.2 Referentes à Etapa de Eletrodeposição

Conforme descrito no item 5.1.1, somente dois corpos de ensaio, que tiveram o acabamento superficial realizado em lixa #400 e em lixa #600, foram considerados aptos para o processo final da metalização superficial, que consistiu na eletrodeposição de cobre e níquel consecutivamente. A Figura 65 ilustra o conjunto corpo de ensaio e o contra-eletrodo do processo da eletrodeposição de cobre antes (esquerda) e depois da eletrodeposição (direita).



Figura 65 – Corpo de ensaio e contra-eletrodo antes da eletrodeposição de cobre (esquerda) e depois da eletrodeposição (direita).

A Figura 66 ilustra o conjunto corpo de ensaio e o contra-eletrodo do processo da eletrodeposição de níquel antes (esquerda) e depois da eletrodeposição (direita).

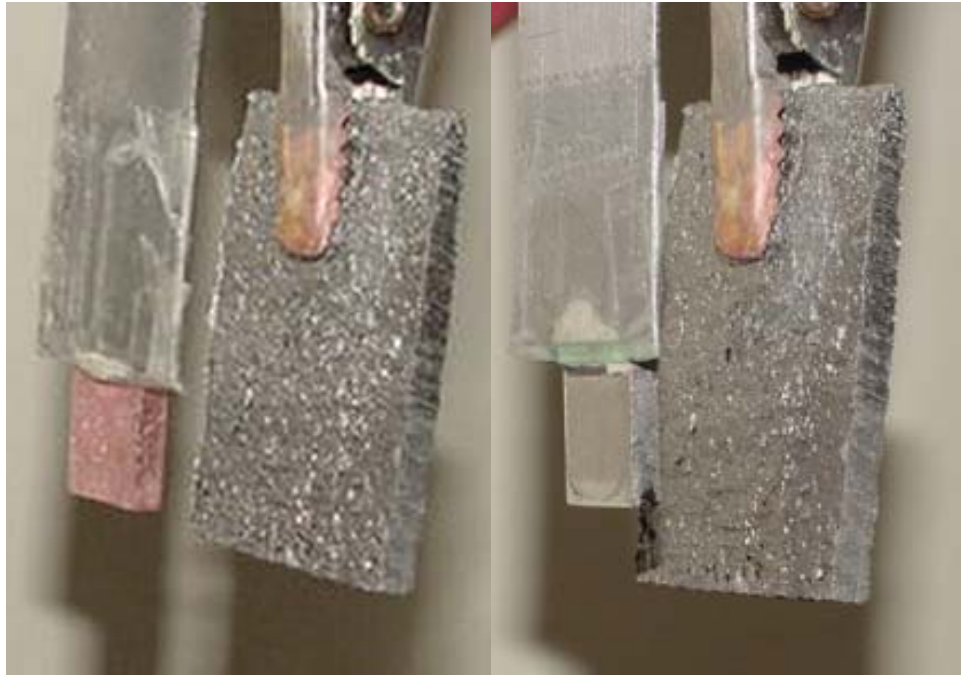


Figura 66 – Corpo de ensaio e contra eletrodo antes da eletrodeposição de níquel (esquerda) e depois da eletrodeposição (direita).

A espessura total das duas camadas metálicas eletrodepositadas (cobre e níquel) provavelmente variou de 7 a 9 μm , valores que foram baseados na velocidade de deposição que são encontradas nas tabelas 16 e 17 do item 4.2.4.

Após o término da eletrodeposição de cobre e níquel nos dois corpos de ensaio, foi realizada a verificação da adesão da camada metalizada para testar a eficiência do processo desenvolvido nos laboratórios da UFSC. Para verificação da adesão da camada metalizada com a resina epóxi foi realizado um teste muito utilizado pelas indústrias de metalização, inclusive pela própria empresa Boreal, que consiste no “peel test” [56] baseado na norma ISO, porém de uma maneira mais simplificada. Uma fita adesiva comum foi uniformemente aplicada sobre a superfície metalizada dos dois corpos de ensaio, conforme ilustra a Figura 67.



Figura 67 – Os dois corpos de ensaio com as fitas adesivas coladas nas superfícies metalizadas.

Após a retirada das fitas adesivas nenhum vestígio aparente da camada metalizada foi encontrada aderida sobre as mesmas, conforme ilustra a Figura 68. A realização do “peel test” indicou uma boa adesão com a camada anterior, que consistiu no níquel químico e este com a resina epóxi consecutivamente.

Os resultados obtidos no primeiro experimento complementar mostraram um melhor entendimento e domínio das técnicas de metalização superficial envolvidas, em comparação com as do experimento preliminar realizado na empresa Boreal, alcançando o objetivo proposto (item 4.2.1).

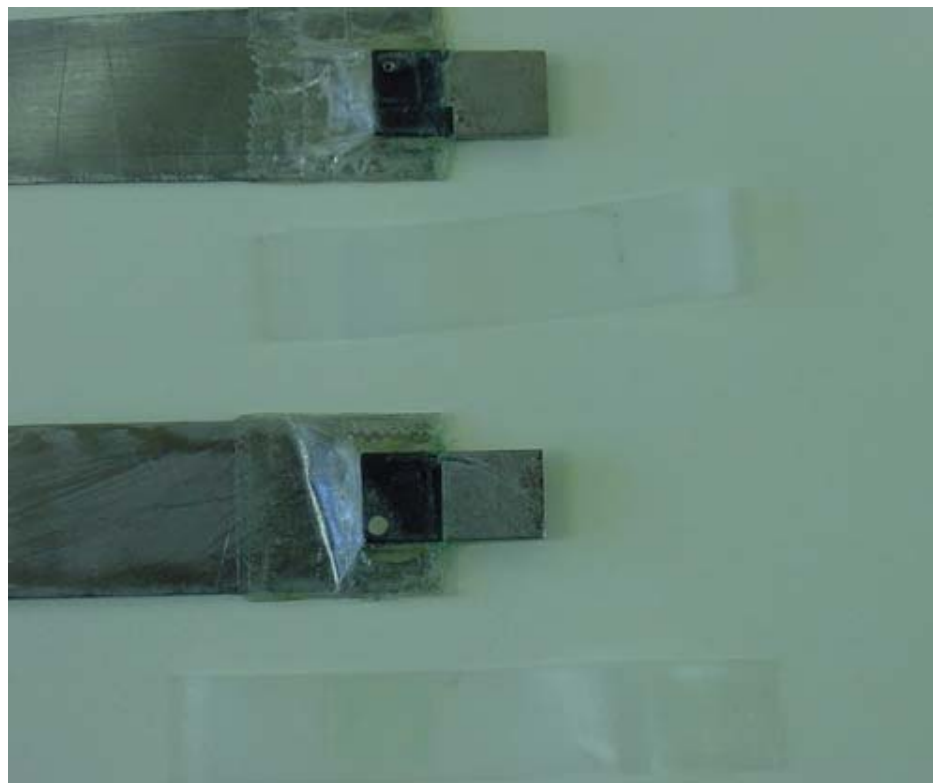


Figura 68 – Teste de adesão após a retirada das fitas adesivas dos corpos de ensaio.

5.2 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 2

5.2.1 Deposição Química de Níquel

Os acabamentos superficiais aplicados nas duas amostras utilizadas neste experimento complementar foram baseados nos resultados obtidos do primeiro experimento complementar (descritos no item 5.1.1) e são mostrados na Tabela 25.

No segundo experimento complementar os resultados da deposição química de níquel mostraram-se mais eficientes, se comparados aos da amostra metalizada na empresa Boreal no experimento preliminar (Capítulo 3).

Tabela 25 – Acabamento superficial aplicado às duas amostras do segundo experimento complementar.

AMOSTRA	ACABAMENTO SUPERFICIAL	R _a MÉDIO (μm)	R _z MÉDIO (μm)
01	Lixa # 400	0,70	4,68
02	Lixa # 600	0,60	3,73

A Figura 69 ilustra as duas amostras após a deposição química de níquel, realizada no Laboratório de Efeito Mossbauer do Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina.

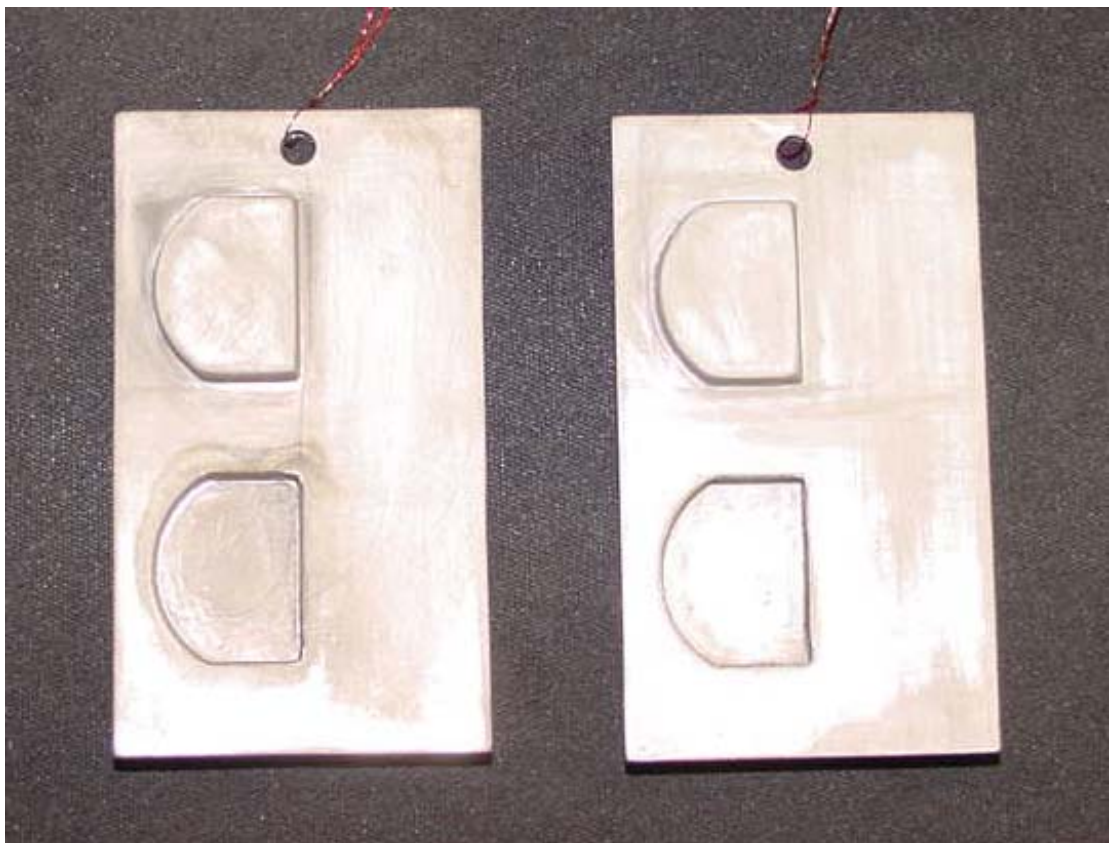


Figura 69 – Deposição química de níquel realizado no Laboratório de Efeito Mossbauer do Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina.

As amostras da Figura 69 possuem uma cobertura metálica uniforme, sem falhas e com baixa resistência ôhmica; ou seja, adequadas para o processo da eletrodeposição. Para melhor comparação, a Figura 70 ilustra (na esquerda) a amostra que teve a sua deposição química de níquel na empresa Boreal e a outra amostra (na direita) que teve a sua deposição química de níquel realizada no laboratório da UFSC.



Figura 70 – Amostra depositada com níquel químico na empresa Boreal (esquerda) e amostra depositada com níquel químico no laboratório da UFSC (direita).

5.2.2 Eletrodeposição

Como o potenciostato utilizado nos experimentos podia fornecer no máximo 1A de corrente elétrica e a amostra exigia 2A devido à sua grande área superficial, foi necessário eletrodepositar somente na metade da amostra. Porém, os resultados finais dos experimentos não foram alterados; uma vez que as camadas foram

eletrodepositadas inversamente em cada amostra, portanto, todas as geometrias foram eletrodepositadas. A Figura 71 ilustra a amostra 01 (acabamento superficial com lixa #400) antes da eletrodeposição com cobre.



Figura 71 – Amostra 01 antes da eletrodeposição de cobre.

A Figura 72 ilustra a mesma amostra 01 após a eletrodeposição com cobre; nota-se também que a peça foi girada 180° durante o processo em relação ao seu eixo vertical para melhorar a uniformidade da eletrodeposição, e compensar a ausência de um segundo contra-eletrodo que seria recomendável utilizar [51].

Após a eletrodeposição de cobre do segundo experimento complementar, teve início a última etapa de metalização superficial sobre as amostras, que foi a realização da eletrodeposição de níquel.

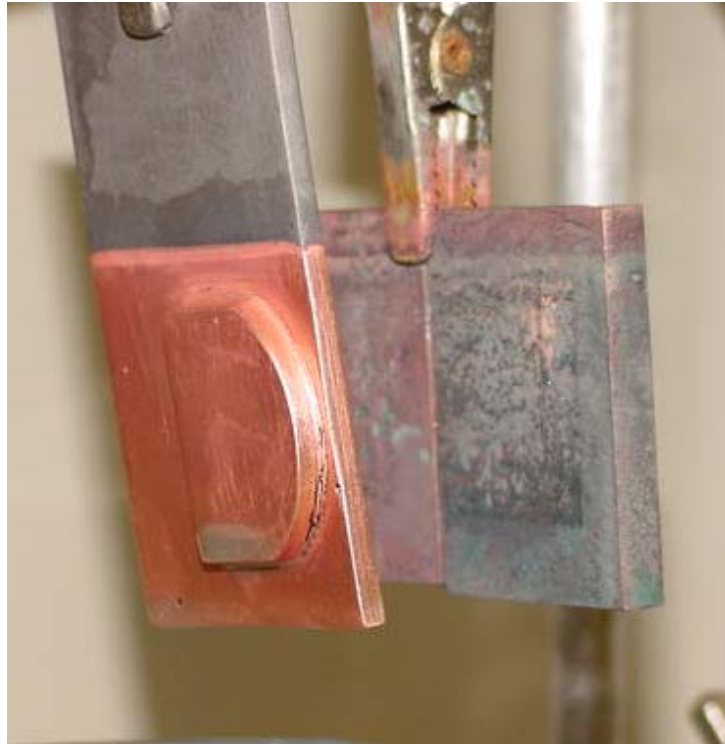


Figura 72 – Amostra 01 após a eletrodeposição de cobre.

A Figura 73 ilustra a mesma amostra 01 após a eletrodeposição de níquel. Em ambas as peças a eletrodeposição final de níquel mostrou uma camada uniforme, aderente e brilhante. Da mesma maneira que a deposição química de níquel, obteve-se uma melhora no processo da eletrodeposição realizado no Laboratório de Filmes Finos e Superfícies do Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina, em relação ao obtido na empresa Boreal.

As duas amostras que foram utilizadas neste experimento, e que estão com as camadas de níquel eletrodepositadas, podem ser visualizadas na Figura 74. A faixa da camada eletrodepositada em níquel, em cada uma das peças, está indicada na figura pelas setas.



Figura 73 – Amostra 01 após a eletrodeposição de níquel.

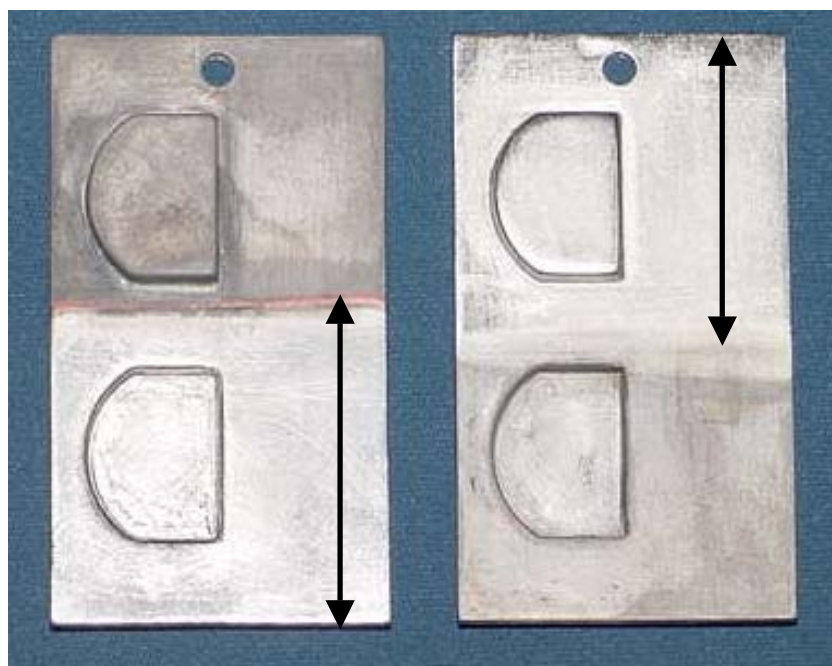


Figura 74 – As duas amostras após a etapa final da metalização com recobrimento de níquel (indicado pelas setas).

Com o intuito de melhorar os resultados obtidos por este experimento, a Figura 75 ilustra, na esquerda, a amostra que teve a eletrodeposição na empresa Boreal e a

outra amostra, na direita, que teve a eletrodeposição no Laboratório de Filmes Finos e Superfícies da UFSC. A peça da direita foi editada através de um software de imagens para auxiliar na visualização como se fosse uma peça única, devido somente à metade de cada peça ser eletrodepositada.



Figura 75 – Amostra eletrodepositada na empresa Boreal (esquerda) e amostra eletrodepositada no Laboratório de Filmes Finos e Superfícies da UFSC (direita).

As diferenças tornam-se facilmente visíveis na Figura 75. Enquanto que a amostra eletrodepositada na empresa Boreal apresentou falhas, devido ao processo anterior da deposição química do níquel ter sido ineficiente, a amostra da direita, eletrodepositada no Laboratório de Filmes Finos e Superfícies da UFSC, apresentou uma uniformidade, brilho e estética. O objetivo anteriormente proposto (item 4.3.1) foi alcançado, pois consistia em comprovar visualmente uma melhor qualidade das amostras metalizadas se comparadas às metalizadas junto à empresa Boreal (experimento preliminar).

5.2.3 Tempo de Metalização

O tempo de metalização foi considerado desde o início do acabamento superficial até a obtenção completa da camada metalizada após a última etapa, que consistiu na eletrodeposição de níquel. A Tabela 26 mostra o tempo utilizado nas principais etapas para obtenção da camada metalizada sobre a amostra 01 (acabamento superficial com lixa #400) e a Tabela 27 mostra o tempo utilizado nas principais etapas para obtenção da camada metalizada sobre a amostra 02 (acabamento superficial com lixa #600).

Tabela 26 – Tempo utilizado pelas principais etapas do processo de metalização superficial sobre a amostra 01

LEGENDA	PRINCIPAIS ETAPAS	MINUTOS	PORCENTAGEM
1	Acabamento Superficial	12	8 %
2	Ataque Químico	43	25 %
3	Banho de paládio	17	10 %
4	Níquel químico	85	50 %
5	Eletrodeposição de cobre	6	3 %
6	Eletrodeposição de níquel	7	4 %
TOTAL		170	100 %

Tabela 27 – Tempo utilizado pelas principais etapas do processo de metalização superficial sobre a amostra 02

LEGENDA	PRINCIPAIS ETAPAS	MINUTOS	PORCENTAGEM
1	Acabamento Superficial	20	11 %
2	Ataque Químico	43	25 %
3	Banho de paládio	17	10 %
4	Níquel químico	85	48 %
5	Eletrodeposição de cobre	4	2 %
6	Eletrodeposição de níquel	7	4 %
TOTAL		176	100 %

Com a melhora do recobrimento metálico desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina em relação à empresa Boreal, os tempos de obtenção das camadas metalizadas sobre as amostras 01 e 02 tiveram acréscimos significativos. O gráfico da Figura 76 compara o tempo de metalização utilizado pelas três amostras: a amostra metalizada na empresa Boreal (etapas 5 a 10 da Tabela 6, do item 3.3), a amostra 01 (acabamento superficial com lixa #400) e a amostra 02 (acabamento superficial com lixa #600) metalizadas no segundo experimento complementar (Tabelas 26 e 27).

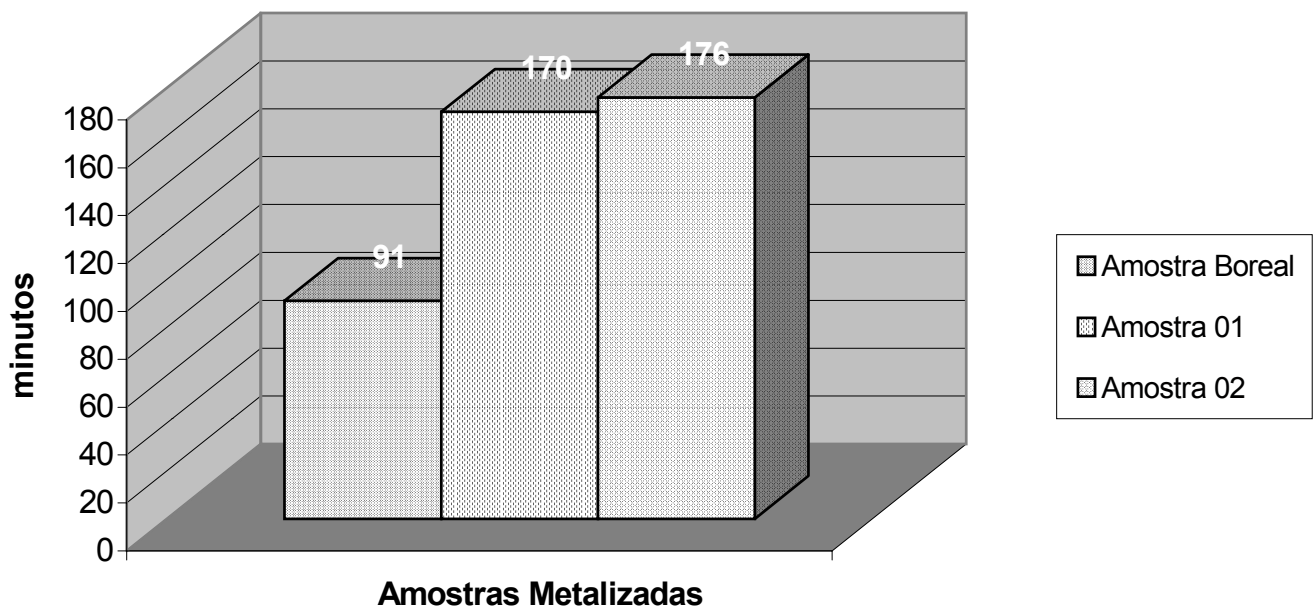


Figura 76 – Gráfico comparativo do tempo de metalização entre as amostras utilizadas no experimento preliminar e no segundo experimento complementar.

Com relação ao tempo da amostra metalizada na empresa Boreal, ocorreu um acréscimo aproximado de 90% nos tempos das amostras 01 e 02, devido principalmente ao aumento do tempo nas etapas do acabamento superficial e níquel químico (Tabelas 26 e 27).

Entretanto, as três amostras da Figura 76 utilizaram os mesmos tempos para a confecção (etapas 1 a 4 da Tabela 6, do item 3.3), portanto, considerando-se a soma dos tempos de confecção e metalização nas três amostras, o acréscimo aproximado no tempo total foi apenas 19%. Portanto, de acordo com o objetivo proposto inicialmente (item 4.3.1) que visava o aprimoramento visual da camada metálica sobre a amostra sem aumentar, significativamente, os tempos de fabricação (Tabela 6, do item 3.3).

5.3 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 3

5.3.1 Pintura Metálica

Este experimento tinha como objetivo a utilização do processo da pintura metálica (item 2.2.4) para substituir o processo da deposição química de níquel através da utilização de uma tinta condutora. A Figura 77 ilustra a amostra (direita) após o acabamento superficial e a amostra após a aplicação da tinta prata PC 200B (esquerda).

Devido à ausência de um equipamento aerossol (“spray”) para a aplicação da tinta prata, a pintura sobre as duas amostras foi realizada manualmente com um pincel, apesar de não ser o método mais recomendado [61] devido à viscosidade da tinta prata PC 200B (Tabela 21, do item 4.4.2).

O aspecto rugoso e irregular na superfície das duas amostras, que foram observados visualmente após a pintura, foi ocasionado, provavelmente, pela viscosidade da tinta prata e pela utilização do pincel. Porém, sua aplicação é simples e a superfície apresentou uma baixa resistência ôhmica (os valores constam no item 5.5) devido ao alto teor de prata existente na tinta prata PC 200B (Tabela 21, do item 4.4.2).

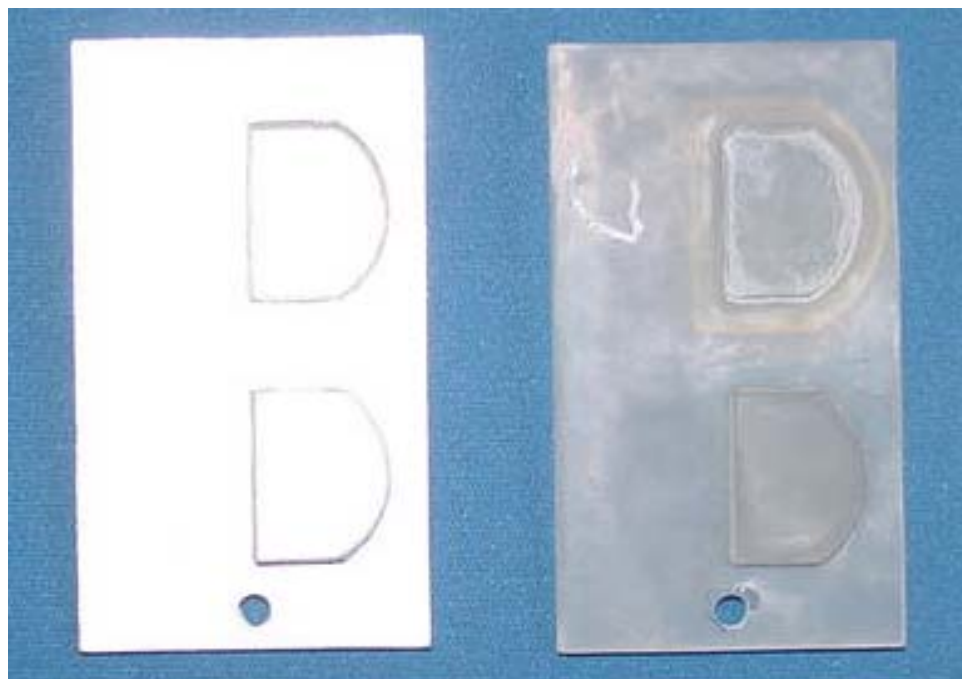


Figura 77 – Amostra antes (direita) e depois (esquerda) da pintura com tinta prata PC 200B.

5.3.2 Eletrodeposição

Após a aplicação da tinta prata PC 200B, foi iniciado o processo da eletrodeposição de cobre nas duas amostras. A Figura 78 ilustra uma amostra pintada com a tinta prata e montada no equipamento antes do processo da eletrodeposição de cobre, e a Figura 79 ilustra a mesma amostra após o processo da eletrodeposição de cobre.

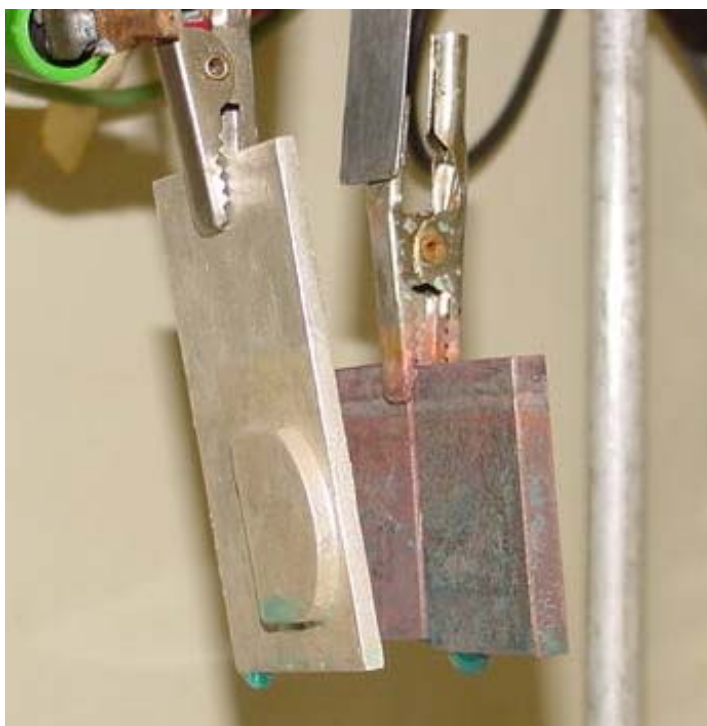


Figura 78 - Amostra pintada com tinta prata e montada no equipamento antes do processo da eletrodeposição de cobre.

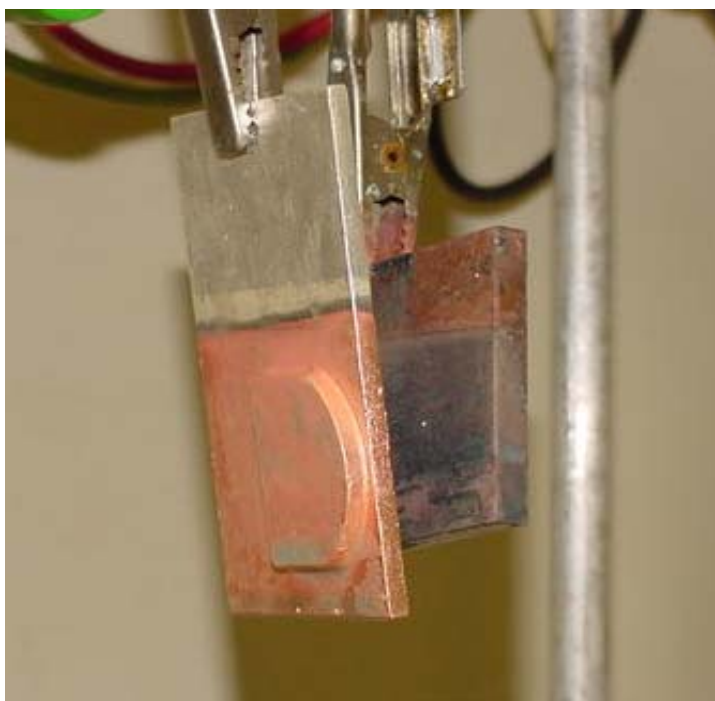


Figura 79 - Amostra pintada com tinta prata e montada no equipamento depois do processo da eletrodeposição de cobre.

A eletrodeposição de cobre, em ambas as amostras, apresentou manchas devido, provavelmente, à irregularidade da camada de tinta prata aplicada pelo pincel. As irregularidades da pintura foram reproduzidas na camada de cobre devido à espessura de camada eletrodepositada ser delgada, em torno de $10\ \mu\text{m}$ de acordo com a velocidade de deposição (Tabela 19, do item 4.3.2) para o tempo utilizado de 15 min. A Figura 80 ilustra uma amostra em duas vistas, inferior e superior, onde as manchas podem ser observadas (indicadas pelo número 1).

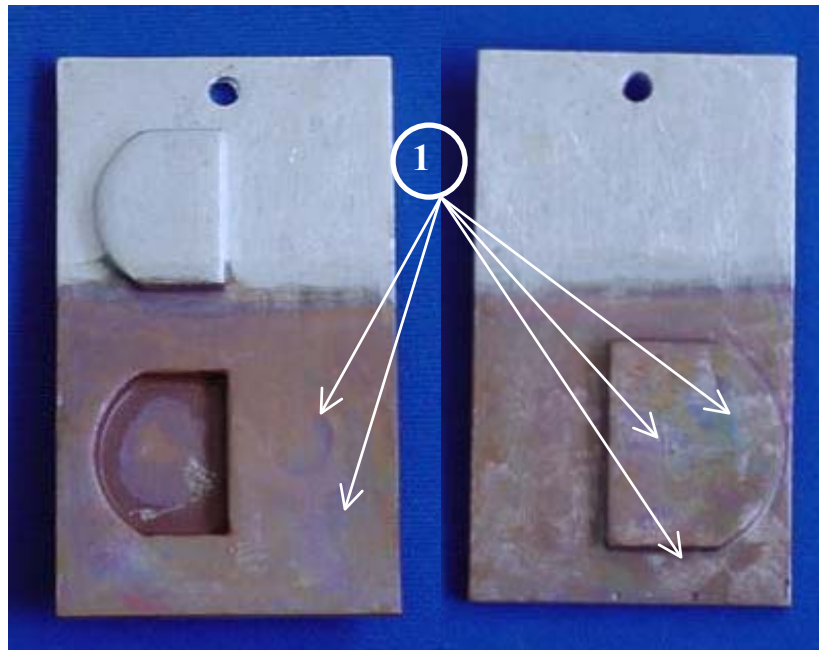


Figura 80 - Amostra em duas vistas, inferior e superior, onde as manchas podem ser observadas (indicadas pelo número 1).

Na última etapa, que consiste na eletrodeposição de níquel, apenas uma amostra foi utilizada e o resultado pode ser observado na Figura 81 indicado pela seta em preto. Na Figura 81 também são observadas várias bolhas (indicadas pelo número 1) causadas, provavelmente, pelo desprendimento de gás do solvente da tinta prata e fraca adesão da mesma sobre a resina epóxi.

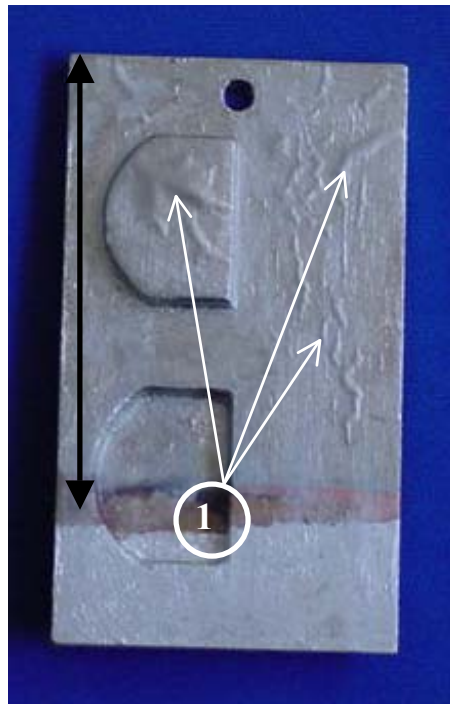


Figura 81 – Amostra pintada com tinta prata após a eletrodeposição de níquel.

O desprendimento do gás pode ter ocorrido pela evaporação do solvente da tinta prata, pois o processo da eletrodeposição de níquel ocorre em uma faixa de temperatura de 50°C a 70°C.

Alguns procedimentos podem ser realizados a fim de se evitar esses problemas, tais como: aplicação da tinta prata com o auxílio de um equipamento de aerossol (“spray”), diminuição da espessura da camada aplicada e utilização de uma estufa até a completa secagem da tinta prata.

5.3.3 Tempo de Metalização

O tempo de metalização considerado foi o início do acabamento superficial até a obtenção completa da camada metalizada, que consistiu na eletrodeposição de níquel.

A Tabela 28 mostra o tempo utilizado nas principais etapas para obtenção da camada metalizada sobre a amostra.

Tabela 28 – Tempo utilizado pelas principais etapas do processo.

LEGENDA	PRINCIPAIS ETAPAS	MINUTOS	PORCENTAGEM
1	Acabamento Superficial	20	36%
2	Pintura com tinta prata	13	24%
3	Eletrodeposição de cobre	15	27%
4	Eletrodeposição de níquel	7	13%
	TOTAL	55	100%

O gráfico da Figura 82 compara o tempo de metalização utilizado em duas amostras: a amostra 01 metalizada no segundo experimento complementar (Tabela 26) e a amostra deste experimento (Tabela 28).

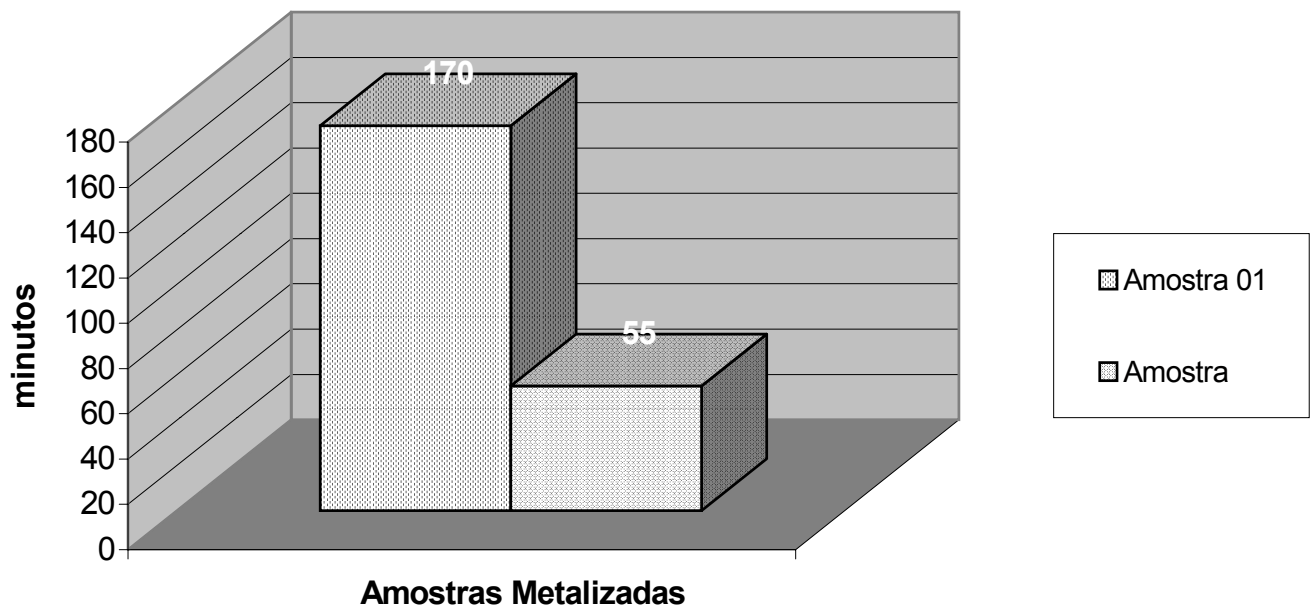


Figura 82 - Gráfico comparativo do tempo de metalização entre a amostra 01 metalizada no segundo experimento complementar e a amostra deste experimento.

De acordo com os objetivos propostos inicialmente (item 4.4.1) a praticidade da aplicação da tinta prata, em relação ao processo da deposição química de níquel, reduziu e simplificou a obtenção de uma camada condutora, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 82. Porém, neste experimento, a qualidade da camada eletrodepositada era inferior às camadas eletrodepositadas pelo segundo experimento complementar. Através das recomendações propostas de aplicação da tinta prata (item 5.3.2), pode-se obter uma melhora na qualidade da nova camada eletrodepositada.

5.4 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR 4

5.4.1 Pintura Metálica

A aplicação da tinta prata PC 200B, no corpo de ensaio, seguiu a maioria das recomendações sugeridas pelo terceiro experimento complementar (item 5.3.2) e o seu aspecto superficial tinha uma aparência menos rugosa e, provavelmente, com uma camada mais fina que o obtido pelo terceiro experimento complementar. Por ser uma peça menos complexa, tal fato pode ter auxiliado na aplicação da tinta prata sobre o corpo de ensaio.

5.4.2 Eletrodeposição

Devido à pequena área do corpo de ensaio eletrodepositado, a corrente elétrica exigida foi baixa e não sobrecarregou o potenciostato (Figura 34, do item 4.2.4) utilizado neste experimento. A corrente elétrica calculada para a área do corpo de ensaio a ser

eletrodepositada registrou um valor de 0,87 mA e a espessura desejada de 2 a 4 mm exigiu um tempo de aproximadamente quarenta e oito horas (Tabela 22, do item 4.5.2) .

Provavelmente, pelo fato das recomendações do item 5.3.2 terem sido adotadas para a aplicação da tinta prata, e a eletrodeposição de cobre ocorrer em temperatura ambiente, a camada da tinta prata do corpo de ensaio após os primeiros minutos da eletrodeposição de cobre não apresentou nenhum problema semelhante ao terceiro experimento complementar, tais como a formação de bolhas e manchas (Figuras 80 e 81, do item 5.3.2).

Durante o período da eletrodeposição foi necessário fazer três intervalos com um tempo de vinte minutos cada para colocar a solução em um sistema de agitação magnético. Dessa maneira o precipitado de sulfato de cobre que surgiu na solução se dissolvia e a eletrodeposição podia retomar seu curso novamente.

Esses intervalos surgiram provavelmente devido à eletrodeposição ocorrer sem nenhum tipo de agitação mecânica ou a ar, como era recomendado pela ATOTECH [57]. Após 22h de eletrodeposição a precipitação do sulfato de cobre é claramente visível na Figura 83 e está localizada nas duas extremidades do contra-eletródo.

Após o encerramento das quarenta e oito horas de eletrodeposição de cobre, o corpo de ensaio foi retirado da montagem e posteriormente descolado da chapa de alumínio. A Figura 84 mostra duas vistas do corpo de ensaio com a casca de cobre depositada sobre o mesmo.



Figura 83 – Precipitação do sulfato de cobre sobre as extremidades do contra-eletródo.

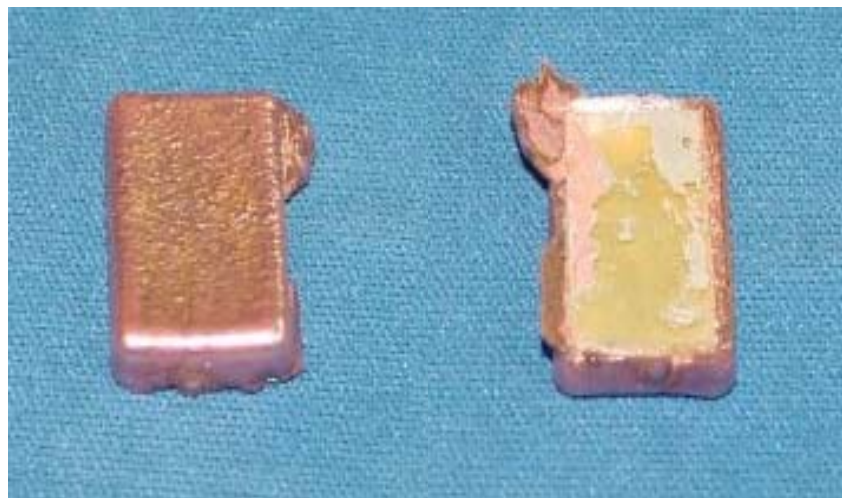


Figura 84 – Casca de cobre sobre corpo de ensaio após quarenta e oito horas de eletrodeposição.

Para a separação da casca de cobre do corpo de ensaio, foi montado um dispositivo para auxiliar a sua retirada. Um furo de aproximadamente 4 mm de diâmetro foi feito sobre a superfície do corpo de ensaio com uma profundidade de 1,5 mm. Nesse furo realizou-se uma colagem, com Araldite®, de um prego que serviu como haste para a separação da casca de cobre do corpo de ensaio. Após a secagem do

Araldite®, o dispositivo seguiu para o forno elétrico e foi aquecido até a temperatura de 120°C. Com o amolecimento da resina epóxi e a dilatação da casca de cobre, a retirada das duas partes ocorreu facilmente. A Figura 85 mostra o dispositivo montado no corpo de ensaio (esquerda), a cavidade gerada pela casca de cobre (centro) e o corpo de ensaio com o dispositivo (direita). A Figura 86 ilustra somente a cavidade gerada pela casca de cobre após a separação do corpo de ensaio.

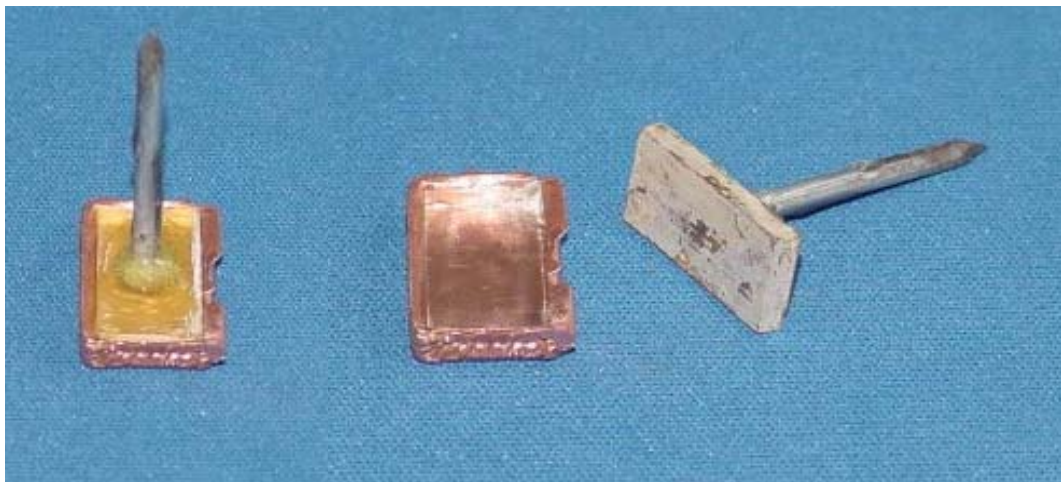


Figura 85 - Dispositivo montado no corpo de ensaio (esquerda), a casca de cobre (centro) e o corpo de ensaio separado com o dispositivo (direita).

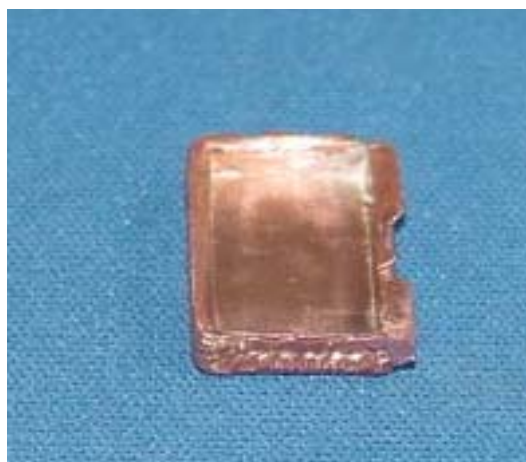


Figura 86 - Cavidade gerada pela casca de cobre após a separação do corpo de ensaio.

De acordo com o objetivo proposto inicialmente (item 4.5.1) a obtenção da cavidade gerada pela casca de cobre, que reproduziu as geometrias do corpo de ensaio, demonstrou que os processos de metalização superficial adotados neste experimento puderam testar a viabilidade de se obter insertos em cobre, através do método indireto que foi descrito no item 2.3.

5.5 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ÔHMICA

A utilização do multímetro para a medição da resistência ôhmica adotou os procedimentos descritos no item 5.1.1, e serviu como ferramenta para a tomada de decisões sobre: a qualidade da superfície metalizada nas peças (amostras e corpos de ensaio) dos diversos experimentos realizados por este trabalho e a continuidade dessas peças para o processo da eletrodeposição, visando a preservação do potenciostato utilizado nos experimentos.

Dentre as medições realizadas durante esses experimentos (Figura 87), três amostras tiveram seus valores ilustrados pelo gráfico da Figura 88, que mostra a variação da resistência ôhmica de acordo com o acabamento superficial. O gráfico da Figura 88 mostra que os mais baixos valores de resistência ôhmica foram obtidos pela tinta prata. O acabamento superficial com lixa #600 apresentou valores dez vezes maiores que os obtidos pela tinta prata, e o acabamento superficial com lixa #400 apresentou valores vinte vezes maiores que os da tinta prata; porém, todos os valores de resistência ôhmica mostrados na Figura 88 são adequados para o processo da eletrodeposição.

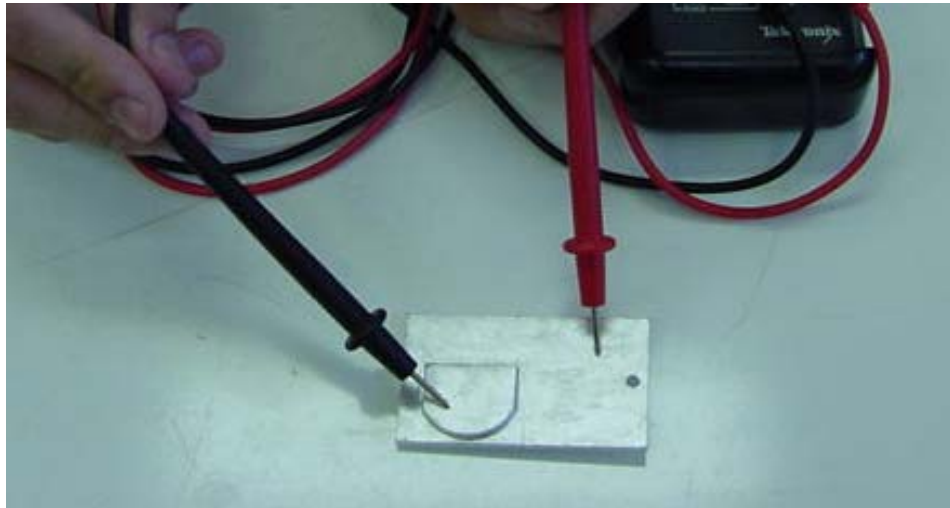


Figura 87 – Medição da resistência ôhmica em uma amostra.

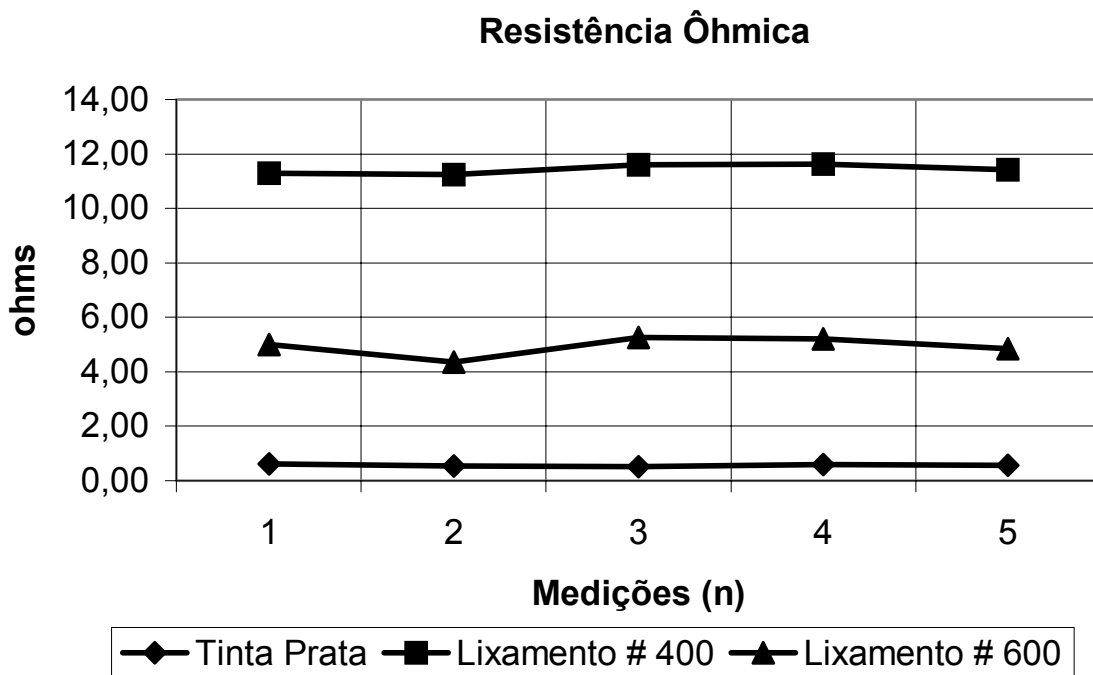


Figura 88 – Gráfico dos valores de resistência ôhmica medida nas peças utilizadas nos experimentos complementares 2 e 3.

Pelo fato das normas e padronizações de medição da resistência ôhmica não terem sido avaliadas anteriormente, os valores mostrados no gráfico da Figura 88 não devem ser tomados, isoladamente, como base para os processo de metalização superficial.

6. CONCLUSÃO

6.1 METALIZAÇÃO SUPERFICIAL APLICADA À PEÇAS OBTIDAS PELO PROCESSO DE ESTEREOLITOGRAFIA

Este trabalho teve como principal objetivo investigar a respeito da aplicação do processo de metalização superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia. Através de cinco experimentos, foram estudados os processos de deposição química de níquel, pintura metálica com tinta prata e eletrodeposição. Tanto a deposição química de níquel quanto a pintura metálica foram utilizadas como uma etapa inicial para a obtenção de uma camada condutora sobre a superfície, para, posteriormente, ser possível realizar o processo da eletrodeposição.

O experimento preliminar teve por objetivo identificar na prática as principais etapas do processo de metalização que, neste caso, utiliza as técnicas de deposição química (item 2.2.3) e eletrodeposição metálica (item 2.2.2), bem como identificar importantes parâmetros do processo a serem melhor avaliados, em função de sua possível influência na qualidade da superfície metalizada.

O experimento complementar 1 foi importante por conseguir realizar as etapas referentes ao processo da deposição química de níquel utilizando o Laboratório de Efeito Mossbauer, e por realizar as etapas referentes ao processo da eletrodeposição utilizando o Laboratório de Filmes Finos e Superfícies, ambos pertencentes ao Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina.

No campo da deposição química de níquel, foi obtido conhecimento básico capaz de identificar alternativas para adequar o processo de metalização, anteriormente

aplicado às peças em ABS, para as necessidades de acabamento superficial exigidas para protótipos confeccionados pelo processo de estereolitografia.

Através do Laboratório de Filmes Finos e Superfícies foi possível a aplicação e adequação, nos corpos de ensaio, do processo de eletrodeposição de cobre e níquel através do primeiro experimento complementar e, posteriormente, sua aplicação nos demais experimentos complementares. Foram seguidas as recomendações da empresa ATOTECH [57] para a preparação das soluções utilizadas nas eletrodeposições, que foram cuidadosamente confeccionadas. Adicionalmente, a usinagem dos contra-eletrodos proporcionais às peças e o valor correto da corrente elétrica auxiliou nos resultados das peças eletrodepositadas.

O experimento complementar 1 mostrou que dentre as operações de acabamento superficial, normalmente usadas em peças obtidas pelo processo de estereolitografia, existe uma faixa de rugosidades (Classe N6 da Tabela 4, do item 2.1.2) onde o processo da deposição química de níquel torna-se mais eficiente, alcançando, conseqüentemente, uma baixa resistência ôhmica da camada metalizada.

O segundo experimento complementar obteve resultados semelhantes ao obtido por Luan et al [58] no que se refere à etapa do ataque químico. Por ser a etapa inicial do processo da deposição química de níquel, o ataque químico torna-se relevante pelo fato de influenciar as demais etapas.

O experimento complementar 3, que utilizou a tinta prata PC 200B, teve como principal resultado mostrar que é bastante simples e fácil obter uma camada condutora sobre a resina epóxi em relação à deposição química de níquel. Algumas recomendações foram deduzidas pelo experimento em relação à utilização e aplicação da tinta prata para melhorar os resultados obtidos. Desconsiderando o aspecto

estético, a pintura com tinta prata é uma alternativa adequada para a obtenção de uma superfície condutora em uma peça obtida pelo processo de estereolitografia.

O resultado mais promissor, no campo dos protótipos, reside no quarto experimento complementar. Através da aplicação da tinta prata sobre um corpo de ensaio e, posteriormente, uma eletrodeposição de cobre, foi possível a obtenção de uma casca em cobre de cerca de 2 mm de espessura. Ocorreu um excesso de deposição de cobre nos cantos vivos do corpo de ensaio, porém segundo Rennie, Bocking e Bennett [77] é normal a ocorrência desse tipo de defeito. Essa casca poderá ser desenvolvida e ajustada para funcionar como um inserto para a injeção de peças na fabricação de pequenos lotes [74].

Em relação à adesão da camada de níquel depositada quimicamente e a camada eletrodepositada de níquel, ambas apresentaram boa adesão de acordo com o “peel test” [59]. Segundo Prentice [78], a adesão das camadas eletrodepositadas sofre influência da corrente utilizada, e como a corrente foi calculada corretamente, a adesão da camada foi satisfeita para o propósito do trabalho em questão.

Através da parceria do Laboratório de Efeito Mossbauer e de Filmes Finos e Superfícies do Departamento de Física, juntamente com o Laboratório CIMJECT, tornou-se possível o desenvolvimento de um “know-how” próprio para a metalização superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia.

Com o encerramento dos experimentos, este trabalho indicou a possibilidade da metalização superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia. Todos os produtos utilizados nos experimentos são comercialmente disponíveis e de fácil acesso. Com o propósito estético ou funcional, a metalização superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia gera oportunidades de aprimoramento dos

serviços prestados às empresas que utilizam a tecnologia da estereolitografia para o desenvolvimento, pesquisa e/ou fabricação de seus produtos [79, 80].

6.2 SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

O presente trabalho abre novas opções de estudos relacionados à área de metalização superficial em peças obtidas pelo processo de estereolitografia. Algumas sugestões são descritas para a realização de futuros trabalhos, tais como:

- Estudo e avaliação de outra tecnologia de metalização superficial para aplicação nas peças obtidas pelo processo de estereolitografia, tais como pulverização metálica e/ou metalização a vácuo;
- Aplicação de diferentes espessuras de camadas metalizadas utilizando as técnicas desenvolvidas por esse trabalho, e obter as incertezas dimensionais;
- Desenvolvimento em conjunto com outro estudo do laboratório CIMJECT, que é a inserção de aletas para melhorar a distribuição do calor. As duas técnicas aplicadas em um inserto de estereolitografia poderiam produzir melhores resultados em relação ao desgaste e refrigeração do inserto;
- Desenvolver a obtenção de ferramental rápido pelo método indireto, otimizar o processo de separação da casca de cobre do positivo da peça e criar dispositivos para a instalação da casca de cobre no porta moldes para o processo de injeção de pequenos lotes;
- Estudar o comportamento das peças obtidas pelo processo de estereolitografia após a metalização em superfícies mais complexas;

- Padronização de medições como, por exemplo, a resistência ôhmica e adesão; para auxiliar nas decisões sobre a qualidade das superfícies metalizadas;
- Analisar os tempos de deposição química de níquel de acordo com a geometria da peça, resistência ôhmica e quantidade de solução utilizada.

7. BIBLIOGRAFIA

7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O Plástico no Brasil. **Dinheiro Chama Dinheiro**. Editora *Definição LTDA*, nº 457 – ano 38, p. 8 – 28, março 2001.
- [2] INP – INSTITUTO NACIONAL DO PLÁSTICO. **Nobreza do Plástico**. Disponível na internet no endereço:
<http://www.inp.org.br/fiquepordentro/artigos/nobreza.htm>
- [3] HASSELL, A. **International Molding Report: Opportunity and Competition in South America**. *IMMNET Magazine*, maio, 1999.
- [4] BLASS, A. **Processamento de Polímeros**. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1985.
- [5] HASSELL, A. **Molders Economic Index: Productivity Supports Molding Growth**. *IMMNET Magazine*, setembro, 1999.
- [6] PÖTSCH, G.; MICHAELLI, W. **Injection Moulding**. Editora Hanser, Munique, 1995.
- [7] GOLDSBERRY, C. **One Moldmaker's Perspective on Success**. *IMMNET Magazine*, janeiro, 2000.
- [8] Anais do 1º Workshop RECOPE. **Desafios e Experiências em Moldes para Conformação de Plásticos**. Divisão de Metalurgia, São Paulo, junho de 1999.
- [9] JACOBS, P. F. **Stereolithography and other RP&M Technologies**. *SME's Rapid Prototyping Conference, New York, NY, EUA*, 1996.
- [10] MANISCALCO, M. **Expanding the Reach of RP and RT**. *IMMNET Magazine*, março, 2000.
- [11] MANISCALCO, M. **Comparing SLS and Aluminum Tools**. *IMMNET Magazine*, outubro, 1999.
- [12] 3D Systems Inc. **Stereolithography Buildstation – User Guide**, Valencia, California, USA, Jun. 1995.
- [13] BEALL, G. **By Design: Part design 109 – Textured finishes**. *IMMNET Magazine*, junho, 2000.

- [14] GOMIDE, R. B. **Fabricação de Componentes Injetados em Insertos Produzidos por Estereolitografia.** *Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFSC*, Florianópolis, abril de 2000.
- [15] JACOBS, P. F. **Rapid Prototyping & Manufacturing – Fundamentals of Stereolithography.** *SME's Rapid Prototyping Conference*, New York, NY, EUA 1996.
- [16] WYATT, M.; Dishart K. **Choosing a Solvent to Clean Stereolithography Parts.** *Prototyping Technology International*, 1998.
- [17] BEALL, G. **By Design: Part design 102 – Textured finishes.** *IMMNET Magazine*, abril, 2000.
- [18] Rapid Prototyping Primer. **What is Rapid Prototyping?** Disponível na internet. [Http: //www.mmsonline.com/articles](http://www.mmsonline.com/articles), em 10/10/2000.
- [19] High Speed Milling. **CNC Machining As A Rapid Prototyping Technique.** Disponível na internet: [http: //www.mmsonline.com/articles](http://www.mmsonline.com/articles), em 03/11/2000.
- [20] LENNINGS, L. **Selecting Either Layered Manufacturing or CNC Machining to Build Your Prototype.** *Rapid Prototyping and Tooling Worldwide*, novembro, 1999.
- [21] GRIMM, T. **Different Technologies for Different Applications.** *Accelerated Technologies*, abril 1996.
SME's Rapid Prototyping Conference, New York, NY, EUA, 1996.
- [22] Creative Technology. **Rapid Milling for Prototyping.** *SME's Rapid Prototyping Conference*, maio, 1998.
- [23] FURRENS, K.K. **Standards for the Rapid Prototyping Industry.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 4, p. 169 – 178, 1999.
- [24] TATA, K.; FADEL, G.; BAGCHI, A.; AZIZ, N. **Efficient Slicing for Layered Manufacturing.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 4, p. 151-167, 1998.
- [25] BRYANT, E. **Crosslink Density and the Glass Transition in Thermosetting Polymers.** *Introduction to Polymers*, agosto 2000.
- [26] FADEL, G. M.; KIRSCHMAN, C. **Accuracy Issues in CAD to RP Translations.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 2, p. 4-17, 1996.

- [27] REVEES, P.; COBB, R. **Reducing the Surface Deviation of Stereolithography Using In-process Techniques.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 3, p. 20 – 31, 1997.
- [28] **Learning to Use SolidWorks.** *SolidWorks Corporation*, Massachusetts, 1998.
- [29] TABENKIN, A. **Use Surface Finish to Get Optimum Production.** *Modern Machine Shop*, p. 52 – 62, fevereiro 1990.
- [30] NORTON INDÚSTRIA. **Lixas e Acessórios.** Disponível na internet no endereço: <http://www.norton-abrasivos.com.br/>
- [31] EAGLES DESIGN & TECHNOLOGY. **What are the Different Finish Levels Available for Models?** Disponível na internet no endereço: <http://www.eaglesdesign.com/finishlevels.html>
- [32] KONIG, W. **Retificação, Brunimento e Lapidação.** Tradução: Weingaertner, W. L.; Aachen, 1980.
- [33] SAN-BLAST ABRASIVE BLASTING EQUIPMENT. **Technical Support.** Disponível na internet no endereço: <http://www.san-blast.com/>
- [34] KRAMER INDUSTRIES. **Facts About Abrasive Blasting.** Disponível na internet no endereço: <http://www.kramer.thomasregister.com/>
- [35] WILLIAMS, E. R.; MELTON, L. V. **Abrasive Flow Finish of Stereolithography Prototypes.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 4, p. 56 – 67, 1998.
- [36] KEHM EQUIPMENT INCORPORATED. **Sandblast Equipment & Supplies.** Disponível na internet no endereço: <http://www.kehm.com/>
- [37] POTTERS. **Especificação de Microesferas de Vidro.** Disponível na internet no endereço: <http://www.potters.com.br/>
- [38] DREMEL INDUSTRY. **Tools and Accessories.** Disponível na internet no endereço: <http://www.dremel.com/>
- [39] KOELSCH, J. R. **Troubleshooting Finish Problems.** *Manufacturing Engineering*, p. 53 – 55, setembro 1994.
- [40] ESCOLA TÉCNICA DE FLORIANÓPOLIS. **Estado de Superfície.** Disponível na internet no endereço:
<http://www.bibvirt.futuro.usp-acervo-matdidat.tc2000-des-técnico-aula30.pdf>
- [41] PRECISION DEVICES INC. **Surface Metrology Guide.** Disponível na internet no endereço: <http://www.predev.com/>
- [42] SLOAN, J. **Spray-On Tooling Hopes to Slash Mold Load Times.** *IMMNET Magazine*, abril, 1998.

- [43] HERMAN, H.; SAMPATH, S. **Thermal Spray Coatings**. *Department of Materials Science and Engineering*, State University of New York, p. 1 – 17. Disponível na internet no endereço:
<http://www.doll.eng.sunysb.edu/ts/thermal/article1.html>
- [44] EFUNDA INDUSTRY. **Surface Treatments**. Disponível na internet no endereço: <http://www.efunda.com>
- [45] METAL SPRAY SUPPLIERS (N.Z) LTD. **Introducing in the Spray Metal Technologies**. Disponível na internet no endereço:
<http://www.metal-spray.co.nz/>
- [46] BOYER, E. H.; GALL, T. L. **Metals Handbook**. *American Society for Metals*, 7^o edição, Ohio, setembro 1992.
- [47] ZHANG, H.; WANG, G.; LUO, Y.; NAKAGA, T. **Rapid Hard Tooling by Plasma Spraying for Injection Molding and Sheet Metal Forming**. *Thin Solid Films n^o 390*, p. 7 – 12, 2001.
- [48] PHAM, D. T.; DIMOV, S.; LACAN, F. **Firm Tooling Bridging the Gap Between Hard and Soft Tooling**. *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN 1367 – 2436, p. 196 – 203, Inglaterra, 1998.
- [49] ARTHUR, A.; DICKENS, M.; COBB, R. C. **Using Rapid Prototyping To Produce Electrical Discharge Machining Electrodes**. *Rapid Prototyping Journal*, volume 2, p. 4-12, 1996.
- [50] METAL FINISH INDUSTRY. **Types of Shops**. Disponível na internet no endereço:
<http://www.glrprr.uiuc.edu/packets/finishing/overview.html>.
- [51] ENCICLOPÉDIA BRITÂNICA. Disponível na internet no endereço:
<http://www.britannica.com/>
- [52] RENNIE, A. E. W.; BOLKING, C. E.; BENNETT, G. R. **Electroforming of Rapid Prototyping Mandrels for Electro-discharge Machining Electrodes**. *Journal of Materials Processing Technology*, volume 110, p. 186 – 196, março 2001.
- [53] BURNS, D. T. **Analysis of 1 Micron Thickness Metal Coating Effects on Stereolithography Rapid Tooling for Injection Molding**. *University of Massachusetts Lowell*, Massachusetts, 1996.
- [54] SOTIROPOULOS, S.; BROWN, I. J.; AKAY, G.; LESTER, E. **Nickel Incorporation Into a Hollow Fibre Microporous Polymer: a Preparation Route for Novel High Surface Area Nickel Structures**. *Materials Letters 35*, p. 383 – 391, 1998.

- [55] LUAN, B.; YEUNG, M.; WELLS, W.; LIU, X. **Chemical Surface Preparation for Metallization of Stereolithography Polymers.** *Applied Surface Science*, nº156, p. 26 – 38, 2000.
- [56] MANN, D. A.; LEYENDECKER, F. **Adhesion Aspects of Plastics Composites Metallized by a Combined Vacuum-electrochemical Deposition Process.** *Surface and Coatings Technology*, p. 691 – 695, 1994.
- [57] ATOTECH DO BRASIL GALVANOMÉTRICA LTDA. **Processos de Metalização de Plásticos.** *Instruções Técnicas*, ver. 02, 2001.
- [58] YARLAGADDA, P. K. D. V.; CHRISTODOULOU, P.; SUBRAMANIAN, V. S. **Feasibility Studies on the Production of Electro-discharge Machining Electrodes With Rapid Prototyping and the Electroforming Process.** *Journals of Materials Processing Technology* 89 – 90, p. 231 – 237, 1999.
- [59] YARLAGADDA, P. K. D. V.; ILYAS, I. P.; CHRISTODOULOU, P. **Development of Rapid Tooling for Sheet Metal Drawing Using Nickel Electroforming and Stereolithography Process.** *Journal of Materials Processing Technology*, p. 286 – 294, 2001.
- [60] BOREAL TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE. **Níquel Químico.** Disponível na internet no endereço: <http://www.borealnet.com.br>
- [61] EMPRESA JOINT METAL. **Prata Condutora.** Disponível na internet no endereço: <http://www.jointmetal.com.br>
- [62] INDÚSTRIA REALTEC. **Aplicações de Revestimentos à Base de TEFLON e DACROMET.** Disponível na internet no endereço: <http://www.realtec.ind.br/>
- [63] GE PLASTICS SOUTH AMERICA. **Pintura de Peças em Plásticos de Engenharia.** Disponível na internet no endereço: <http://www.geplastics.com.br/>
- [64] GE PLASTICS. **Metallization Guide.** P. 5 – 12, 1995.
- [65] BOC EDWARDS COMPANY. **Sputter Coating of Sem Samples by Ralf Reuschling.** Disponível na internet no endereço: <http://www.evt/products/tfd/emsys-reuschling.html>
- [66] GOMIDE, G. B. **Estudo de Pós-Cura em Resinas Utilizadas em Estereolitografia.** *Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFSC*, Florianópolis, abril de 2000.
- [67] COLTON, J.; BLAIR, B. **Experimental Study of Post-build Cure of Stereolithography Polymers for Injection Molds.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 5, p. 72 – 81, 1999.

- [68] CHO, N. I.; YONGTAE, Y. **Preparation of Copper Films by Metal Organic Chemical Vapor Deposition on Various Substrates.** *Materials Science and Engineering B72*, p. 184 – 188, 2000.
- [69] CATÁLOGO DA BOC EDWARDS. **Edwards XE 200 – Xenosput Magnetron Sputter Coater.**
- [70] NAVINSEK, B.; PANJAN, P.; MILOSEV, I. **PVD Coatings Environmentally Clean Alternative to Electroplating and Electroless Process.** *Surface and Technology 116 – 119*, p. 476 – 487, 1999.
- [71] HOPKINSON, N.; DICKENS, P. **Predicting Stereolithography Injection Mould Tool Behavior Using Models to Predict Ejection Force and Tool Strength.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 38, p. 47 –57, 2000.
- [72] MCLAUGHLIN, R. M. **A Structural Analysis and Design of Aces Stereolithography Inserts for Rapid Tooling of Prototype Injection molds.** *University of Massachusetts, Pós-graduação em engenharia plástica, Massachusetts*, 1996.
- [73] HOPKINSON, N.; DICKENS, P. M. **Using stereolithography Tools for Injection Moulding: Research Into Tensile Tool Failure and Unexpected Benefits of the Process.** *Proc. Instn Mech Engrs*, volume 214, p. 891 – 900, março 2000.
- [74] REPLIFORM COMPANY. **Benefits of Repliform’s Mold Inserts.** Disponível na internet no endereço: <http://www.repliforminc.com>
- [75] XU, F.; LOH, H. T.; WONG, Y. S. **Considerations and Selection of Optimal Orientation for Different Rapid Prototyping Systems.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 5, p. 54 – 60, 1999.
- [76] CEDORE, T.; LE BAUNT, Y.; PALMER, A.; COLTON, J. **Design Rules for Stereolithography Injection Molding Inserts.** *Georgia Institute of Technology, Atlanta*, p. 193 – 209.
- [77] RENNIE, A. E. W.; BOCKING, C. E.; BENNETT, G. R. **Electroforming of Rapid Prototyping Mandrels for Electro-discharge Machining Electrodes.** *Journal of Materials Processing Technology*, nº 110, p. 186 – 196, 2001.
- [78] PRENTICE, G. A.; CHEN, K. S. **Effects of Current Density on Adhesion of Copper Electrodeposits to Polyamide Substrates.** *Chapman & Hall*, p. 971 – 977, Janeiro 1998.
- [79] BERTSCH, A.; BERNHARD, P.; VOGT, C.; RENAUD, P. **Rapid Prototyping of Small Size Objects.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 4, p. 259 –266, 2000.

- [80] ALURU, R.; KEEFE, M.; ADVANI, S. **Simulations of Injection Molding Into Rapid Prototyping Molds.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 7, p. 42 – 51, 2001.

7.2 BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

- [81] KIRKLAND, C. **Powder Injection Micromolding.** *IMMNET Magazine*, Junho, 1998.
- [82] LI, Y.; GARGIULO, E.; KEEFE, M. **Studies in Direct Tooling Using Stereolithography.** *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, volume 122, p. 316 – 322, 1999.
- [83] WONSILD, B.; JORGENSEN, T. H.; MOOS, N. **Test and Development of Manufacturing Processes for Injection Moulding Tools From RPT Models.** *Danish Technological Institute Centre for Product Development*, p. 235 – 252.
- [84] FÜRSTENAU, E. **Novo Dicionário de Termos Técnicos Inglês-Português.** *Editora Globo*, 18ª edição, 1994.
- [85] SHELLABEAR, M. **Benchmark Study of Accuracy and Surface Quality in RP Models.** *Raptec*, Birmingham, GB, junho 1999.
- [86] ULLET, F. S.; SCHULTZ, F. W.; CHARTOFF, R. P. **Novel Liquid Crystal Resins for Stereolithography Processing Parameters and Mechanical Analysis.** *Rapid Prototyping Journal*, volume 6, p. 8 – 17, 2000.
- [87] AGOSTINHO, L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões.** *Editora Edgard Blücher*, São Paulo, 1977.