

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

**UTILIZAÇÃO DO PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO
(FDM) NA FABRICAÇÃO RÁPIDA DE INSERTOS PARA INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS**

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ AGUIOMAR FOGGIATTO

FLORIANÓPOLIS, MARÇO-2005

UTILIZAÇÃO DO PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO
(FDM) NA FABRICAÇÃO RÁPIDA DE INSERTOS PARA INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS

JOSÉ AGUIOMAR FOGGIATTO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Carlos Henrique Ahrens, Dr.Eng.
Orientador

Gean Vitor Salmoria, Dr.Ing.
Co-orientador

José A. Bellini Da Cunha Neto, Dr.
Coordenador do Programa

BANCA EXAMINADORA

André Ogliari, Dr.Eng.

Carlos Henrique Ahrens, Dr.Eng. - Presidente

Jonas de Carvalho, Ph.D. (USP – São Carlos)

Paulo Antônio Pereira Wendhausen, Dr.Ing.

Rosario Elida Suman Bretas, Ph.D. (UFSCAR) - Relatora

BIOGRAFIA DO AUTOR

José Aguiomar Foggiatto, 41, é engenheiro mecânico formado em 1989 pela Universidade Federal do Paraná. Em 1997 defendeu sua dissertação de mestrado na Universidade Federal de Santa Catarina na área Projeto e Análise de Componentes Mecânicos. Desde 1989 é professor do Departamento Acadêmico de Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR.

Todo o meu saber consiste em saber que pouco sei.
Sócrates

A minha mãe (*in memoriam*)

A minha esposa Joceli, meu grande amor

AGRADECIMENTOS

Aos professores Carlos Henrique Ahrens e Gean Vitor Salmoria pela orientação, pela amizade e pela confiança depositada na realização deste trabalho.

Aos amigos do CIMJECT, Adriano, Alan, Anderson, Armando, Badotti, Bruno, Busato, Clauber (Pereirinha), Cristiano, Diego, Diogo, Diovani, Félix, Fraga, Fred, Humberto, Janaína, João, Lafratta, Lelo, Malone, Mathias, Pereira, Priscilla, Wesley e mais aqueles que a minha memória não permitiu recordar, pelo companheirismo, amizade e apoio nos momentos críticos.

Ao professor Valderes Drago e ao Enio Lima Jr., do Departamento de Física da USFC, pelo apoio e dedicação nos trabalhos de recobrimento realizados nesse trabalho.

A minha amiga Ana Verdasca que em um período muito importante soube aconselhar, apoiar e fazer com que minhas decisões fossem acertadas.

As Empresas Boreal Tratamentos de Superfície e Atotech do Brasil pela disponibilidade e doação dos materiais para os recobrimentos.

Aos professores Milton Borsato, Jorge Luis Erthal e Neri Volpato do CEFET-PR pela amizade, apoio e pela disponibilização da máquina de prototipagem rápida FDM 2000.

Aos estagiários do Laboratório de Prototipagem Rápida do CEFET-PR (antes no NuPES e depois no NuFER) pela dedicação e empenho na confecção dos insertos.

Aos amigos do DAMEC (CEFET-PR), por viabilizarem o meu afastamento das atividades de docência.

Ao Sr. Bene Padovani (Stratasys Inc.) pelas palavras de incentivo e por intermediar a doação dos insertos de PC e PPSF.

Aos meus amigos Richard, Rosamelia, Ricardo, Jackson, Estela, Junior, Novotny e Vanessa que mesmo a distância continuaram torcendo pela conclusão desse trabalho.

A minha família pelo apoio em todos os momentos.

Ao CEFET-PR e à CaPES-PICDT pelo suporte financeiro.

Sumário

Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Siglas Utilizadas	xvii
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xx
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Apresentação do Problema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodologia e Estrutura do Trabalho.....	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Prototipagem Rápida	6
2.2.1 Sistemas de Prototipagem Rápida	9
2.2.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).....	10
2.3 Ferramental Rápido	22
2.3.1 Definição e classificação	22
2.3.2 Ferramental rápido direto por estereolitografia.....	23
2.3.3 Ferramental rápido direto por FDM	27
CAPÍTULO 3 - AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO PROCESSO FDM SOBRE CARACTERÍSTICAS DE PEÇAS FABRICADAS EM ABS	33
3.1 Materiais e Métodos	36
3.1.1 Medições de rugosidade de peças em ABS.....	36
3.1.2 Análise dimensional linear e angular	37
3.1.3 Ensaio mecânico de tração, dilatométrica e calorimetria diferencial de varredura	40
3.2 Resultados e Discussões.....	43

3.2.1	Medições de rugosidade de peças em ABS	43	
3.2.2	Análise dimensional linear e angular	44	
3.2.3	Ensaio mecânico de tração, dilatometria e DSC.....	46	
CAPÍTULO 4 - MOLDAGEM POR INJEÇÃO EM INSERTOS DE ABS			
FABRICADOS POR FDM.....			53
4.1	Inserto de ABS com Parâmetros de Construção Padrão	53	
4.1.1	Justificativa	53	
4.1.2	Procedimento.....	54	
4.1.3	Resultados e discussões	58	
4.2	Inserto de ABS com Parâmetros de Construção Refinados.....	60	
4.2.1	Justificativa	60	
4.2.2	Procedimento.....	60	
4.2.3	Resultados e discussões	67	
4.3	Insertos de ABS com sistema de refrigeração	75	
4.3.1	Justificativa	75	
4.3.2	Procedimento.....	76	
4.3.3	Resultados e discussões	79	
4.4	Inserto de ABS do tipo macho/fêmea.....	84	
4.4.1	Justificativa	84	
4.4.2	Procedimento.....	84	
4.4.3	Resultados e discussões	86	
CAPÍTULO 5 - MOLDAGEM POR INJEÇÃO EM INSERTOS DE ABS COM			
RECOBRIMENTO SUPERFICIAL E EM INSERTOS DE PC E PPSF.....			91
5.1	Insertos de ABS com recobrimento superficial.....	91	
5.1.1	Justificativa	91	
5.1.2	Recobrimento com deposição de níquel-fósforo sem eletrodos	92	
5.1.3	Recobrimento com níquel-cobre-cromo.....	99	
5.1.4	Recobrimento polimérico	106	

5.1.5	Conclusões.....	109
5.2	Insertos de PC e de PPSF.....	110
5.2.1	Injeção de peças em insertos de PC.....	112
5.2.2	Resultados e discussões sobre a injeção em insertos de PC.....	113
5.2.3	Injeção de peças em insertos de PPSF.....	114
5.2.4	Resultados e discussões sobre a injeção em insertos de PPSF.....	115
5.2.5	Conclusões sobre a utilização de insertos de PC e PPSF na moldagem por injeção	117
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		119
6.1	Conclusões.....	119
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	124
REFERÊNCIAS.....		125
ANEXO 1 – PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO		133
ANEXO 2 – POLÍMEROS UTILIZADOS PARA A INJEÇÃO.....		140
ANEXO 3 - MÉTODO DA INJEÇÃO PROGRESSIVA		146
ANEXO 4 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO.....		149
ANEXO 5 – PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO REFINADOS UTILIZADOS NOS INSERTOS EM ABS		155

Lista de Figuras

Figura 1 – Estrutura metodológica do trabalho.....	3
Figura 2 – Número de máquinas de prototipagem instaladas por ano no mundo.....	9
Figura 3 - Número de máquinas de prototipagem instaladas por ano no Brasil.	9
Figura 4 – Etapas do Processo FDM.....	13
Figura 5 – Esquema simplificado do processo FDM.....	14
Figura 6 – Entrada do material no cabeçote extrusor com o auxílio dos rolos tracionadores (Ahn <i>et al.</i> , 2002).	15
Figura 7 – Calibragem da máquina FDM (Stratasys, 2001).....	16
Figura 8 – Efeito escada numa superfície curva (Hope <i>et al.</i> , 1997).	17
Figura 9 – Exemplos de disposições de uma peça na plataforma.....	17
Figura 10 – Vazios no interior da peça.	19
Figura 11 – Sobreposição entre varredura (<i>raster</i>) e contorno.....	19
Figura 12 – Vazio no núcleo da peça devido ao mal dimensionamento do espaçamento.	20
Figura 13 – Exemplo de base e suporte em uma peça prototipada.....	21
Figura 14 – Fases do processo DIRECT-AIM: (a) Insertos com os tubos de cobre; (b) Preenchimento dos insertos; (c) Inserto preenchido.....	25
Figura 15 – Peças em ABS e PEBD injetadas nos insertos de compósito (Masood & Song, 2004).	29
Figura 16 – Orientação dos insertos em ABS na plataforma (Hopkinson, 2001).....	30
Figura 17 – Base da região central do núcleo 1 colapsada (Hopkinson, 2001).....	31
Figura 18 – Estrutura química do ABS.	34
Figura 19 – Representação das posições de construção das placas em ABS.....	36
Figura 20 - Representação esquemática do sentido de medição da rugosidade para as placas horizontais.	37
Figura 21 - Geometria da peça para a análise dimensional.....	38
Figura 22 – Variação angular entre as rampas da primeira geometria.	40

Figura 23 - Variação dimensional linear externa (a) e interna (b) na direção x e y da base e da parede da peça com espessura de camada igual a 0,178mm.	44
Figura 24 - Variação dimensional linear externa (a) e interna (b) na direção X e Y da base e parede da peça com espessura de camada 0,254mm.....	45
Figura 25 - Variação dimensional linear externa (a) e interna (b) na direção Z das peças com espessura de camada 0,178 e 0,254mm.....	45
Figura 26 Resultados da análise da variação angular: (a) Ângulos=10, 15, 20, 25, 30 e 35°; (b) Ângulos=40, 41, 42, 43, 44 e 45°.	46
Figura 27 - Gráfico tensão versus deformação para o filamento de ABS (A), corpo de prova fabricado com parâmetros refinados (B) e com parâmetros padrões (C).47	47
Figura 28 – Presença de vazios na estrutura das peças construídas por FDM (Bellini & Güçeri, 2003).	48
Figura 29 – Micrografia da região fraturada do corpo de prova construído com parâmetros padrões.	49
Figura 30 - Micrografia da região fraturada do corpo de prova construído com parâmetros refinados.	49
Figura 31 – Gráfico resultante no ensaio de dilatométrica para os corpos de prova construídos com parâmetros padrões e refinados.	50
Figura 32 – Resultado da análise de DSC para uma amostra de ABS P400.....	51
Figura 33 – Geometria da primeira peça estudada.	55
Figura 34 – Insertos montados no porta-moldes.	56
Figura 35 – Aumento do espaçamento entre filetes e avaria no canal no inserto móvel.....	59
Figura 36 – Aumento do espaçamento entre filetes e avaria no canal no inserto fixo.	59
Figura 37 - Geometria do corpo de prova de tração ASTM D 638m tipo IV.	60
Figura 38 – Concepção final dos insertos para o corpo de prova ASTM D 638m	61
Figura 39 – Ilustração da influência do espaçamento (<i>gap</i>) positivo sobre o acabamento das superfícies	62

Figura 40 – Ilustração do melhoramento da superfície com a utilização do espaçamento (<i>gap</i>) nulo.....	63
Figura 41 – Insertos do corpo de prova antes da montagem.....	64
Figura 42 – Vista traseira dos insertos do corpo de prova preenchidos com resina a base de poliéster no porta molde.	64
Figura 43 – Localização dos pontos submetidos ao ensaio de dureza Shore D.....	65
Figura 44 - Micrografias: (A) Parâmetro de construção padrão - (B) Parâmetro de construção refinado.	68
Figura 45 – Corpo de prova em PP injetado no inserto de ABS.....	69
Figura 46 – Delaminação e arredondamento no canal de injeção.....	69
Figura 47 – Desgaste nas arestas da cavidade do inserto	70
Figura 48 – Monitoramento da temperatura na superfície do inserto.	70
Figura 49 – Difrátogramas de raios X das amostras em PP injetadas em insertos de aço e ABS nas temperaturas de injeção T1.	71
Figura 50 – Difrátogramas de raios X das amostras obtidas em insertos de aço e ABS nas temperaturas de injeção T2.	72
Figura 51 – Diagrama tensão/deformação de corpos de prova em PP injetados em insertos de aço e de ABS a 170°C.	74
Figura 52 – Alternativas de concepções para os tubos de cobre: (a) Concepção em zero; (b) Concepção em oito; (c) Concepção em serpentina.....	76
Figura 53 – Procedimento inicial de preenchimento da parte traseira do inserto:	77
Figura 54 – Análise de distribuição de temperatura para três disposições de tubos.	80
Figura 55 – Gráfico representativo do início da refrigeração do inserto.	80
Figura 56 – Perfil da variação de temperatura para inserto sem refrigeração.	81
Figura 57 – Perfil da variação de temperatura para inserto com refrigeração.	81
Figura 58 – Influência da temperatura da água sobre o tempo de ciclo de injeção. .	82
Figura 59 - Influência da temperatura da água sobre a temperatura máxima no canal de injeção.	83
Figura 60 – Geometria do inserto tipo macho/fêmea.....	84

Figura 61 – Modelos geométricos dos insertos antes e depois das modificações.....	85
Figura 62 – Disposição de construção do inserto macho na máquina de prototipagem rápida.	85
Figura 63 – Peça em PP injetada no inserto do tipo macho/fêmea.....	86
Figura 64 – Monitoramento da temperatura no inserto de ABS do tipo macho/fêmea.	87
Figura 65 – Aspecto da superfície dos insertos após a injeção de 18 peças de PA:	88
Figura 66 – Delaminação no inserto fêmea.....	88
Figura 67 - Aspecto dos insertos construídos com resina SOMOS 7110 ao final do trigésimo segundo ciclo de injeção de PA 6.6 (Gonçalves, 2003).....	89
Figura 68 – Corpos de prova antes e depois do recobrimento com níquel-fósforo. ...	95
Figura 69 – Detalhe do canal de injeção com região sem recobrimento.....	97
Figura 70 – Insertos em ABS recobertos com níquel-fósforo.....	97
Figura 71 – Filme de Ni-P retirado no início do processo de injeção.	98
Figura 72 – Insertos colapsados devido aderência entre peça moldada e inserto. ...	99
Figura 73 – Seqüência ilustrando falha no recobrimento devido resíduos do ataque químico: (a) Inserto após ataque químico; (b) Inserto após retirada do excesso da solução sulfo-crômica; (c) Em destaque: região sem cobertura (d) Inserto totalmente coberto.	101
Figura 74 – Disposição dos insertos do tipo macho/fêmea na gancheira: (a) Inserto fêmea; (b) Inserto macho.	101
Figura 75 – Insertos do tipo macho/fêmea metalizados: (a) Inserto fêmea; (b) Inserto macho.	102
Figura 76 – Vazios na superfície metalizada do inserto macho	102
Figura 77 – Peça em polipropileno injetada em inserto de ABS metalizado.	103
Figura 78 – Peças em ABS aderidas no inserto metalizado: (a) Aderência no inserto fêmea; (b) Aderência no inserto macho.	104
Figura 79 – Avaria na entrada do canal do inserto fêmea.	104
Figura 80 – Defeitos no filme metálico no inserto macho: (a) Fissuras no filme metálico; (b) Fissuras no filme metálico; (c) Corrugação no filme metálico.....	105

Figura 81 – Defeitos no filme metálico no inserto fêmea.	105
Figura 82 – Peça em ABS injetada em um inserto de ABS com recobrimento polimérico.	108
Figura 83 – Região onde o filme polimérico não resistiu ao esforço de extração da peça.	109
Figura 84 – Estrutura química do policarbonato.	110
Figura 85 – Estrutura química do polifenilsulfona.	111
Figura 86 – Corpo de prova em PA injetado no inserto de PC.	113
Figura 87 - Perfil da variação de temperatura para inserto de PC.	114
Figura 88 - Inserto de PPSF e última peça injetada em PA.	115
Figura 89 – Perfil da variação de temperatura para o inserto de PPSF.	116
Figura 90 – Insertos em PPSF depois da injeção da primeira peça em ABS: (a) Inserto móvel; (b) Inserto fixo.	117
Figura 91 – Tipos de suportes.	134
Figura 92 – Paredes com ângulo de auto suporte (self supporting angle) ajustadas para 50°.	134
Figura 93 - Estilo de preenchimento perímetro / varredura (<i>perimeter / raster</i>)	136
Figura 94 - Estilo de preenchimento profundidade de contorno (<i>contour to depth</i>) com 2 contornos.	136
Figura 95 – Estilo sólido fino (<i>solid fine</i>)	137
Figura 96 – Estilo sólido dupla largura (<i>solid double wide</i>).....	137
Figura 97 – Estilo esparso (<i>sparse</i>).....	137
Figura 98 – Detalhamento da amostra utilizada nos ensaios para determinação do coeficiente de atrito estático.	150
Figura 99 – Equipamento Moldfriction acoplado sobre uma máquina universal de ensaios mecânicos.	150
Figura 100 – Representação esquemática do equipamento Mouldfriction.	152
Figura 101 – Diagramas força-deslocamento para o ensaio a 30°C das amostras em ABS recobertas.....	153

Lista de Tabelas

Tabela 1– Classificação dos países segundo a quantidade de máquinas de prototipagem instaladas.	8
Tabela 2 – Classificação das principais tecnologias de Prototipagem Rápida.	10
Tabela 3 – Distribuição das máquinas Stratasys no Brasil.	12
Tabela 4 – Relação dos materiais utilizados pelas máquinas da Stratasys.	22
Tabela 5 – Componentes dos filamentos de compósito.	28
Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos filamentos de compósito.	28
Tabela 7 – Dados sobre a fabricação dos insertos.	31
Tabela 8 – Efeitos de cada monômero nas propriedades do ABS (Harper, 2000).	34
Tabela 9 – Propriedades do ABS P-400.	35
Tabela 10 - Sumário das placas utilizadas para medição da rugosidade.	37
Tabela 11 – Parâmetros de construção utilizados nos corpos de prova	41
Tabela 12 - Sumário dos resultados do ensaio de rugosidade.	43
Tabela 13 - Propriedades mecânicas sob tração do ABS para FDM.	47
Tabela 14 – Valores do coeficiente de dilatação térmica e da temperatura de amolecimento para o ABS.	50
Tabela 15– Etapas e atividades de projeto do molde Daré (2001).	54
Tabela 16– Parâmetros de construção padrão.	55
Tabela 17 – Afinidade do ABS com outros polímeros (Adaptada de DSM, 1999).	56
Tabela 18 – Parâmetros de solubilidade de alguns polímeros.	57
Tabela 19 – Parâmetros de injeção para o PEBD e para o PP.	58
Tabela 20 – Parâmetros de construção refinados.	62
Tabela 21 – Parâmetros de injeção para o PP (1º etapa).	65
Tabela 22 - Parâmetros de injeção para o PP (2º etapa).	67
Tabela 23 - Dureza corpos de prova em epoxi RenCast 436 (Huntsman®).	71
Tabela 24 – Dureza Shore D dos corpos de prova.	73

Tabela 25 - Valores médios de módulo de elasticidade e resistência a tração para corpos de prova em PP injetados em insertos de aço e ABS.....	74
Tabela 26 – Parâmetros de injeção utilizados na injeção de peças em POM e PP..	78
Tabela 27 – Parâmetros de injeção utilizados no inserto do tipo macho/fêmea.	86
Tabela 28 – Duração do ataque químico, ativação e deposição do níquel.....	95
Tabela 29 - Parâmetros de injeção utilizados na injeção de peças em ABS.	98
Tabela 30 – Parâmetros de injeção utilizados no inserto metalizado.	103
Tabela 31 – Coeficientes de expansão térmica linear.	106
Tabela 32 – Propriedades típicas do Ren Cast 452 A/B (Huntsman®) curado.	107
Tabela 33 – Parâmetros de injeção para o ABS GPM 6300 (inserto macho/fêmea).	108
Tabela 34 – Propriedades do ABS, PC e do PPSF.	111
Tabela 35 – Comparação entre os tempos de fabricação do inserto fixo nas máquinas FDM Titan e FDM 2000.....	112
Tabela 36 - Parâmetros de injeção para o POM e para o PA (inserto de PC).....	112
Tabela 37 - Parâmetros de injeção para o POM e para o PA (inserto de PPSF). ..	114
Tabela 38 – Resumo dos principais experimentos realizados com moldagem por injeção.	123
Tabela 39 - Parâmetros de ensaio e resultados obtidos para o coeficiente de atrito estático entre superfícies de ABS e PEAD.	153

Lista de Siglas Utilizadas

ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno	<i>(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)</i>
ACES	Estrutura Precisa em Epóxi Transparente	<i>(Accurate Clear Epoxi Solid)</i>
AIM	ACES para Moldagem por Injeção	<i>(ACES Injection Molding)</i>
ASA	Acrilato Estireno Acrilonitrila	<i>(Acrylate-Styrene Acrylonitrile)</i>
CAD	Projeto Auxiliado por Computador	<i>(Computer Aided Design)</i>
CAM	Fabricação Auxiliada por Computador	<i>(Computer Aided Manufacturing)</i>
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura	<i>(Differential Scanning Calorimetry)</i>
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição	<i>(Fused Deposition Modeling)</i>
HI	Alto Impacto	<i>(High Impact)</i>
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear	<i>(Linear Variable Differential Transformer)</i>
PA	Poliamida	<i>(Polyamide)</i>
PBT	Polibutileno Tereftalato - Poliéster	<i>(Polybutylene Terephthalate - Polyester)</i>
PC	Policarbonato	<i>(Polycarbonate)</i>
PEAD	Poliétileno de Alta Densidade	<i>(HDPE- High Density Polyethylene)</i>
PEBD	Poliétileno de Baixa Densidade	<i>(LDPE- Low Density Polyethylene)</i>
PET	Politereftalato de Etileno	<i>(Polyethylene Terephthalate)</i>
POM	Polioximetileno ou Poliacetal	<i>(Polyacetal)</i>
PMMA	Acrílico	<i>(Polymethylmethacrylate)</i>
PP	Polipropileno	<i>(Polypropylene)</i>
PPO	Polioxifenileno	<i>(Polyphenylene Oxide - Styrene)</i>
PPSF ¹	Polifenilsulfona	<i>(Polyphenylsulfone)</i>
PS	Poliestireno	<i>(Polystyrene)</i>
PVA	Poliacetato de Vinila	<i>(Polyvinyl Acetate)</i>
PVC	Policloreto de vinila	<i>(Polyvinyl Chloride)</i>
RP	Prototipagem Rápida	<i>(Rapid Prototyping)</i>
RT	Ferramental Rápido	<i>(Rapid Tooling)</i>
RTV	Vulcanização a Temperatura Ambiente	<i>(Room Temperature Vulcanizing)</i>
SAN	Estireno Acrilonitrila	<i>(Styrene Acrylonitrile)</i>
SL	Estereolitografia	<i>(Stereolithography)</i>
SLS	Sinterização Seletiva a Laser	<i>(Selective Laser Sintering)</i>

¹ Também designado por PPSU

SML	Linguagem de Modelagem da Stratasys	<i>(Stratasys Modeling Language)</i>
STL	Arquivo de Estereolitografia	<i>(Stereolithography File)</i>
TPE	Elastômero termoplástico	<i>(Thermoplastic Elastomer)</i>
UV	Ultra-violeta	<i>(Ultraviolet)</i>

RESUMO

O processo denominado Ferramental Rápido (*Rapid Tooling* – RT) possibilita a produção de protótipos no material especificado no projeto. Os equipamentos de prototipagem rápida de diferentes tecnologias são empregados na fabricação de insertos (moldes) que podem ser usados na moldagem por injeção. No entanto, o processo denominado Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), foi praticamente inexplorado para essa aplicação, mesmo tendo um grande número de máquinas instaladas pelo mundo. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o uso de insertos fabricados pelo processo FDM na moldagem por injeção de termoplásticos. Para tanto foram determinadas as propriedades de corpos de prova em ABS para conjuntos distintos de parâmetros construtivos do equipamento de FDM e em seguida foram confeccionados insertos com três geometrias diferentes, para realização de experimentos de moldagem por injeção de termoplásticos. Os experimentos utilizaram insertos com diferentes parâmetros construtivos, refrigeração com água em temperaturas abaixo da ambiente e recobrimentos cerâmico, metálico e polimérico. Além do ABS, foram utilizados insertos em PC e PPSF. Nesse trabalho foram injetadas peças em PP, PE, POM, PA e ABS. Os resultados mostraram que o processo FDM pode ser utilizado na fabricação de insertos para injeção desde que os termoplásticos injetados sejam “compatíveis” com o material do inserto. A escolha do par material do inserto/material a injetar deve considerar principalmente a temperatura de injeção, a resistência mecânica e a afinidade química entre os materiais.

ABSTRACT

Rapid Tooling technologies allow to obtain prototypes in the exact material assigned in the product design. Many Rapid Prototyping processes can be used for injection mold manufacture, however, the Fused Deposition Modeling technology (FDM) practically has not been explored for this application, even though there is a large number of machines installed worldwide. The objective of this research is to evaluate the use of mold inserts manufactured by FDM process for the injection of thermoplastic material. To achieve that, some specimens have been produced and used to determine elastic modulus, tensile strength and surface roughness using different processing parameters. After that, the mold inserts for three different part geometries were built in order to carry out the injection tests. Different FDM processing parameters were used to build the inserts. In addition, water at low temperature was used in a cooling system and three different types of insert coating (ceramic, metallic and polymeric) were tested. Other two insert materials, polycarbonate and polyphenylsulfone were analyzed. In this work the following injection materials were tested: Polypropylene, polyethylene, polyoxymethylene, polyamide and ABS. The results show that the FDM technology can be applied for prototype injection tooling, however it should be observed that the molding material and insert material need to be compatible. In order to choose a pair of insert and molding material one should consider mainly the injection temperature, the mechanical strength and chemical affinity between the two materials.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Problema

A necessidade de apresentar novos produtos ao mercado com rapidez, qualidade e a custos competitivos, tem motivado as empresas a investirem no desenvolvimento e na aquisição de novas tecnologias. Uma delas é a prototipagem rápida, que surgiu para auxiliar o meio produtivo a acelerar o processo de projeto de novos produtos (Chua *et al.*, 1999). A sua utilização tem se mostrado muito eficiente na detecção prematura de problemas, diminuindo a necessidade de alterações em fases mais adiantadas do projeto.

No entanto a principal limitação do uso da prototipagem rápida é o reduzido número de materiais disponíveis nos diversos processos existentes, pois idealmente se deseja que o protótipo seja feito com o mesmo material que o designado para a peça (Segal & Campbell, 2001). O processo de estereolitografia, por exemplo, é restrito ao uso de resinas termofixas com propriedades similares a alguns termoplásticos. A sua substituição, além de onerosa, em alguns casos, implica na substituição da unidade de laser. Outro exemplo, é o caso do processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM - Fused Deposition Modeling), onde em um de seus últimos modelos, a máquina FDM Titan, apresentou no máximo três materiais diferentes para a construção de protótipos (Stratasys, 2002).

Para que fosse possível a obtenção de protótipos em um número maior de materiais, foi desenvolvida uma técnica, denominada ferramental rápido (RT - Rapid Tooling), que utiliza a prototipagem rápida para a produção de ferramentas que serão empregadas na fabricação dos protótipos. Com isso foi possível satisfazer uma antiga necessidade dos profissionais que trabalham com o desenvolvimento de produtos, que era a possibilidade de testar e apresentar aos seus clientes, protótipos feitos no material designado no projeto, através de um processo definitivo de fabricação como a injeção, por exemplo.

As técnicas de ferramental rápido também permitiram que a produção de pequenos lotes de peças injetadas fosse realizada em um curto espaço de tempo e com custos mais reduzidos se comparados aos processos convencionais.

Embora essa técnica venha sendo desenvolvida e utilizada com sucesso nos processos de Estereolitografia (SL) e de Sinterização Seletiva a Laser (SLS), o

processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) tem sido praticamente inexplorado. Esse fato associado ao crescente número de instituições e empresas que vem adquirindo máquinas de prototipagem com essa tecnologia motivaram o desenvolvimento desta pesquisa.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o uso de insertos² fabricados pelo processo FDM na moldagem por injeção de termoplásticos.

Como objetivos secundários tem-se:

- Determinar a influência de diferentes parâmetros construtivos sobre as principais propriedades de peças fabricadas em ABS pelo processo FDM;
- Avaliar a injeção de termoplásticos em insertos de ABS construídos a partir de dois diferentes conjuntos de parâmetros construtivos;
- Comparar as propriedades mecânicas de peças em PP injetadas em insertos de ABS com peças injetadas em moldes metálicos;
- Avaliar o uso de um sistema de refrigeração em insertos de ABS com circulação de água a temperaturas abaixo da ambiente.
- Testar a utilização de insertos de ABS do tipo macho/fêmea.
- Avaliar o uso de recobrimentos cerâmico, metálico e polimérico em insertos de ABS;
- Testar a aplicação de insertos de policarbonato e polifenilsulfona, fabricados pelo processo FDM , na injeção de termoplásticos.

1.3 Metodologia e Estrutura do Trabalho

Para avaliar se os moldes construídos pelo processo FDM de prototipagem rápida são adequados para o uso na moldagem por injeção de termoplásticos o

² Inseto: Parte do molde de injeção que compreende a região moldante (cavidade) e que é fabricada separadamente e posteriormente montada nas placas do molde, como um postigo (Ribeiro Jr., 2003).

presente trabalho foi desenvolvido de acordo com a metodologia apresentada na seguinte estrutura, esquematizada na Figura 1.

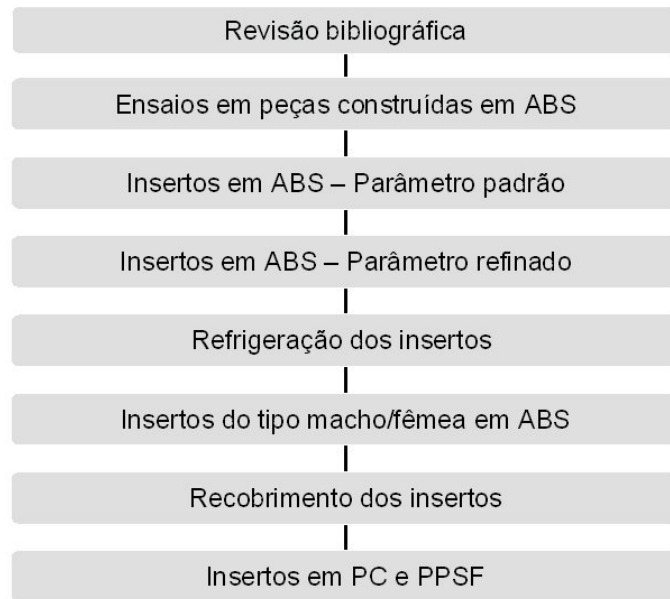


Figura 1 – Estrutura metodológica do trabalho.

Inicialmente fez-se uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos do processo de prototipagem rápida e ferramental rápido, que é apresentada no capítulo 2. Pelo fato de ser o objeto de estudo nesse trabalho o processo FDM de prototipagem rápida foi pesquisado mais intensamente e é apresentado de forma mais aprofundada. Ao final são apresentados e discutidos aspectos relativos aos dois trabalhos encontrados na literatura que utilizaram o processo FDM na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos.

Visando encontrar parâmetros mais adequados para a construção dos insertos pelo processo FDM procurou-se estudar o material utilizado e o método de fabricação de peças por esse processo. Assim, no capítulo 3 são descritos os principais ensaios realizados em peças de ABS construídas por FDM com diferentes parâmetros construtivos. São apresentados os resultados obtidos para rugosidade, análise dimensional linear e angular, ensaio mecânico de tração, microscopia, dilatométrica e calorimetria diferencial de varredura (DSC).

O capítulo 4 relata os experimentos relacionados com a moldagem por injeção em insertos de ABS construídos pelo processo FDM utilizando-se dos parâmetros construtivos avaliados no estudo descrito no capítulo 3. Inicialmente faz-se um relato sobre o experimento que visou avaliar a viabilidade de injetar peças

num inserto construído com os parâmetros pré-ajustados (*defaults*) para a máquina FDM 2000. Em seguida são apresentados os procedimentos e os resultados obtidos com a utilização de insertos construídos com parâmetros construtivos mais refinados, visando um melhoramento nas propriedades mecânicas e nas superfícies. No experimento seguinte um inserto do tipo macho/fêmea foi testado para a injeção de dois termoplásticos. Os resultados foram comparados com os de um inserto de mesma geometria construído por estereolitografia. O capítulo é finalizado com a descrição de um experimento realizado visando o melhoramento térmico dos insertos com a inserção de tubos de cobre para a circulação de água com temperatura abaixo da ambiente.

O capítulo 5 descreve os experimentos realizados buscando melhoramentos superficiais, térmicos e mecânicos através do uso de recobrimentos cerâmico, metálico e polimérico nos insertos de ABS. Finalizando o capítulo são descritos e discutidos os resultados dos experimentos de moldagem realizados em moldes confeccionados por dois outros materiais, disponíveis no processo FDM. O capítulo 6 apresenta as conclusões finais e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 -REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

No desenvolvimento de produtos de plástico que serão fabricados através do processo de moldagem por injeção, o projeto da peça deve ser realizado em consonância com o projeto do molde. Os erros não detectados na etapa de projeto implicarão em retrabalhos futuros e, conseqüentemente, no adiamento do lançamento do produto. Sendo assim, os projetos da peça e do molde devem receber atenção especial. É importante que o tempo para a produção dos moldes seja computado e controlado, pois normalmente a sua fabricação tem forte influência no tempo decorrido até o lançamento do produto (*time-to-market*). Nesse sentido as técnicas de ferramental rápido surgiram visando permitir a rápida obtenção de ferramentas para os processos de moldagem por injeção, estampagem, fundição, entre outros, através de algum processo de prototipagem rápida (Geiger & Özel, 2001). Adicionalmente, Jacobs (1995) afirma que o uso de ferramental rápido na moldagem por injeção permite a obtenção de lotes de peças injetadas no material de produção dispensando a necessidade da usinagem de cavidades piloto e reduzindo o tempo e o custo do projeto.

Quando essa técnica permite a obtenção do ferramental diretamente do arquivo de CAD ela é denominada de ferramental rápido direto e foi originariamente desenvolvida utilizando-se insertos de resina feitos através da tecnologia de prototipagem rápida denominada Estereolitografia (SL). O processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) é outra tecnologia de prototipagem rápida que tem sido bastante utilizada, apresentando a vantagem de produzir insertos metálicos que possuem uma boa resistência mecânica e permitindo a injeção de grandes lotes de peças, comparativamente a outros processos de ferramental rápido (Rosochowski & Matuszak, 2000).

O processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) tem tido grande aceitação no mercado, sendo que a empresa fabricante (Stratasys Inc.) atualmente é a segunda maior fabricante mundial de sistemas de prototipagem rápida. No entanto, o desenvolvimento dessa tecnologia para ferramental rápido direto é recente e restrito a poucos trabalhos como os de Masood *et al.* (1999) e Masood & Song (2004) que desenvolveram um novo material para esse fim, composto de uma

mistura de pó metálico e poliamida e Hopkinson (2001) que relatou seus experimentos ao injetar polipropileno e ABS em moldes de ABS.

O uso do processo FDM na fabricação de insertos para moldagem por injeção ampliará a difusão das técnicas de ferramental rápido direto dentro das empresas. Para que isso ocorra é importante que esse tema seja pesquisado com maior profundidade a fim de resolver os problemas existentes quando se usam insertos de materiais termoplásticos construídos por FDM para injetar outros materiais termoplásticos. Esta tese pretende contribuir na resolução desses problemas. Para permitir um melhor entendimento desse tema serão abordados a seguir as técnicas de prototipagem rápida e ferramental rápido que servirão de base para o desenvolvimento desse trabalho.

2.2 Prototipagem Rápida

Ulrich & Eppinger (1995) definem um protótipo como sendo uma aproximação do produto por meio de uma ou mais dimensões de interesse. A prototipagem, por sua vez, é o termo usado para descrever os processos de fabricação de protótipos e pode ser classificada cronologicamente como sendo manual, virtual e rápida. A prototipagem manual já vem sendo usada a muito tempo e seus protótipos são caracterizados pela falta de sofisticação e longo tempo para produção, sendo que levam em média 4 semanas para serem fabricados (Kai & Fai, 1997). A prototipagem virtual surgiu com o desenvolvimento dos sistemas de CAE/CAD/CAM, no início dos anos 80 e possibilitou que modelos computacionais fossem testados, analisados e modificados no lugar dos modelos físicos. Foi possível o desenvolvimento de modelos mais complexos além de facilitar o trânsito de informações do projeto entre os integrantes de toda cadeia de desenvolvimento num ambiente de engenharia simultânea. Sabino Netto (2003) observou como desvantagem o fato dos protótipos virtuais não serem uma representação tridimensional autêntica, levando o usuário a interpretações equivocadas.

O surgimento da prototipagem rápida, no final dos anos 80, possibilitou a obtenção de protótipos físicos num curto espaço de tempo. Wang (1998) relata que nesse processo, as informações são enviadas para a máquina diretamente de um modelo sólido construído em um sistema de CAD 3D e exportado para um formato padrão, comumente o STL. Podem ainda ser obtidas através de um modelo físico,

que depois de digitalizado é convertido para um modelo sólido e em seguida para o formato padrão. A forma construtiva é diferente das comumente utilizadas pelos sistemas tradicionais, que fabricam as peças retirando material. O processo de prototipagem rápida constrói as peças por meio da adição de sucessivas camadas.

Jacobs (1996) enumerou algumas das inúmeras possibilidades que o processo oferece:

- Verificação da funcionalidade de componentes em montagens;
- Avaliação de forma e função;
- Avaliação da manufaturabilidade;
- Disponibilização de pré-séries;
- Redução no tempo de projeto;
- Evita o retrabalho em ferramental.

Choi & Samavedam (2001) acrescentam que a prototipagem rápida pode ainda ser integrada a prototipagem virtual para permitir a visualização da influência dos parâmetros construtivos na qualidade do protótipo antes do início da sua construção.

O uso de sistemas de prototipagem rápida no Brasil ainda é modesto. Pode-se afirmar que, embora seja o país que mais possui máquinas de prototipagem rápida nas Américas do Sul e Central, essa quantidade está muito aquém, se comparada a países como os Estados Unidos, Japão e Alemanha conforme mostra a Tabela 1 (Wohlers, 2004). Esse baixo número de máquinas representa uma perda de competitividade no desenvolvimento de novos produtos. Sendo assim é importante que sejam tomadas iniciativas com o objetivo de desenvolver e difundir essa tecnologia, de forma a torná-la acessível às empresas brasileiras.

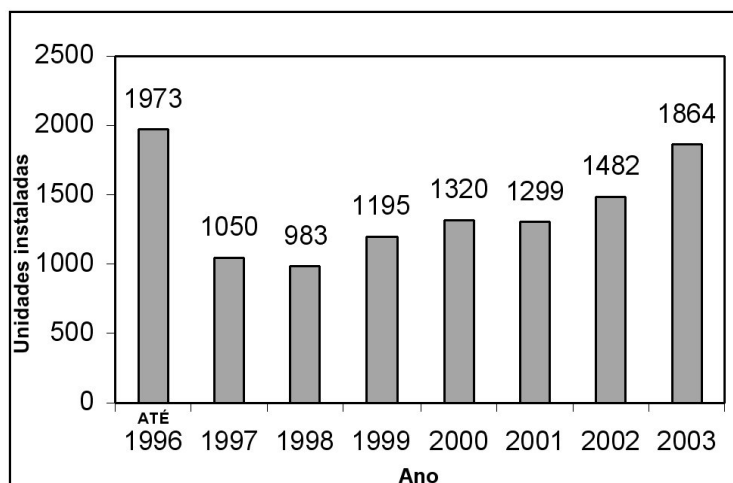
Segundo Wohlers (2004), foram instaladas em todo o mundo 11166 máquinas de prototipagem rápida até o final de 2003. A Figura 2 mostra que houve um crescimento nesse setor nos últimos anos, em termos mundiais. Uma das razões para esse crescimento foi a grande aceitação que as impressoras tridimensionais tiveram no mercado. A situação para o Brasil é também mostrada na

Figura 3, onde destaca-se que, nos últimos 3 anos, o número total de máquinas instaladas foi duplicado.

Tabela 1– Classificação dos países segundo a quantidade de máquinas de prototipagem instaladas.

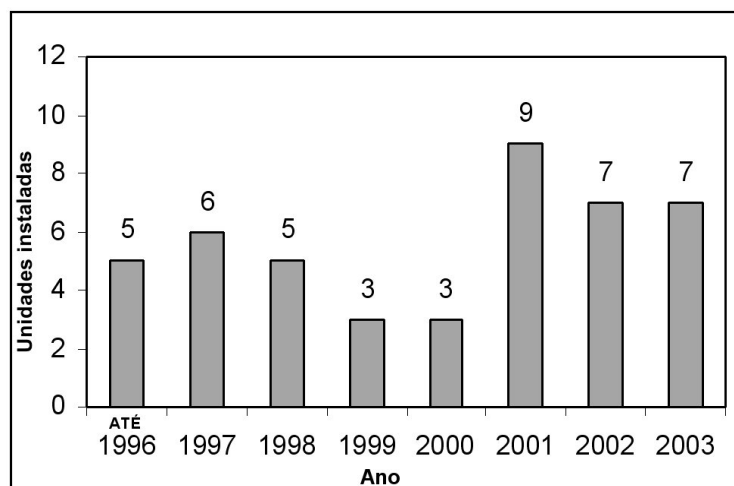
Classif.	País	Nº Máquinas
1º	Estados Unidos	4578
2º	Japão	1917
3º	Alemanha	984
4º	China	716
5º	Inglaterra	479
6º	Itália	379
7º	França	311
8º	Coréia	242
9º	Taiwan	158
10º	Suécia	115
11º	Canadá	104
12º	Índia	92
13º	Espanha	91
14º	Turquia	72
15º	Austrália	64
16º	Malásia	62
17º	Rússia	57
18º	Singapura	55
19º	Tailândia	47
20º	Suíça	47
21º	Brasil	45

Fonte: Wohlers Report 2004, <http://wohlersassociates.com>, used by permission.



Fonte: Wohlers Report 2004, <http://wohlersassociates.com>, used by permission.

Figura 2 – Número de máquinas de prototipagem instaladas por ano no mundo.



Fonte: Wohlers Report 2004, <http://wohlersassociates.com>, used by permission.

Figura 3 - Número de máquinas de prototipagem instaladas por ano no Brasil.

2.2.1 Sistemas de Prototipagem Rápida

Atualmente existem no mercado inúmeros sistemas disponíveis de prototipagem rápida, o que torna muito difícil o estabelecimento de uma classificação que atenda bem a todas as tecnologias. Kulkarni *et al.* (2000) apresentaram uma relação com 18 diferentes tipos de tecnologias e as classificou segundo o método de adesão utilizado, ou seja, métodos baseados em adesão química, sinterização ou colagem. Essa classificação está representada na Tabela 2 (Kulkarni *et al.*, 2000; Lencina, 2004).

Tabela 2 – Classificação das principais tecnologias de Prototipagem Rápida.

	Sigla	Processo de Prototipagem Rápida	Instituição/Empresa	
Adesão Química	Deposição	FDM	Modelagem por fusão e deposição	Stratasys Inc.
		SMM	Sanders Model Maker	Sanders Prototype
		BPM	Manufatura por partícula balística	BPM Inc.
		SDM	Manufatura por deposição de formas	Stanford
		CC	Escultura de contornos	USC
		DMD	Deposição direta de metal	Michigan
		TSF	Fabricação topográfica de cascas	Formus Inc.
	Fotocura	SGC	Cura sólida por máscara	Cubital Inc. (Israel)
		STEREOS	Fotolitografia	EOS (Alemanha)
		SL	Estereolitografia	3D Systems Inc.
Sinterização	FPM	Moldagem de formas livres por pó	RPI Inc.	
	CAM-LEM	Fabricação assistida por computador de materiais laminados	Univ. Case Western e CAM-LEN Inc	
	EOSINT	Sinterização por laser	EOS (Alemanha)	
	SLS	Sinterização seletiva a laser	3D Systems Inc	
Colagem	SOLIDCENTER	Laminação de papel	Kira Corp. (Japão)	
	LOM	Modelagem de objetos laminados	Helysys	
	3DP	Impressão tridimensional	MIT, Z-corp, 3D systems	
	JP5	Sistema JP5	Schroff	

Diversos autores, como Karapatis *et al.* (1998), Leu & Zhang (1998), Gomide (2000), e Wohlers (2002), também apresentaram classificações com a descrição detalhada dos principais sistemas de prototipagem rápida. Nesse trabalho apenas o processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) será apresentado considerando sua relevância no contexto da pesquisa.

2.2.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

Histórico

As máquinas de prototipagem rápida que utilizam a tecnologia FDM têm pouco mais de uma década de existência. O marco inicial foi em 1988 quando Scott Crump concluiu o desenvolvimento de um sistema de prototipagem que gerava modelos tridimensionais através de um processo de extrusão. Em 1992 a primeira

patente FDM foi emitida nos Estados Unidos e nesse mesmo ano a empresa Stratasys iniciou a comercialização de seu primeiro produto denominado de *3D MODELER* (Stratasys, 2002). No ano seguinte foi lançada a máquina FDM 1500 conjuntamente com o *software* de CAM *Quickslice*. Em 1994, a construção de protótipos em ABS foi disponibilizada com o lançamento da máquina FDM 1600 e ainda foram desenvolvidos o cabeçote para extrusão de dois materiais diferentes (material de construção e material de suporte) e a estratégia para a construção dos suportes. Em 1995 a Stratasys incorporou uma tecnologia de prototipagem rápida desenvolvida pela IBM. Kruth *et al.* (1998) destacam que a impressora 3D Genisys, que utilizava o poliéster como material construtivo, foi desenvolvida utilizando essa tecnologia. Seguindo as características da FDM 1600 surgiram ainda os modelos FDM 1650, FDM 2000 e FDM 8000 até que em 1999 foi lançada a Máquina FDM 3000 com o sistema de suportes *WaterWorks*. Com esse sistema foi possível melhorar o processo de remoção dos suportes da peça que passou a ser através da imersão do protótipo numa solução aquosa. O suporte é dissolvido nessa solução permitindo a obtenção de peças de maior complexidade e com melhor acabamento superficial.

Em julho de 2000, foi lançada a máquina Prodigy, de pequenas dimensões (864 x 686 x 1041mm) para a fabricação de protótipos em ABS. Em novembro de 2000, foi lançada a FDM Maxum, máquina mais rápida de sua linha, com uma velocidade de construção 50 por cento maior que os outros sistemas precedentes. Isso foi possível com a utilização de um sistema denominado MagnaDrive, que permite movimentação do cabeçote extrusor por atuação magnética sob um fino colchão de ar (Kruth *et al.*, 1998). O sistema permite movimentos mais suaves e precisos melhorando a precisão e o acabamento das peças prototipadas. A FDM Maxum também utiliza o sistema *WaterWorks* e permite a construção de peças com maiores dimensões (600 x 500 x 600mm). Ainda no ano 2000, o programa *Quickslice* foi substituído por outro denominado *Insight*, visando uma adequação aos melhoramentos das novas máquinas.

Em 2001 foi colocada no mercado a máquina FDM Titan com a capacidade de produzir protótipos em policarbonato, polifenilsulfona ou ABS (Stratasys, 2002). Em 2002 foi lançada a máquina Dimension, utilizando o ABS como material construtivo e incorporando o sistema de remoção de suportes através de imersão em solução de água.

Finalmente, em 2003 foi lançada a máquina FDM Vantage, que reproduz o mesmo padrão de desempenho da Titan e pode fabricar protótipos em ABS e policarbonato. Nesse mesmo ano a Stratasys passou a distribuir nos Estados Unidos a máquina Eden333, que utiliza a tecnologia *Polyjet* permitindo a fabricação de peças a partir da polimerização de um monômero acrílico sensível aos raios ultravioletas (UV).

A Stratasys Inc. está posicionada hoje como a segunda maior fabricante mundial de sistemas de prototipagem rápida e tem sido a que mais instala esses sistemas nos últimos anos. Segundo Wohlers (2004), a empresa é responsável por 37% de todos os sistemas de prototipagem rápida instalados no mundo.

No caso do Brasil, foi feito um levantamento pelo CIMJECT/UFSC em agosto de 2004, onde foi constatado que, das 45 máquinas de prototipagem rápida instaladas, 19 foram fabricadas pela Stratasys, sendo 8 utilizadas em instituições de ensino e pesquisa e as demais instaladas em empresas. A Tabela 3 apresenta a distribuição dessas máquinas por estado.

Tabela 3 – Distribuição das máquinas Stratasys no Brasil.

Estado	Quantidade	Modelo
São Paulo	2	FDM8000
	2	FDM2000
	1	FDM3000
	1	Prodigy
	1	Genisys Xs
	1	Prodigy Plus
	1	Dimension
Rio Grande do Sul	2	FDM1650
	2	FDM3000
Santa Catarina	1	Dimension
Paraná	1	FDM2000
Rio de Janeiro	1	FDM1650
Distrito Federal	1	FDM3000
Bahia	1	FDM3000
Amazonas	1	FDM8000
TOTAL	19	

Características do processo

A fase de conversão do arquivo que contém o modelo tridimensional feito em um sistema de CAD para o arquivo que será lido pela máquina é bastante semelhante aos demais processos de prototipagem rápida. O arquivo CAD é inicialmente convertido para um formato denominado de STL (*Stereolithography file*), sendo que no momento da conversão é possível atribuir valores em parâmetros para permitir uma melhor representação do objeto. O arquivo STL representa, de forma aproximada, o sólido através de uma malha triangular. Ele mapeia o modelo sólido por meio das coordenadas das faces triangulares de suas superfícies e de seus vetores normais. Quanto maior for o refinamento da malha mais preciso será o protótipo e maior será o arquivo STL. O arquivo, depois de lido por um software de CAM específico (*Insight*, no caso de algumas máquinas FDM), será fatiado em camadas numa determinada espessura. Em seguida será feita a geração das trajetórias que o cabeçote extrusor percorrerá para o preenchimento de cada uma das camadas. O arquivo resultante é gravado no formato SML (*Stratasys Modeling Language*) para depois ser transmitido para a máquina que construirá o protótipo (Figura 4).

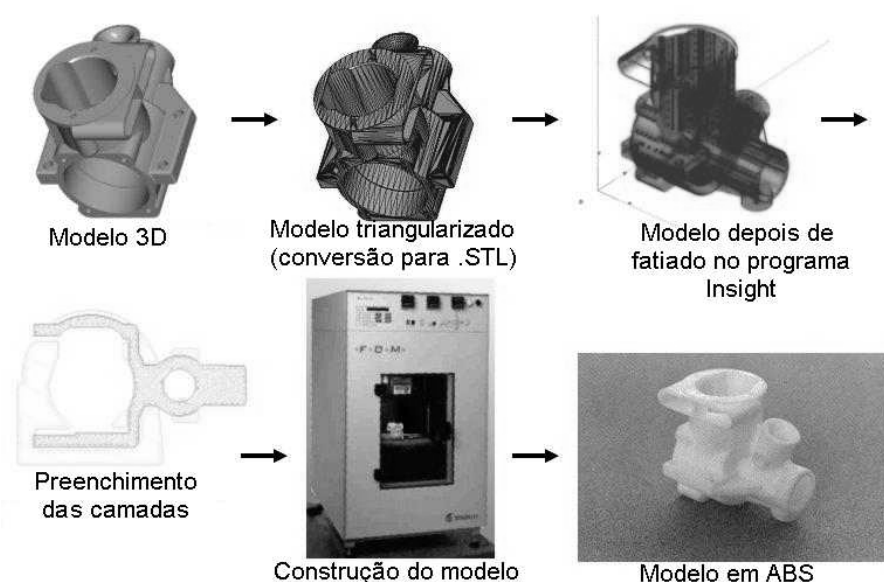


Figura 4 – Etapas do Processo FDM.

O processo FDM de prototipagem rápida utiliza um sistema de construção que combina a ação de uma plataforma que se desloca na direção z (vertical) com o movimento de um cabeçote extrusor nas direções x e y (plano horizontal). Para permitir o uso de dois materiais esse cabeçote possui dois bicos extrusores, um utilizado para depositar o material de construção do protótipo e o outro para o material do suporte (Figura 5).

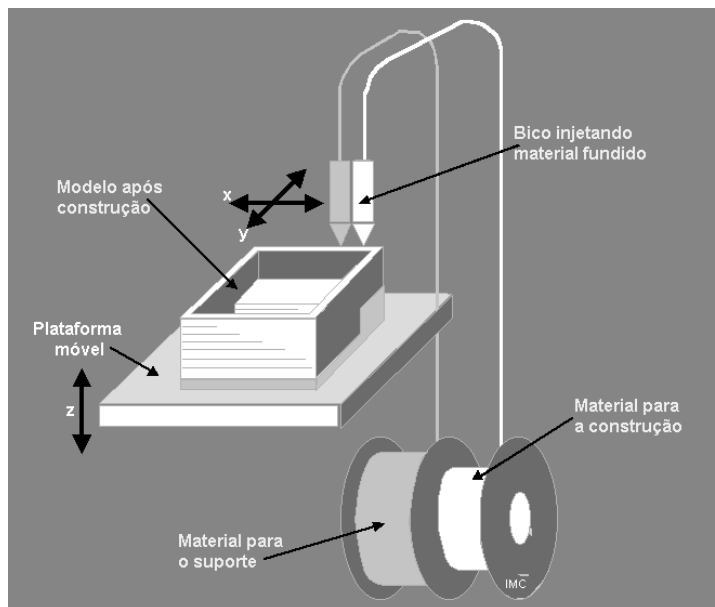


Figura 5 – Esquema simplificado do processo FDM.

O cabeçote extrusor traça os perímetros da seção transversal e os preenche construindo assim cada camada até que o protótipo seja finalizado. Como a deposição é feita camada por camada, é necessária a utilização de suportes para viabilizar a construção com geometrias suspensas. Os suportes são depois removidos manualmente ou quimicamente (sistema *WaterWorks*). A remoção manual pode danificar o protótipo se o responsável pelo trabalho não conhecer sua geometria ou se não tiver habilidade no manuseio das ferramentas.

Como citado anteriormente, o sistema *WaterWorks* é um método de remoção de suportes onde o protótipo é imerso em uma solução aquosa e após um período de tempo os suportes se desprendem do protótipo evitando os danos causados pela remoção manual e permitindo a obtenção de geometrias mais complexas com bom acabamento.

A maioria das máquinas FDM utiliza materiais na forma de filamento de seção circular que são fornecidos em bobinas (Stratasys, 2004). O filamento é inserido no cabeçote extrusor com o auxílio de rolos tracionadores (Figura 6) e é aquecido por meio de resistências elétricas até a temperatura adequada para que saia de forma homogênea pelo bico extrusor. O fluxo do material é controlado por bombas volumétricas de precisão (Kruth, 1991).

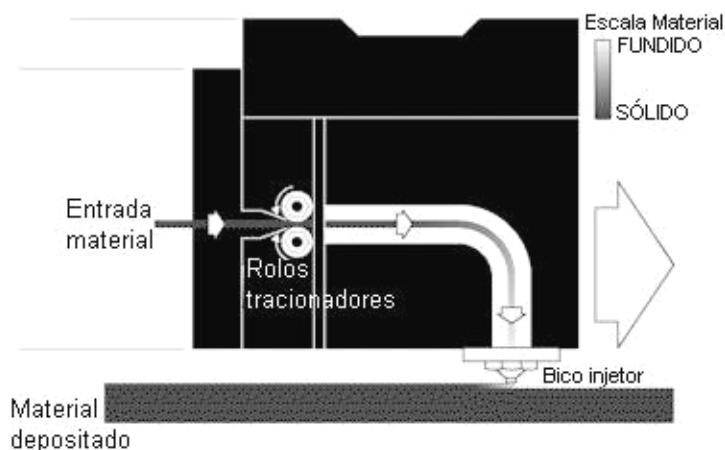


Figura 6 – Entrada do material no cabeçote extrusor com o auxílio dos rolos tracionadores (Ahn *et al.*, 2002).

Os bicos extrusores possuem furos calibrados e são fornecidos com diâmetros de 0,254mm, 0,305mm e 0,406mm, especificados como T10, T12 e T16 respectivamente. Os bicos são rosqueados no cabeçote extrusor e após cada troca é necessário fazer a sua calibração antes de iniciar a construção de um novo protótipo.

A calibração é realizada com a construção de um pequeno modelo padrão (*calibration box*) que permite a verificação do posicionamento das coordenadas x e y através de inspeção visual com o auxílio de uma lupa. Se o material de suporte for depositado no centro da geometria do modelo padrão (Figura 7) a calibração estará correta. Os ajustes necessários são realizados através de um programa computacional e envolvem um processo de tentativa e erro até que seja atingida a configuração desejada. Esse procedimento permite também o controle da espessura da camada pela retirada e medição da última camada depositada.

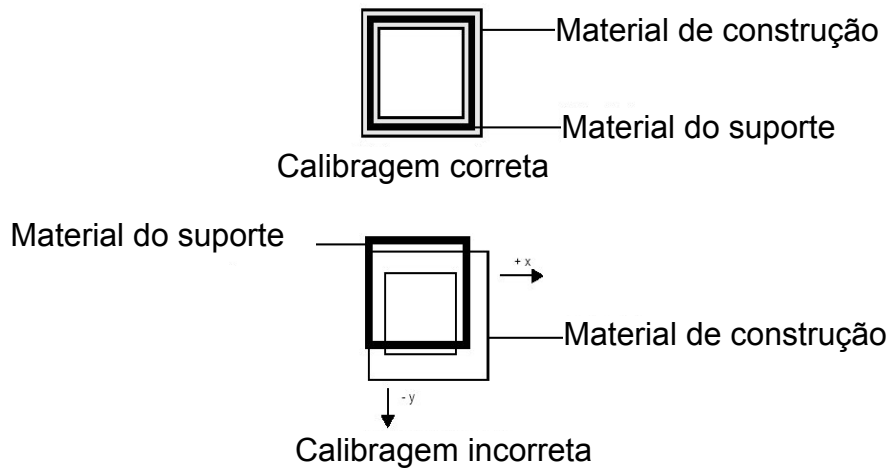


Figura 7 – Calibragem da máquina FDM (Stratasys, 2001).

A plataforma móvel utiliza um bloco plano descartável, feito em espuma rígida (poliuretano expandido), como fundação. A espuma permite uma boa aderência quando a primeira camada é depositada garantindo que o modelo não se mova durante o restante da construção. Após seu término o modelo é retirado da plataforma com o auxílio de uma lâmina que normalmente deixa essa região inutilizável para a construção de novas peças.

As peças são construídas em uma cabine com temperatura controlada que varia em função do diâmetro do bico e do material que está sendo extrudado. Para o caso do ABS P-400 utilizando o bico T12 (0,305mm) é recomendado manter o interior da cabine a 70°C.

Defeitos em peças fabricadas pelo processo FDM

As peças fabricadas pelo processo FDM de prototipagem rápida possuem diversos defeitos causados pela forma construtiva utilizada por essa tecnologia. O conhecimento prévio dos possíveis defeitos é importante para que medidas preventivas sejam tomadas com o objetivo de minimizar os seus efeitos. A seguir são descritos os seguintes defeitos em peças geradas pelo processo FDM: Defeito nas superfícies devido ao efeito escada, defeito devido a triangularização das superfícies, irregularidades nas superfícies inferiores e superiores, deposição residual de material, vazios dentro dos contornos, espaçamentos entre filetes diferentes dos especificados e costura nas paredes.

- ***Defeito nas superfícies devido ao efeito escada***

Este defeito, que é comum a todos os protótipos confeccionados camada por camada, tem o inconveniente de produzir, em superfícies curvas ou inclinadas, pequenos degraus, conforme mostra a Figura 8. Kattethota & Henderson (1998) afirmam que este defeito pode ser minimizado ao se escolher corretamente o sentido de construção. Quando possível, é recomendado que as superfícies curvas e inclinadas sejam dispostas de forma a evitar o aparecimento desses degraus. A Figura 9 ilustra duas disposições possíveis, sendo que a opção (a) é a mais favorável por não causar o aparecimento do efeito escada. A escolha da disposição do protótipo deve considerar também a sua resistência mecânica, pois, muitas vezes, a que propicia a melhor qualidade superficial é a que torna o protótipo menos resistente mecanicamente. Isso evidencia a necessidade de conhecer antecipadamente as solicitações mecânicas a que este protótipo estará sujeito, antes de seu posicionamento baseado apenas na obtenção de uma boa qualidade superficial.

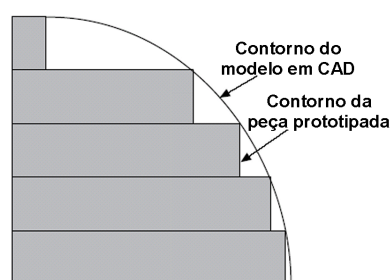


Figura 8 – Efeito escada numa superfície curva (Hope *et al.*, 1997).



Figura 9 – Exemplos de disposições de uma peça na plataforma.

Muitas vezes a geometria do protótipo não possui uma disposição que evite o aparecimento do efeito escada. Dessa forma, Vasudevarao *et al.* (2000) verificaram que, como a espessura da camada é quem determina a altura dos degraus, o seu controle é outro fator que influencia a qualidade superficial das peças prototipadas. Quanto menor for a espessura de cada camada melhor será a qualidade das superfícies curvas e inclinadas, como a disposta no exemplo da Figura 9 (opção b), no entanto o tempo de fabricação e conseqüente custo do protótipo são onerados. Uma alternativa para melhorar a qualidade das superfícies afetadas pelo efeito escada é a inclusão de uma etapa de acabamento superficial. O lixamento melhora a qualidade das superfícies, mas pode comprometer dimensionalmente as peças prototipadas.

- ***Defeitos devido a triangularização das superfícies***

Esses erros ocorrem devido a aproximação que acontece na conversão do modelo do formato padrão de um sistema CAD 3D para o formato STL que triangulariza as superfícies da peça. Assim as superfícies curvas são transformadas em uma malha de elementos triangulares. A utilização de parâmetros que permitam aumentar o número de triângulos é recomendada para minimizar esse defeito.

- ***Irregularidades nas superfícies inferiores e superiores***

Se a peça for construída sem o uso de camadas de apoio sobre a plataforma (base), elas apresentarão marcas superficiais provenientes do contato com a plataforma de espuma. Pode ocorrer também que, uma má escolha dos parâmetros das camadas de apoio, produza uma superfície irregular que será reproduzida na base da peça. Já as superfícies superiores apresentarão rugosidade devido a forma arredondada dos filetes extrudados.

- ***Deposição residual de material***

Ocorre quando uma pressão residual faz com que o fluxo de material não cesse quando o movimento do cabeçote extrusor parar. O material excedente gera imperfeições na construção da camada.

- **Vazios dentro dos contornos**

Como as peças são construídas por camadas pela extrusão do contorno seguido do preenchimento do seu interior (varredura), é possível que o bico não avance o suficiente sobre a linha do contorno antes de mudar de direção, gerando regiões com vazios (Figura 10). Para corrigir essas falhas pode-se aumentar a velocidade de extrusão ou utilizar parâmetros que forcem uma ligeira sobreposição entre contorno e varredura (*raster*), conforme ilustrado na Figura 11 (Rutgers, 2003).

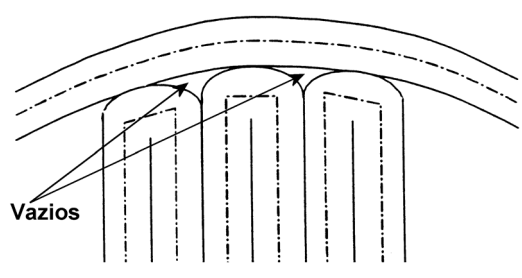


Figura 10 – Vazios no interior da peça.

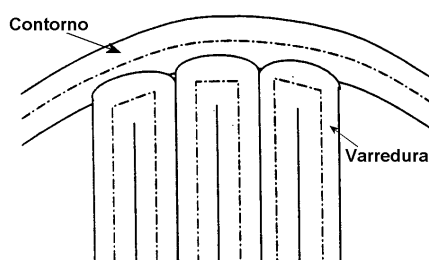


Figura 11 – Sobreposição entre varredura (*raster*) e contorno.

Quando se escolhe um espaçamento inadequado entre os filetes é possível o aparecimento de vazios no núcleo da peça (Figura 12). Durante o processo da simulação do preenchimento das camadas, realizado através de um programa computacional, é importante que seja verificada a necessidade de criar grupos especiais para regiões da peça com uma geometria que facilite o aparecimento desses vazios. Esses grupos recebem parâmetros construtivos diferentes do restante da peça de modo a evitar o aparecimento dos vazios. Uma outra solução é alterar o valor global do espaçamento.

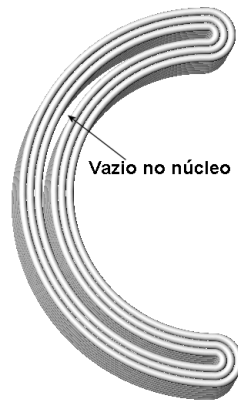


Figura 12 – Vazio no núcleo da peça devido ao mal dimensionamento do espaçamento.

- ***Espaçamentos entre filetes diferentes dos especificados***

Dependendo da viscosidade do material do filamento o espaçamento entre os filetes pode ser maior ou menor que o desejado. O material pode escoar em excesso invalidando o parâmetro especificado. Pode acontecer também, devido a tensão superficial do filamento, que duas trilhas adjacentes se atraiam e se fixem juntas, fazendo com que uma terceira fileira apareça mais distante. Para corrigir esse efeito deve-se ajustar o espaçamento para um valor que minimize esse efeito.

- ***Costura nas paredes***

O início da deposição quando feito sempre a partir do mesmo lugar pode gerar um efeito indesejável nas paredes da peça, semelhante a uma costura vertical. Para minimizar esse efeito, pode-se utilizar alguns parâmetros construtivos que reposicionem ou distribuam a costura em posições mais adequadas.

Parâmetros de construção

Além da determinação da melhor disposição para a construção de uma ou mais peças é importante que sejam conhecidos os inúmeros parâmetros de construção disponíveis para que seja possível produzir protótipos otimizados com as características desejadas. Os principais parâmetros utilizados pelo programa computacional denominado *Insight*, que serve atualmente de interface para a maioria das máquinas de prototipagem rápida com tecnologia FDM, estão listados no Anexo 1, onde ao lado da denominação original em inglês está colocada entre

parênteses uma sugestão para denominação em português. Os parâmetros de construção estão divididos em quatro grupos:

- **Parâmetros na fase de fatiamento:** Após a definição da disposição mais adequada para o modelo que será prototipado, o usuário deve estabelecer os valores dos parâmetros que permitiram ao programa computacional realizar o fatiamento do modelo.
- **Parâmetros para a construção dos suportes:** Esses parâmetros permitem definir os valores para as variáveis que controlam a construção de suportes para aquelas geometrias que possuam partes suspensas, cavidades ou paredes com grande inclinação. Além disso, é prevista para todas as peças, a colocação de uma base sobre a qual ela será construída (Figura 13).

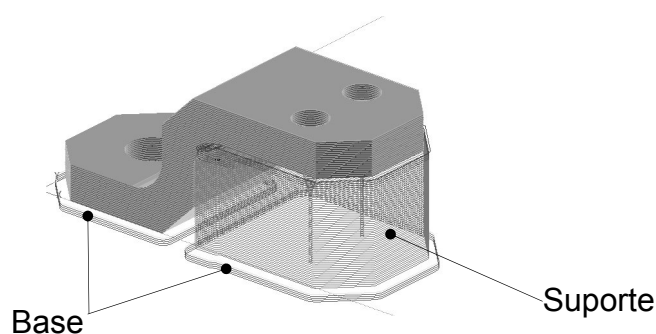


Figura 13 – Exemplo de base e suporte em uma peça prototipada.

- **Parâmetros da fase de preenchimento:** Parâmetros que permitem alterar as diversas formas de preenchimento da peça a ser fabricada. Os valores pré-definidos de cada parâmetro são dependentes do tipo de bico selecionado.
- **Parâmetros utilizados na criação de grupos de preenchimento:** Quando se definem os parâmetros de preenchimento pode-se criar um ou mais grupos especiais com parâmetros diferentes daqueles escolhidos para a toda a peça. Os grupos podem ser aplicados em camadas específicas e até em curvas fechadas específicas de uma certa camada. Com grupos especiais pode-se refinar o preenchimento em partes específicas da peça, como detalhes pequenos, ou então agilizar o trabalho da máquina em peças maiores.

Materiais utilizados

Além do ABS (P400) as máquinas fabricadas pela Stratasys Inc. possuem modelos que fabricam protótipos a partir de cápsulas (waffers) de poliéster (P1500) e filamentos de cera (ICW06), poliamida (P301), elastômero (E20), policarbonato e polifenilsulfona. É possível também a construção de peças utilizando um ABS esterilizável (Metilmetacrilato ABS – P500) para atender a área médica. A Tabela 4 relaciona esses materiais com as máquinas de prototipagem que os utilizam (Stratasys, 2002 e Stratasys, 2004).

Tabela 4 – Relação dos materiais utilizados pelas máquinas da Stratasys.

Material	Máquinas de prototipagem
ABS P400	FDM2000, FDM3000, FDM8000, Prodigy Plus, Quantum, Maxum, Titan, Dimension
ABSi P500	FDM2000, FDM3000, FDM8000, Quantum, Maxum
Cera ICW06	FDM2000, FDM3000
Elastômero E20	
Poliéster P1500	Genisys, Genisys Xs
Policarbonato	Dimension, Titan
Polifenilsulfona	Titan

2.3 Ferramental Rápido

2.3.1 Definição e classificação

O crescente número de técnicas de ferramental rápido (RT) disponíveis resultou em muitos trabalhos que têm sugerido formas de classificá-las, tais como, ferramental rápido direto e indireto (Geiger & Özel, 2001), direto e de transferência (King & Tansey, 2002), ferramentas moles, de transição e duras (Karapatis *et al.*, 1998) e ferramentas de RP e ferramentas de produção (Rosochowski & Matuszak, 2000). A definição desses grupos não é bastante clara e permite sobreposições entre seus domínios (Rosochowski & Matuszak, 2000). Usualmente é associada a critérios que levam em conta itens como o número de etapas para a obtenção do molde, o material, o número de peças obtido ou o sistema de prototipagem utilizado. Este trabalho adotará a primeira forma de classificação, ou seja, considerará que as técnicas de RT são divididas em diretas e indiretas.

A técnica denominada de ferramental rápido indireto (*indirect rapid tooling*) requer um modelo mestre, feito em uma máquina de RP, para a fabricação do ferramental. São necessários passos intermediários para a obtenção do molde e a qualidade da peça obtida por essa técnica está diretamente relacionada com a qualidade do protótipo (Sabino Netto, 2003).

Existe uma diversidade bastante grande de técnicas de ferramental rápido indireto e isso se deve ao rápido desenvolvimento e difusão dos diversos sistemas de prototipagem rápida e às necessidades de gerar moldes para fabricar diferentes quantidades de peças em diferentes materiais. Entre as técnicas disponíveis pode-se destacar: moldes de silicone, moldes de epóxi, moldes por deposição metálica, moldes por microfusão (*quickcast*) e *3D keltool* (Gomide, 2000).

O ferramental rápido direto (*direct rapid tooling*) é um processo baseado na obtenção do ferramental diretamente do arquivo de CAD com o menor número possível de operações, garantindo condições de produção em termos de durabilidade, precisão e qualidade da superfície (Karapatis *et al.*, 1998).

Alguns dos processos diretos de ferramental rápido são: fabricação direta de insertos de resina através da estereolitografia, insertos obtidos por sinterização de pó através de laser, fabricação de moldes de cerâmica para microfusão e fabricação de moldes de metal.

Como o presente trabalho utilizou os fundamentos da fabricação direta em insertos de resina por estereolitografia, essa técnica será descrita a seguir. Informações detalhadas das demais técnicas de ferramental rápido direto e indireto podem ser encontradas nos trabalhos de Radstok (1999), Rosochowski & Matuszak (2000), Gomide (2000) e Wohlers (2002).

2.3.2 Ferramental rápido direto por estereolitografia

Esta técnica de fabricação de insertos foi originalmente denominada de *Direct ACES Injection Molding* (*ACES: Accurate Clear Epoxy Solid*) ou simplesmente, *Direct AIM*. A origem da terminologia veio do fato da técnica utilizar na confecção dos insertos, o estilo de construção ACES (3D Systems, 1997). Entre os estilos de construção disponíveis na época em que o processo foi desenvolvido, o ACES era o que produzia protótipos com alto grau de polimerização, baixo desvio dimensional e com boas propriedades mecânicas e térmicas, necessárias aos insertos usados em

moldagem por injeção (Gomide, 2000). Atualmente esse estilo de construção foi substituído por outros de melhor desempenho que são utilizados em função das características do material e do equipamento (3D Systems, 2000).

A fabricação direta de insertos através da estereolitografia é recomendável para pequenos lotes de peças, para os casos onde o material do protótipo tenha que ser o mesmo do produto injetado (Gomide, 2000) e para situações onde o alto custo do ferramental convencional não possa ser justificado.

O processo de fabricação dos insertos se inicia com a sua concepção, que pode ser maciça ou na forma de casca, em um sistema CAD-3D, posteriormente é feita a conversão do arquivo para o formato STL, definição dos parâmetros construtivos e construção do inserto. Na fase de pós-processamento é realizada a retirada dos suportes, limpeza, pós-cura e acabamento do inserto. No caso do inserto maciço o próximo passo consiste na sua montagem no porta-moldes. Para a concepção em casca é necessário que a parte posterior do inserto seja preenchida (Figura 14b) com um material que possibilite a rigidez estrutural necessária para suportar os carregamentos durante a moldagem por injeção. A condutividade térmica do material de preenchimento é uma propriedade importante a ser considerada. Como a resina epóxi possui baixa condutividade térmica (0,2 W/m.K), espera-se que o material de preenchimento tenha propriedades que permitam melhorar a dissipação de calor das paredes do inserto, visto que as temperaturas durante a moldagem podem degradar a resina e diminuir a sua vida útil. A dificuldade consiste em otimizar a espessura da casca do inserto para que ela não sirva de isolante entre o material de preenchimento e o meio externo e ao mesmo tempo tenha uma suficiente resistência estrutural.

Para auxiliar a troca de calor pode-se utilizar tubos de cobre para circulação de água na parte posterior dos insertos (Figura 14a). Os tubos devem ser colocados antes do preenchimento e o porta-moldes deve possuir aberturas para permitir a sua montagem.

A literatura apresenta divergências sobre a eficiência da refrigeração de moldes poliméricos utilizando-se circulação de água. Dickens (1999) sugere que a refrigeração do inserto seja feita externamente por jatos de ar comprimido, já que a determinadas espessuras a refrigeração por condução é muito pequena. Geiger & Özel (2001) recomendam a utilização de tubos de cobre em insertos construídos em casca por estereolitografia e preenchidos com ligas metálicas de baixo ponto de

fusão. Esses autores recomendam que os tubos de refrigeração sejam dispostos de forma a acompanhar a geometria da cavidade na parte posterior do inserto e sugere um ganho de três a quatro vezes no ciclo de injeção.



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – Fases do processo DIRECT-AIM: (a) Insertos com os tubos de cobre; (b) Preenchimento dos insertos; (c) Inserto preenchido³.

A refrigeração pode também ser realizada utilizando-se a técnica denominada Canais de Refrigeração Incorporados que permite o posicionamento dos canais nas regiões mais quentes da cavidade. O projetista deve otimizar a geometria de forma a encontrar a menor espessura possível de parede com uma suficiente resistência mecânica da superfície do inserto. Esse processo depende da resina utilizada, pois suas propriedades não devem ser suscetíveis à umidade. Lafratta (2004) sugeriu um melhoramento da técnica dos Canais de Refrigeração Incorporados com a utilização da água temporariamente confinada dentro dos canais de refrigeração como

³ Extraída de <http://www.vistatek.com/directaim.html>. Acesso em 14/02/2003.

elemento estrutural. O uso de válvulas permite confinar a água durante a fase de preenchimento e recalque e liberá-la para circulação na fase de resfriamento. A presença de ar na água foi apontada como fator limitante para sua utilização como elemento estrutural.

Ahrens *et al.* (2001) apresentam uma alternativa para melhorar o processo de extração de calor do inserto com a inserção de pequenas aletas metálicas na superfície do inserto. Esse processo, que faz uso de tubos de cobre com circulação de água para auxiliar na refrigeração, tem o inconveniente de produzir marcas superficiais decorrentes do resfriamento diferenciado nas superfícies das peças moldadas.

Os materiais comumente utilizados para o preenchimento dos insertos são: ligas de baixo ponto de fusão, resinas a base de epóxi com carga de pó de alumínio e resinas a base de poliéster. A cura das resinas utilizadas para o preenchimento é exotérmica e pode causar o empenamento dos insertos se o seu preenchimento não for realizado em etapas. Após o preenchimento (Figura 14c), os insertos ainda passam por um processo de usinagem para garantir o paralelismo entre a face do inserto e a parte posterior. A seguir os insertos podem ser ajustados em um porta-moldes para posterior montagem na injetora.

A técnica de ferramental rápido para moldagem por injeção utilizando moldes construídos pelo processo de estereolitografia tem sido difundida através de diversos trabalhos. Entre eles Saurkar *et al.* (1999) recomendam que o polímero seja injetado nos moldes de SL com a menor pressão de injeção possível, suficiente para preencher as cavidades e sugere ainda o uso de um pequeno valor para o colchão (*cushion*). O autor acrescenta que em seus experimentos foi necessário um tempo de espera entre cada peça injetada de 250s e que nesse período resfriou a superfície do molde com jatos de ar comprimido.

Li *et al.* (2000) afirmaram que a resposta térmica dos moldes em estereolitografia resultou em tempos de ciclo muito altos e em peças com empenamentos e distorções. Em outro trabalho, Geiger & Özel (2001) descreveram que o uso de moldes construídos na forma de casca permitiu reduzir o tempo de fabricação do molde. Possibilitou também que, com o preenchimento da parte posterior do molde com um material de maior condutividade térmica, os tempos do ciclo de injeção fossem reduzidos.

Harris *et al.* (2003) comentaram que o processo está restrito a confecção de peças em resinas acrílicas ou epóxi. Os mesmos autores afirmam que a grande vantagem do uso de moldes feitos por estereolitografia é a rápida obtenção de pequenos lotes de peças injetadas a um baixo custo e que as mesmas são idênticas às fabricadas em moldes convencionais.

De forma geral, os trabalhos procuraram aperfeiçoar o processo de ferramental rápido com soluções que melhorassem a troca térmica entre molde e moldado, produzissem peças com qualidade e propriedades mecânicas e químicas semelhantes às injetadas em moldes convencionais. Hopkinson & Tromans (2003) comentaram que, durante os anos 90, o processo de ferramental rápido teve um considerável desenvolvimento, principalmente devido ao uso de canais incorporados, moldagem de geometrias complexas e a aplicação de materiais funcionais. Afirmaram também que as técnicas de construção por camadas podem ainda ser melhoradas em termos de precisão dimensional e acabamento superficial.

A análise dos trabalhos sobre ferramental rápido permite concluir que, por ser uma técnica recente, ainda possui um potencial para ser desenvolvido no sentido de se aproximar dos requisitos de qualidade obtidos nos moldes metálicos.

2.3.3 Ferramental rápido direto por FDM

Conforme foi mencionado no início do capítulo, a literatura apresenta poucos trabalhos sobre o emprego de ferramental rápido direto por FDM na moldagem por injeção. Como esse é o escopo desse trabalho, a seguir será feito um breve relato sobre as particularidades, resultados e conclusões dos experimentos realizados por Masood *et al.* (1999), Masood & Song (2004) e Hopkinson (2001).

Os trabalhos desenvolvidos por Masood *et al.* (1999) e Masood & Song (2004) apresentam o desenvolvimento de um compósito de poliamida P301 (Stratasys Inc.), pó metálico (Sigma-Aldrich) e aditivos (sulfactantes e plastificantes) para serem usados, na forma de filamento, nas máquinas de tecnologia FDM. Foram elaborados três tipos de filamentos diferentes utilizando combinações entre as proporções de poliamida (PA) e o pó metálico e variando o tamanho das partículas metálicas, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Componentes dos filamentos de compósito.

Nº Filamento	Tamanho da partícula metálica (μm)	Por volume (%)		Por peso (%)		
		PA	Pó metálico	PA	Pó metálico	Aditivos
1	50 – 80	70	30	23,10	70,91	5,99
2	50 – 80	60	40	15,95	76,15	7,90
3	< 30	60	40	15,95	76,15	7,90

Para determinação das propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de tração em quatro amostras de cada tipo de filamento. Foi determinado que o filamento número 1 apresentou maiores valores para o módulo de elasticidade longitudinal e tensão máxima a tração, enquanto o filamento 3 apresentou maior valor percentual para a deformação. Os valores encontrados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos filamentos de compósito.

Nº Filamento	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão máxima a tração (MPa)	Deformação máxima (%)
1	54,52	3,87	16,82
2	42,23	2,76	12,94
3	37,18	2,44	74,61

Os resultados mostraram que o módulo de elasticidade e a tensão máxima a tração do compósito são fortemente dependentes da granulometria das partículas metálicas. Para testar o filamento na moldagem por injeção, foram fabricados insertos de geometria simples (cavidade cilíndrica com diâmetro=23mm) com os seguintes parâmetros construtivos: espessura da camada=0,3mm, espessura do contorno e varredura (*raster*)=0,76mm e bico extrusor com diâmetro=1,2mm. Os termoplásticos utilizados para a injeção das peças foram o PEBD e o ABS.

Foram injetadas 70 peças em PEBD com os seguintes parâmetros de injeção: pressão de injeção=0,69MPa, temperatura de injeção=170°C e ciclo de injeção=26s. Foi relatado que a partir da 50ª peça o inserto começou a delaminar levemente nas bordas prejudicando a qualidade das peças. Esse defeito foi se intensificando com a injeção das demais peças.

No caso do ABS, foram injetadas 40 peças com os seguintes parâmetros de injeção: pressão de injeção=2,62MPa, temperatura de injeção=240°C e ciclo de injeção=35s. A partir da 25ª peça também se iniciou um processo de delaminação nas bordas da cavidade. A Figura 15 ilustra duas peças injetadas em ABS e duas injetadas em PEBD nos insertos de compósito.

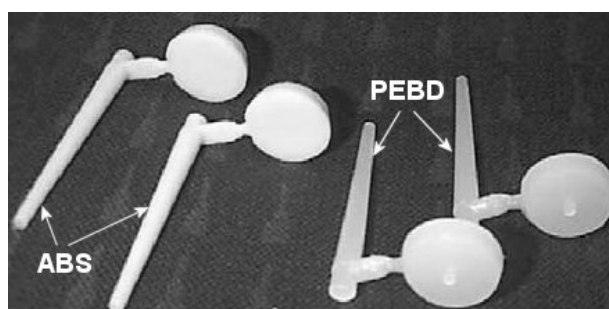


Figura 15 – Peças em ABS e PEBD injetadas nos insertos de compósito (Masood & Song, 2004).

Ao comparar com os resultados apresentados por Jacobs (1997) que utilizou insertos feitos em estereolitografia os autores registraram, para o caso do ABS, uma grande redução no ciclo de injeção (de 300s para 35s) e na pressão de injeção (de 22 Mpa para 2,62 MPa). A estabilidade dimensional também foi avaliada e considerada dentro das faixas aceitáveis para a produção de peças injetadas ($\pm 0,05\text{mm}$).

Os autores concluem o trabalho afirmando que o material desenvolvido é especialmente adequado para o uso em ferramental rápido e que os experimentos demonstraram que a injeção de peças nesses insertos produziu peças com qualidade aceitável. Adicionalmente, complementam que em trabalhos futuros serão feitos refinamentos no processo para aumentar a qualidade, a precisão e a vida dos insertos.

O trabalho de Hopkinson (2001) procurou aplicar o ABS na construção de insertos construídos por FDM para a injeção de peças em polipropileno e ABS. Na justificativa o autor considera que, embora pareça impraticável o uso de insertos de ABS para a injeção de termoplásticos, os estudos recentes feitos com insertos em estereolitografia mostraram que é possível a obtenção de peças injetadas em moldes poliméricos, desde que alguns cuidados sejam tomados.

Para permitir a comparação com experimentos anteriores em insertos de estereolitografia foi escolhida uma geometria já existente. Foram construídas 4 cavidades (parte fêmea) e 8 núcleos (parte macho) separados em 2 conjuntos, sendo que o primeiro foi construído com o bico T12 (diâmetro interno= 0,305mm) e o segundo com o bico T10 (diâmetro interno=0,254mm). Todos os insertos foram construídos na forma maciça. A Figura 16 ilustra a disposição de um dos conjuntos na plataforma da máquina.

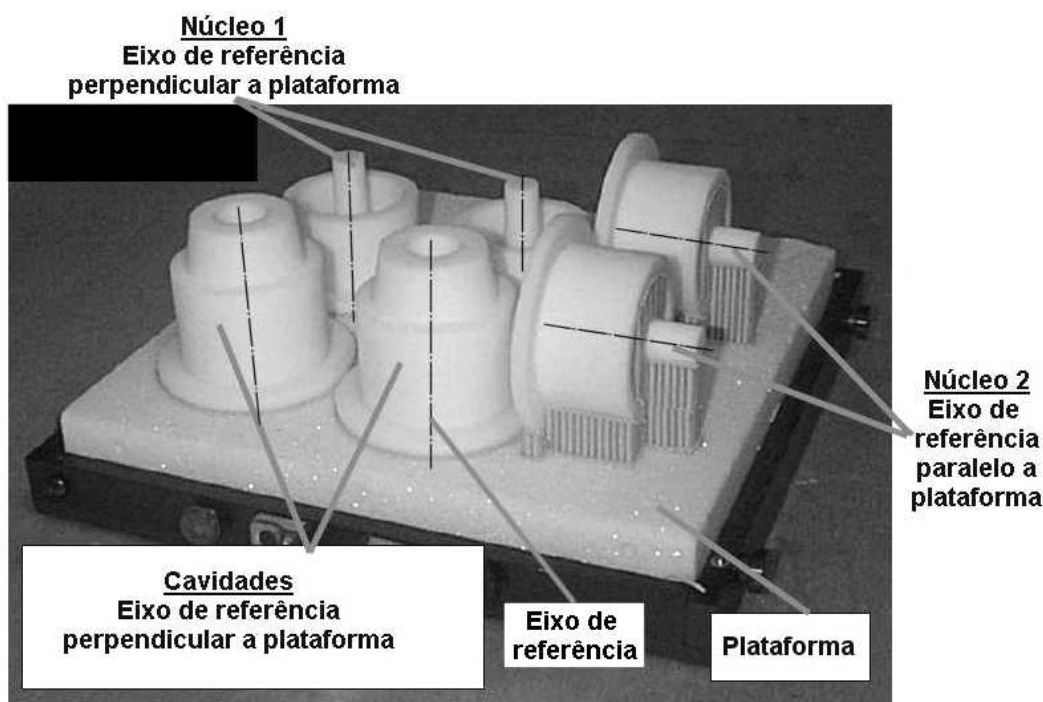


Figura 16 – Orientação dos insertos em ABS na plataforma (Hopkinson, 2001).

Os núcleos foram dispostos em duas disposições diferentes, sendo que uma (núcleo 1) utiliza menos suportes que a outra (núcleo 2). O núcleo 1 apresenta uma região central cilíndrica com menor resistência mecânica do que a mesma região no núcleo 2 devido a direção de empilhamento das camadas. Essa característica anisotrópica deve ser considerada no momento de escolher a orientação do modelo na plataforma. As experiências anteriores mostraram que os núcleos eram mais sujeitos a falhas do que as cavidades e assim esses foram construídos em maior número. Os parâmetros construtivos e os tempos para a fabricação de cada conjunto de insertos são mostrados na Tabela 7.

O experimento foi dividido em três etapas. As duas primeiras para a injeção de PP nos insertos construídos com os bicos T12 e T10 e a última para a injeção de

ABS no inserto construído com o bico T12. O experimento foi planejado para limitar em 10 peças o número máximo de injeções e em seguida analisar o estado do inserto.

Tabela 7 – Dados sobre a fabricação dos insertos.

Bico	Tempo de fabricação (h)	Tempo para acabamento (min)	Espessura da camada (mm)	Largura da varredura (<i>raster</i>) (mm)
T12	78,0	20	0,254	0,508
T10	159,5	20	0,178	0,508

Na primeira etapa foram utilizados dois moldes construídos em disposições diferentes (utilizando os núcleos 1 e 2) e em ambos foram injetadas 10 peças em PP. No molde com o núcleo 1 foram observados defeitos na superfície de topo do núcleo e pequenas ondulações na cavidade. No outro molde foi constatado o arredondamento da borda superior do núcleo.

Na segunda etapa foram realizadas quatro injeções, duas para cada tipo de núcleo. Foram injetadas 5 e 4 peças nos moldes com o núcleo 1, sendo que houve o colapso total na base da região central do núcleo (Figura 17) nas duas situações. No caso dos moldes com o núcleo 2 foram injetadas 10 peças em cada um, sendo que não houve o colapso e foram detectados defeitos na superfície do topo do núcleo e ondulações na superfície da cavidade. Os insertos feitos com o bico T12 mostraram melhor desempenho que os fabricados com bico T10. Esse resultado não era esperado já que os parâmetros construtivos associados ao bico T10 são mais refinados e produzem peças de maior densidade.

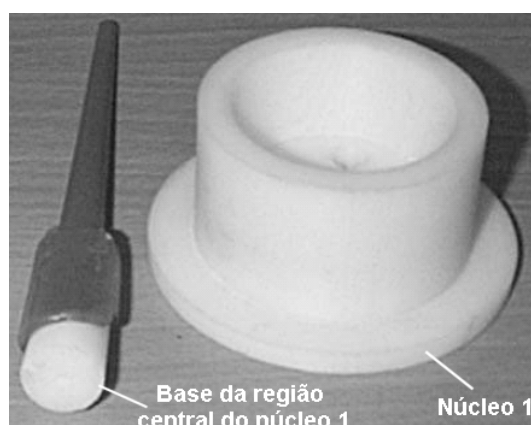


Figura 17 – Base da região central do núcleo 1 colapsada (Hopkinson, 2001).

Na terceira etapa, utilizando dois insertos (um para cada tipo de núcleo), na injeção de peças em ABS, os resultados não foram satisfatórios, pois os dois moldes colapsaram na primeira tentativa. Foi visto que embora o molde tenha sido preenchido os esforços no momento da extração danificaram a superfície do molde e romperam o seu núcleo.

O autor concluiu o trabalho sugerindo que, para diminuir o tempo de construção dos insertos, seria mais conveniente construí-los na forma de casca com preenchimento na parte posterior, embora esse procedimento em pouco afetaria o tempo de ciclo das peças injetadas. A orientação do núcleo 2 resultou numa estrutura mais resistente e sempre que fosse possível deveria ser utilizada para evitar falhas prematuras.

O experimento mostrou que o bico T12 produziu peças mais resistentes e de superfícies de melhor qualidade que o bico T10. O autor sugere que as pequenas ondulações que surgiram nas superfícies da cavidade podem ser minimizadas com a escolha de outras estratégias de construção do inserto. Para melhorar a qualidade e a resistência do inserto o autor sugere o uso de recobrimentos e/ou infiltrações.

O uso do ABS como material para a construção de insertos se mostrou promissor, considerando que as peças conseguiram ser moldadas. Os principais problemas apareceram durante a abertura do molde e na ejeção das peças. Espera-se que o refinamento dos parâmetros construtivos possibilite a obtenção de melhores resultados. É comentado também, que materiais alternativos como o policarbonato e o polifenilsulfona podem também ser utilizados. Finalizando o autor afirma que a utilização de moldes em ABS permite a injeção de diferentes tipos de geometrias, mas, da mesma forma que nos moldes de estereolitografia, é preciso evitar o uso na produção de peças com detalhes muito pequenos ou substituir esses detalhes por partes metálicas.

Dos trabalhos apresentados, apenas o de Hopkinson (2001) utilizou a tecnologia FDM, sem a necessidade de alterações no sistema de prototipagem original. A troca de material proposta por Masood (1999, 2004), não é de fácil implementação pelos usuários da tecnologia FDM, pois é dependente da disponibilidade desse material, dos ajustes e modificações de componentes da máquina e da experiência na otimização dos parâmetros construtivos.

CAPÍTULO 3 - AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO PROCESSO FDM SOBRE CARACTERÍSTICAS DE PEÇAS FABRICADAS EM ABS

As análises dos insertos construídos pelo processo FDM de prototipagem rápida dependem do conhecimento prévio das propriedades mecânicas e térmicas do material escolhido para a construção do protótipo. Embora o fabricante forneça as principais propriedades do material empregado nas máquinas de prototipagem rápida, a estrutura resultante da utilização de diferentes parâmetros de construção altera as propriedades da peça prototipada. Adicionalmente, o fato da peça ser construída pelo empilhamento de sucessivas camadas gera uma estrutura com uma direção de menor resistência (direção perpendicular a plataforma de construção). Isso significa que a variação da disposição de construção e a utilização de diferentes parâmetros construtivos podem resultar em peças de diferentes propriedades.

A literatura não apresenta resultados para essas propriedades, particularmente se forem específicas para um determinado conjunto de parâmetros de construção. Dessa forma para orientar a determinação dos parâmetros construtivos adequados para os insertos, foram realizados ensaios para medições de rugosidade, análises dimensionais lineares e angulares, ensaios mecânicos de tração e dilatométrica em corpos de prova fabricados com parâmetros de construção diferentes.

No caso da rugosidade, Cedorge & Colton (2000) afirmam que ela tem grande efeito sobre a força de extração do moldado em um molde construído por prototipagem rápida, além de afetar a qualidade da superfície das peças injetadas. Nas peças fabricadas pelo processo FDM, a rugosidade é função do efeito escada, de pequenas rebarbas liberadas durante a extrusão ou ainda dos parâmetros de construção utilizados. O efeito escada, por sua vez, é dependente de fatores como geometria da peça, orientação de fabricação e espessura de camada, sendo que, o fator mais relevante sobre a qualidade de um protótipo é a espessura da camada (Anitha *et al.*, 2001). Por outro lado, as superfícies geradas paralelamente à plataforma de construção são também afetadas por parâmetros de construção como a espessura do contorno e da varredura (*raster*) e o espaçamento (*gap*).

Um dos requisitos mais importantes na prototipagem rápida é a possibilidade de se construir protótipos com um material de características bastante próximas ao material previsto no projeto da peça. O ABS, chamado de plástico de engenharia

devido às suas boas propriedades mecânicas, é considerado um dos materiais poliméricos mais utilizados (Groover, 1996) e foi escolhido para ser o material construtivo da maioria das máquinas de tecnologia FDM.

O ABS pode ser utilizado em aplicações que necessitem de tenacidade e estabilidade dimensional. Em sua composição, o componente elastomérico, geralmente o polibutadieno ou um copolímero de butadieno, forma uma discreta fase dispersa no componente termoplástico, um copolímero de estireno e acrilonitrila - SAN (Sanchez, 1999).

Dessa forma esse termoplástico pode ser descrito como um composto de três monômeros: a acrilonitrila, o butadieno e o estireno, conforme mostra a sua estrutura química representada na Figura 18. Adicionalmente a Tabela 8 lista as propriedades do ABS atribuídas a cada um desses monômeros.

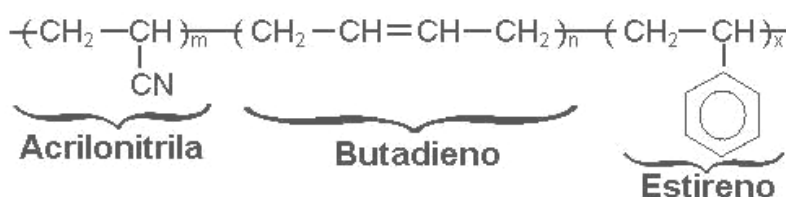


Figura 18 – Estrutura química do ABS.

Tabela 8 – Efeitos de cada monômero nas propriedades do ABS (Harper, 2000).

Monômero	Efeito
Acrilonitrila	Resistência ao calor Resistência química Resistência mecânica
Butadieno	Resistência ao impacto Retenção das propriedades a baixa temperatura Flexibilidade
Estireno	Rigidez Aparência superficial Processabilidade

Existem muitas maneiras de se combinar esses três monômeros resultando em variados tipos de ABS. No entanto as duas formas mais importantes são (Chanda,1987):

- Blenda do copolímero⁴ estireno-acrilonitrila com a borracha butadieno-acrilonitrila;
- Estireno e acrilonitrila copolimerizados em emulsão na presença de látex de polibutadieno (mais utilizada industrialmente).

Embora a construção por camadas comprometa a resistência das peças na direção de construção (vertical), os protótipos construídos em ABS podem ser usados em testes funcionais e montagens simulando as peças finais. A Tabela 9 lista algumas das propriedades físicas do ABS P-400 ensaiado na forma de filamento (Stratasys, 2004^A; Rodriguez *et al.*, 2000^B, Rodriguez *et al.*, 2001^C).

Tabela 9 – Propriedades do ABS P-400.

Propriedades	Valor	Unidade
Tensão de ruptura a tração ^A	34,45	MPa
Módulo de elasticidade longitudinal ^C	2495	MPa
Módulo de elasticidade transversal ^C	833	MPa
Coefficiente de Poisson ^C	0,3	--
Resistência ao impacto (Teste Izod) ^A	107	J/m
Dureza shore D ^A	78	--
Densidade ^B	1,05	g/cm ³
Condutividade térmica ^B	0,177	W/m.K
Calor específico ^B	2020	J/kg.K
Temperatura de deflexão ao calor (HDT) ^A	93,3	°C

⁴ Copolímero: Polímero constituído por duas ou mais unidades monoméricas diferentes apresentando ou não uma regularidade de repetição na cadeia (Rosato, 2000).

3.1 Materiais e Métodos

3.1.1 Medições de rugosidade de peças em ABS

Sabendo-se que os parâmetros de construção interferem na rugosidade das superfícies das peças, o objetivo desse experimento foi estabelecer um conjunto de parâmetros para serem usados na construção dos insertos em ABS. Nos ensaios, realizados em placas de ABS (30x20x2mm), foram feitas medições em três diferentes tipos de superfícies: superior (livre), inferior (destacada do suporte) e vertical, ilustradas na Figura 19. Dessa forma as placas foram fabricadas em duas posições diferentes, uma na posição horizontal ($x=20\text{mm}$, $y=30\text{mm}$ e $z=2\text{mm}$, sendo z a direção de adição das camadas), para a medição da rugosidade superior e inferior, e uma na posição vertical ($x=30\text{mm}$, $y=2\text{mm}$ e $z=20\text{mm}$), para medir a rugosidade na superfície vertical (de empilhamento).

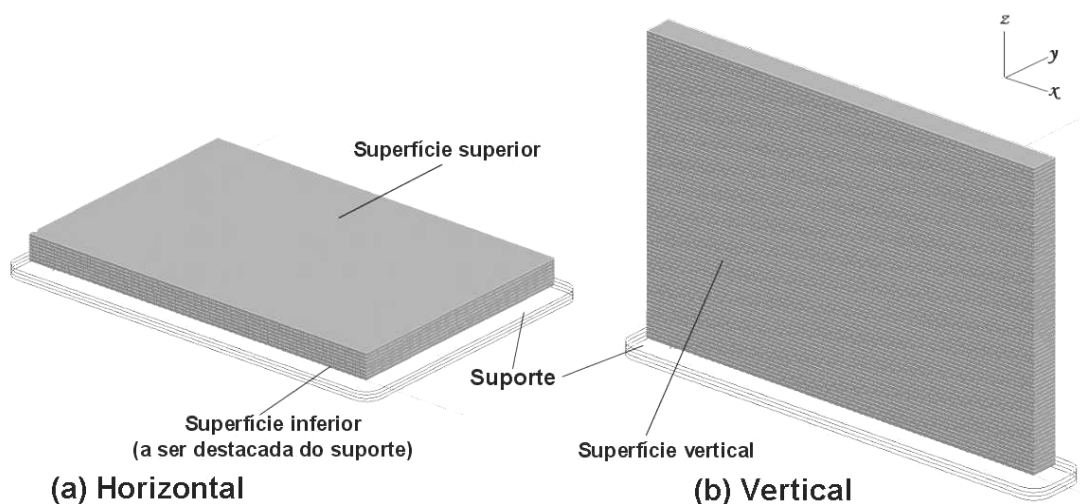


Figura 19 – Representação das posições de construção das placas em ABS.

As placas foram ainda fabricadas com três combinações de parâmetros de construção, variando-se a espessura de camada e o valor do espaçamento entre filetes (*gap*). A opção com espaçamento negativo foi escolhida por possibilitar a obtenção de peças mais densas, ou seja, com menos vazios.

A Tabela 10 apresenta um sumário com os parâmetros de construção das placas utilizadas neste estudo, sendo que foram fabricadas três peças para cada conjunto de parâmetros de fabricação (total = 18 placas).

Tabela 10 - Sumário das placas utilizadas para medição da rugosidade

Nº da peça	Espessura camada (mm)	Espaçamento (mm)	Largura do contorno e da varredura (mm)	Posição de fabricação
1	0,178	0	0,305	horizontal
2	0,178	0		vertical
3	0,254	0		horizontal
4	0,254	0		vertical
5	0,254	-0,025		horizontal
6	0,254	-0,025		vertical

A medição foi realizada com um rugosímetro Perthometer S8P (Perthen, Mahr, Germany) e os parâmetros utilizados foram: $\lambda_c=2,5\text{mm}$ (cut-off), $L_T=17,5\text{mm}$ (comprimento total) e $L_M=12,5\text{mm}$ (comprimento útil). A rugosidade foi medida perpendicularmente a direção de preenchimento dos filetes conforme ilustrado na Figura 20 e todas as medidas foram repetidas três vezes em posições diferentes na superfície da placa.

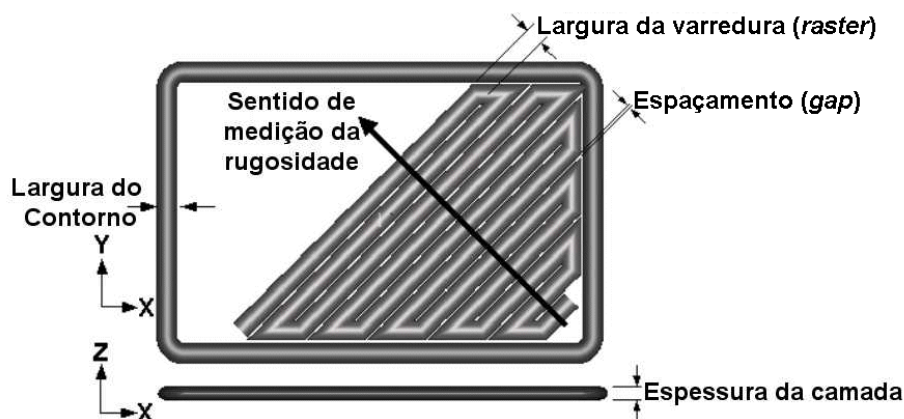


Figura 20 - Representação esquemática do sentido de medição da rugosidade para as placas horizontais.

3.1.2 Análise dimensional linear e angular

• Análise dimensional linear

A precisão dimensional de uma peça fabricada pelo processo FDM é afetada por diversos fatores. Para Ziemian & Crown III (2001), que estudaram quatro

variáveis de processo, a largura do filete (contorno e varredura), a orientação da peça e a espessura da camada são fatores de pouca importância enquanto a estratégia de preenchimento tem grande influência sobre a qualidade da peça. Já o trabalho de Pennington *et al.* (2003) concluiu que o tamanho da peça, a sua localização na plataforma da máquina e a temperatura na cabine afetam significativamente a precisão dimensional no processo FDM.

O presente experimento teve por objetivo avaliar a tolerância dimensional nas três direções de fabricação (x, y e z). A construção por camadas pressupõe que as dimensões em duas direções (x e y) são geradas de maneira diferente que na terceira direção (z) e isso pode acarretar variações na tolerância dimensional da peça. Existem dois parâmetros utilizados para compensar a contração do material, um para o plano xy (*Part xy shrink factor*) e outro para a direção z (*Part z shrink factor*), que podem ser utilizados para corrigir eventuais variações dimensionais originadas por outros fatores.

Para a análise dimensional nas três direções de fabricação, foi utilizada a geometria mostrada na Figura 21, com dimensões externas de aproximadamente 40x40x40mm.

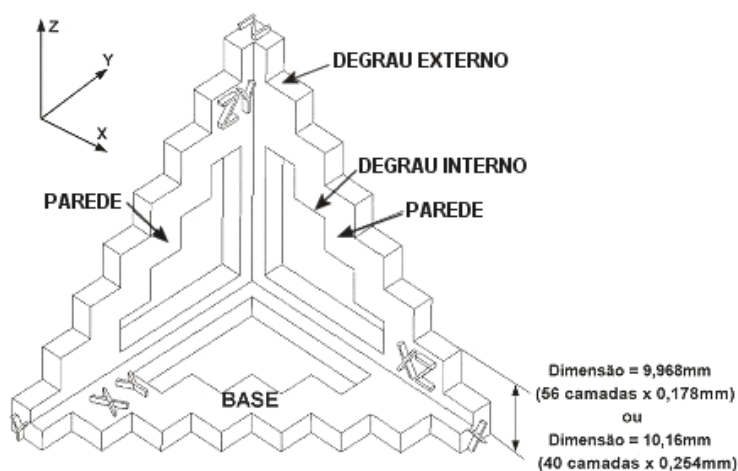


Figura 21 - Geometria da peça para a análise dimensional.

Cada parede do modelo possui degraus externos e internos nos três eixos de trabalho. Os degraus internos nos planos ZY e XZ objetivam verificar a tolerância dimensional de regiões construídas a partir do suporte gerado para sustentá-las.

No processo de adição de camadas, os valores das dimensões na direção z são aproximadas pelo produto entre a espessura de camada e o número de camadas (ex.: cota Figura 21). Esta peculiaridade faz com que exista uma diferença de até uma espessura de camada em cada dimensão. Desta forma, com o objetivo de eliminar esta parcela variável da análise e estudar somente a tolerância de fabricação, as dimensões das alturas dos degraus foram ajustadas para que gerassem um número exato de camadas. Sendo assim, foram modeladas duas peças considerando as alturas de camadas de 0,178mm e 0,254mm, que são as mais usuais para o bico T12. A Figura 21 exemplifica que, para uma dimensão projetada de 10mm, os valores foram ajustados para 9,968mm (56 camadas) e 10,16mm (40 camadas) para as alturas de camada 0,178mm e 0,254mm respectivamente.

Foram fabricados três protótipos para cada uma das duas espessuras de camada (0,178mm e 0,254mm) e os principais parâmetros de construção utilizados foram: espessura do contorno e do preenchimento igual a 0,305mm e espaçamento (*gap*) nulo. Após a fabricação dos protótipos, a medição foi realizada com um paquímetro com resolução de 0,01mm.

- **Análise dimensional angular**

Para aumentar a abrangência sobre características da geometria dos insertos em ABS, foi realizado esse estudo para verificar a precisão dimensional angular sobre diferentes ângulos existentes em dois modelos fabricados pelo processo FDM.

Esse estudo tem por objetivo verificar os erros existentes na construção de diferentes ângulos e avaliar se há variação entre os valores desses ângulos medidos nas faces, superior e inferior, de superfícies inclinadas. Foi analisado também se a presença de suportes na superfície inferior de planos inclinados interfere nos resultados.

A análise dimensional angular utilizou duas geometrias, sendo que na primeira a variação entre as rampas inclinadas foi de 1° (de 40 a 45° - Figura 22), enquanto que na segunda foi de 5° (de 10 a 35°). A variação foi menor na primeira peça para permitir verificar, além da precisão dimensional, qual o efeito da fabricação de uma parede inclinada com e sem o apoio de suportes.

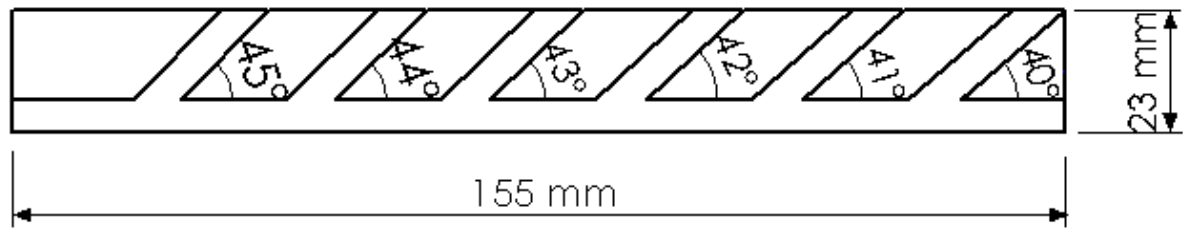


Figura 22 – Variação angular entre as rampas da primeira geometria.

Os parâmetros de construção foram configurados para que as paredes com ângulos de 44 e 45° fossem construídas sem suporte, enquanto que as demais seriam construídas com suporte. Na segunda geometria verificou-se apenas a precisão nos ângulos formados, pois todas foram construídas com suporte.

Para esta análise foram fabricados três protótipos de cada geometria. Os principais parâmetros de construção dos modelos foram: espessura de contorno e de preenchimento iguais a 0,508mm, espaçamento nulo e espessura de camada igual a 0,254mm. A medição dos ângulos foi realizada utilizando-se uma máquina de medir por coordenadas Zeiss, com apalpador de ponta esférica com 2mm de diâmetro, localizada no CEFET-PR. Os valores foram obtidos através do ângulo entre uma reta definida por três pontos em cada superfície inclinada e uma reta na base da peça (única para todas as rampas). Foram medidos os ângulos da superfície inferior e superior de cada rampa objetivando verificar se haveria alguma variação entre esses ângulos.

3.1.3 Ensaio mecânico de tração, dilatometria e calorimetria diferencial de varredura

- **Ensaio mecânico de tração**

A fabricação de peças camada a camada, através da deposição de materiais, gera uma estrutura com propriedades anisotrópicas. A estratégia de fabricação tem um grande efeito sobre essas propriedades e conseqüentemente sobre o desempenho das peças (Bellini & Güçeri, 2003). A literatura apresenta resultados sobre algumas propriedades das peças construídas por FDM (Rodriguez *et al.*, 2001), no entanto a possibilidade de utilizar inúmeras estratégias de fabricação torna difícil a utilização desses valores. Esse experimento terá por objetivo realizar ensaios

de tração para determinar os valores de algumas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados com dois conjuntos diferentes de parâmetros construtivos. Foi realizada também uma análise fractográfica com microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos corpos de prova fraturados.

Para realização dos ensaios de tração foram confeccionados corpos de provas de tração em ABS (ASTM D 638m tipo IV) com dois conjuntos diferentes de parâmetros construtivos: padrão e refinado (Tabela 11). O ensaio foi realizado em uma máquina EMIC com temperatura de ensaio igual a 20°C e velocidade de deformação de 5mm/minuto. Para verificar a resistência do material que serve de matéria prima para a máquina de prototipagem rápida foi feito também o ensaio de tração num filamento de ABS P400.

Tabela 11 – Parâmetros de construção utilizados nos corpos de prova

Parâmetros de Construção	Padrão	Refinado
Espessura de camada	0,254 mm	0,178 mm
Espessura do contorno	0,508 mm	0,305 mm
Espessura do preenchimento	0,508 mm	0,305 mm
Tipo de bico	Tip12	Tip12

Nos estudos com microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova fraturados, foi utilizado um aparelho Philips modelo XL30. Para a obtenção das micrografias, as superfícies dos corpos de prova foram recobertas com uma camada de ouro em um aparelho BAL-TEC Sputter Coater SCD005. O programa AnaliSYS Pro 2.11.002 da Soft-imaging Software Gmb-H foi utilizado na análise das imagens.

- **Dilatometria**

A existência de vazios na estrutura das peças em ABS fabricadas por FDM afeta suas propriedades mecânicas e térmicas. A quantidade desses vazios é função dos parâmetros construtivos utilizados na fabricação das peças prototipadas. Esse

ensaio foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito desses parâmetros sobre o coeficiente de dilatação térmica (α) e a temperatura de amolecimento (T_a).

Foram utilizados dois corpos de prova de dimensões 7x7x14mm, construídos em ABS com dois conjuntos de parâmetros de construção diferentes: padrão (*default*) e refinado (Tabela 11).

O dilatômetro (modelo RB115), localizado no LABMAT/UFSC, é um equipamento composto por um forno ao qual uma haste de alumina (material de baixo coeficiente de dilatação térmica) é acoplada internamente, e esta, por sua vez, possui em seu interior uma segunda haste móvel também de alumina que tem acoplado em uma de suas extremidades um dispositivo denominado Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT - *Linear Variable Differential Transformer*), que mede as variações micrométricas no movimento da haste interna. As variações dimensionais são detectadas por um transdutor eletrônico de alta precisão e linearidade, com curso útil de 10 mm.

O corpo de prova foi inicialmente medido e fixado entre as hastes. Em seguida ele foi calibrado e colocado dentro do forno, onde foi submetido a um aumento de temperatura, controlada por um termopar localizado próximo da amostra. Os valores das temperaturas (T) e das relações entre as variações de comprimento pelo comprimento inicial da amostra ($\Delta L/L_0$) foram gravados, ao longo do tempo, em um computador conectado ao equipamento.

- **Calorimetria diferencial de varredura**

O ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC - *Differential Scanning Calorimetry*) é baseado no princípio que se uma substância é submetida a uma mudança física ou química ocorre uma correspondente variação da sua entalpia (Lucas, et al., 2001). A determinação das entalpias é realizada pela medição do diferencial de fluxo de calor necessário para manter uma amostra do material e uma referência inerte a uma mesma temperatura. Entre outras aplicações, esse ensaio permite a determinação das temperaturas de transição em polímeros. Nesse experimento foi feita a análise para determinação das principais temperaturas de transição de uma amostra de ABS P-400.

O ensaio foi realizado em um equipamento Shimadzu DSC 50 (Central de Análises, Departamento de Química, UFSC). A faixa de temperatura utilizada foi de

-100°C até 400°C e a taxa de aquecimento foi de 10°C/min. Como a temperatura de transição vítrea do butadieno é negativa foi escolhida uma faixa que tentasse abranger o seu valor.

3.2 Resultados e Discussões

3.2.1 Medições de rugosidade de peças em ABS

A Tabela 12 apresenta um sumário dos resultados da rugosidade superficial. Os valores de espessura de camada e espaçamento estão repetidos para auxiliar a interpretação dos mesmos.

Tabela 12 - Sumário dos resultados do ensaio de rugosidade.

Nº da Peça	Espessura da camada (mm)	Espaçamento (mm)	Horizontal (X, Y)				Vertical (Z)	
			superfície superior		superfície inferior		Ra (Média)	Desvio padrão
			Ra (Média)	Desvio padrão	Ra (Média)	Desvio padrão		
1	0,178	0	9,690	0,663	9,292	0,744	-	-
3	0,254	0	12,990	0,361	10,076	1,050	-	-
5	0,254	-0,025	6,309	1,584	15,347	1,520	-	-
2	0,178	0	-	-	-	-	11,982	4,009
4	0,254	0	-	-	-	-	10,712	3,311
6	0,254	-0,025	-	-	-	-	19,396	5,101

A rugosidade da superfície superior no plano XY com o espaçamento negativo foi bem menor do que para as demais condições. Uma possível explicação para este resultado é o fato do bico extrusor estar pressionando mais um filamento sobre o outro, atuando assim com um planificador da superfície. Já a superfície inferior apresentou uma rugosidade bem maior do que a superior. Uma inspeção visual desta superfície revelou a existência de uma ondulação que, provavelmente, foi gerada pelo contato com a superfície do suporte que é mais irregular. Mesmo sendo utilizadas alturas de camadas diferentes, não houve uma diferença muito grande nos valores da rugosidade nas superfícies construídas verticalmente. Por outro lado, quando essas superfícies (peça 6 na Tabela 12) foram construídas com espaçamento (*gap*) negativo ocorreu um aumento da rugosidade. Este efeito pode ser explicado pelo fato do perímetro de cada camada ser depositado antes da

varredura (*raster*) e o excesso de material devido ao espaçamento negativo pode ter tensionado e deformado o filamento do contorno externo. Esse trabalho adotará o conjunto de parâmetros de construção utilizados na peça número 1 (chamados de “parâmetros refinados”), devido a seus melhores resultados para a rugosidade nas superfícies inferior e superior.

3.2.2 Análise dimensional linear e angular

• Análise dimensional linear

A Figura 23 apresenta dois gráficos com os resultados da análise dimensional linear da base e da parede da peça construída com a espessura de camada igual a 0,178mm. Foram colocados no gráfico os valores dos erros nas dimensões dos degraus externos (a) e internos (b) nas direções x e y.

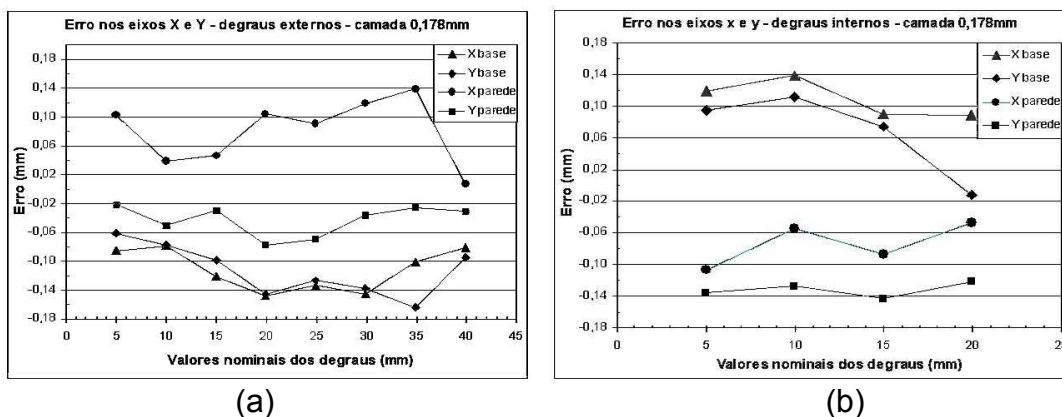


Figura 23 - Variação dimensional linear externa (a) e interna (b) na direção x e y da base e da parede da peça com espessura de camada igual a 0,178mm.

Foi observado um comportamento diferenciado entre as dimensões da base e da parede. Os valores das dimensões da base (região em contato com o suporte) foram sempre menores do que os da parede para os degraus externos e maiores do que os da parede para os degraus internos, caracterizando uma contração maior na base. Analisando os resultados da parede, observa-se que as dimensões dos degraus externos apresentam um erro positivo, na maioria das vezes, enquanto que nos degraus internos, o erro é quase sempre negativo.

A mesma análise foi feita para as peças fabricadas com espessura de camada igual a 0,254mm. A diferença dimensional entre as dimensões da parede e

a da base não apresentou o comportamento diferenciado que ocorreu para a espessura de 0,178mm. Os resultados são apresentados na Figura 24.

A variação dimensional linear na direção Z dos degraus externos (a) e internos (b) das peças com espessura de camada 0,178 e 0,254mm está representada na Figura 25. Pode-se observar uma pequena, mas constante, diferença entre as dimensões dos degraus da peça de espessura de camada 0,178 e 0,254mm, sendo que, na maioria das vezes a primeira está com uma dimensão maior do que a segunda. Os valores dos erros para os degraus externos são positivos, enquanto que para os degraus internos são negativos. Pode-se inferir que o suporte presente nos degraus internos afetou os resultados dimensionais nesta região. É possível acrescentar ainda que, quando comparado com os erros na direção X e Y, o desvio na direção Z é ligeiramente maior.

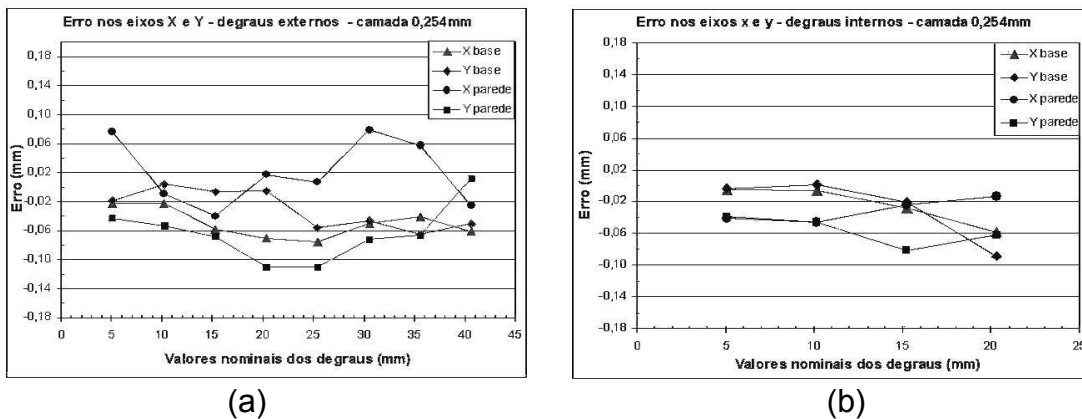


Figura 24 - Variação dimensional linear externa (a) e interna (b) na direção X e Y da base e parede da peça com espessura de camada 0,254mm.

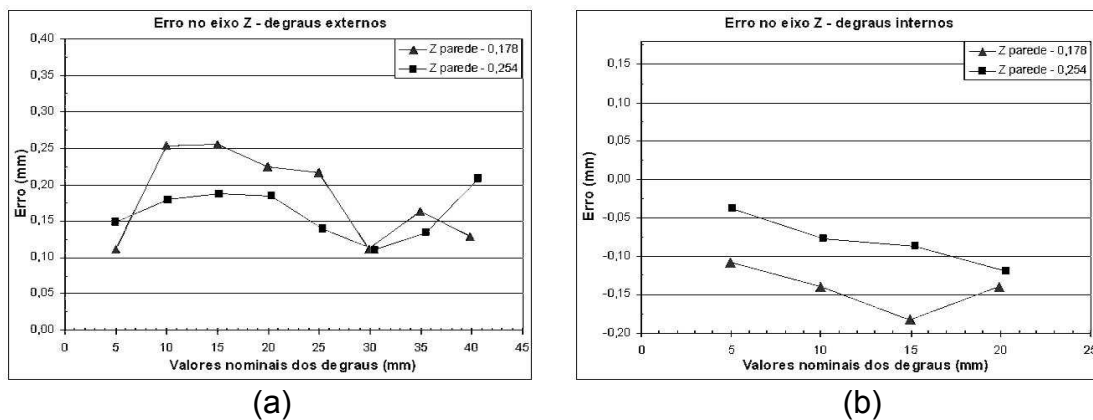


Figura 25 - Variação dimensional linear externa (a) e interna (b) na direção Z das peças com espessura de camada 0,178 e 0,254mm.

- **Análise dimensional angular**

A Figura 26 apresenta os resultados obtidos nas medições angulares. Na peça com rampas variando de 10 a 35°, foi observada uma diminuição do erro com o aumento do ângulo. É provável que esta redução seja resultante da maior influência do efeito escada nos ângulos menores sobre o método de medição (toque de um apalpador de ponta esférica). Esta explicação encontra respaldo no aumento do desvio padrão dos resultados dos ângulos menores. Nos resultados da Figura 26b não se verificou a influência dos suportes nos ângulos das rampas (40, 41, 42 e 43°) comparativamente com os das rampas que foram construídas sem suporte (44 e 45°). Também não é possível distinguir uma diferença entre a superfície inferior e superior da rampa. O erro observado no ângulo de 35° é levemente menor do que o de 40°, o que não era esperado se for observada a tendência da curva mostrada na Figura 26a. Observando as peças notou-se um leve empenamento da base em algumas delas, o que pode ter afetado os resultados. Este efeito não foi generalizado mas pode ter acontecido por influência da posição e orientação das peças sobre a plataforma de construção, conforme foi sugerido por Pennington *et al.* (2003).

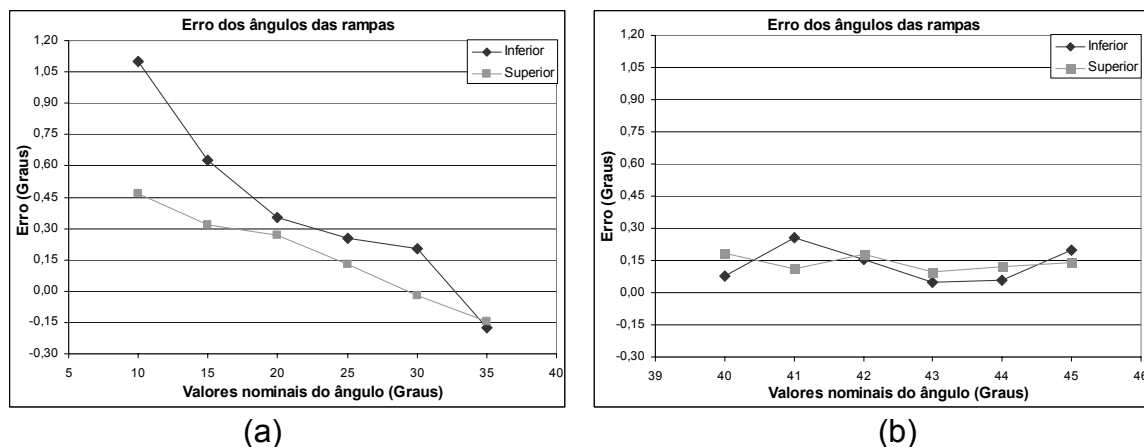


Figura 26 Resultados da análise da variação angular: (a) Ângulos=10, 15, 20, 25, 30 e 35°; (b) Ângulos=40, 41, 42, 43, 44 e 45°.

3.2.3 Ensaio mecânico de tração, dilatométrica e DSC

- **Ensaio mecânico de tração**

Os resultados obtidos nos ensaios de tração estão listados na Tabela 13 e representados na Figura 27.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas sob tração do ABS para FDM.

Amostra	Módulo elástico (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Filamento em ABS	3630 (± 70)	42 (± 2)	40 (± 2)	20 (± 3)
Corpo de prova refinado	1860 (± 50)	23 (± 1)	19 (± 1)	5 ($\pm 0,5$)
Corpo de prova padrão	1780 (± 50)	22 (± 1)	19 (± 1)	4 ($\pm 0,5$)

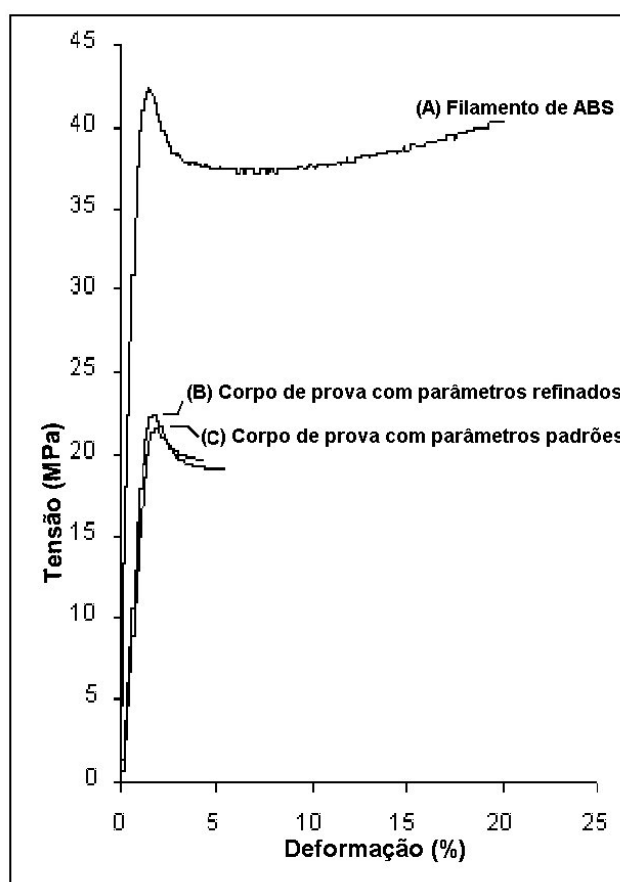


Figura 27 - Gráfico tensão versus deformação para o filamento de ABS (A), corpo de prova fabricado com parâmetros refinados (B) e com parâmetros padrões (C).

Os resultados mostram que a resistência do filamento é quase duas vezes maior que a dos corpos de prova. Essa diferença ocorre em razão da presença de vazios na estrutura (Figura 28) e da perda de orientação molecular da peça prototipada (Rodriguez *et al.*, 2001).

O corpo de prova construído com parâmetros refinados apresentou valores ligeiramente maiores, comparativamente ao construído com parâmetros padrões. Era esperada uma maior diferença entre os valores visto que o refinamento diminui

as regiões com vazios. Possivelmente os parâmetros utilizados resultaram em seções transversais de áreas bastante próximas na região da fratura.

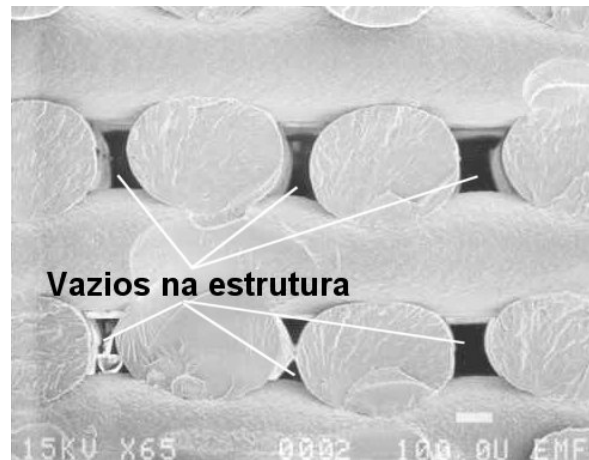


Figura 28 – Presença de vazios na estrutura das peças construídas por FDM (Bellini & Güçeri, 2003).

Rodriguez *et al.* (2001) desenvolveu um estudo experimental concluindo que há uma redução de 11 a 37% no módulo de elasticidade longitudinal e de 22 a 57% na resistência a tração nas peças produzidas em FDM comparativamente ao filamento de ABS. Esses resultados diferem dos encontrados nesse experimento. Os valores fornecidos pelo fabricante do filamento para o módulo elástico foi 2100MPa que está mais próximo do valor de 2230MPa encontrado por Rodriguez *et al.* (2001). No entanto os valores para os corpos de prova foram bem próximos aos encontrados no trabalho de Rodriguez *et al.* (2001) para um corpo de prova construído com espaçamento (*gap*) positivo (módulo elástico= 1807MPa).

Os corpos de prova tiveram modos de fratura diferentes. O que utilizou parâmetros padrões rompeu de forma plana (perpendicular a direção de tração), já o que utilizou parâmetros refinados rompeu obliquamente a direção de tração. A Figura 29 e a Figura 30 mostram as micrografias das regiões fraturadas para os dois tipos de corpos de prova.

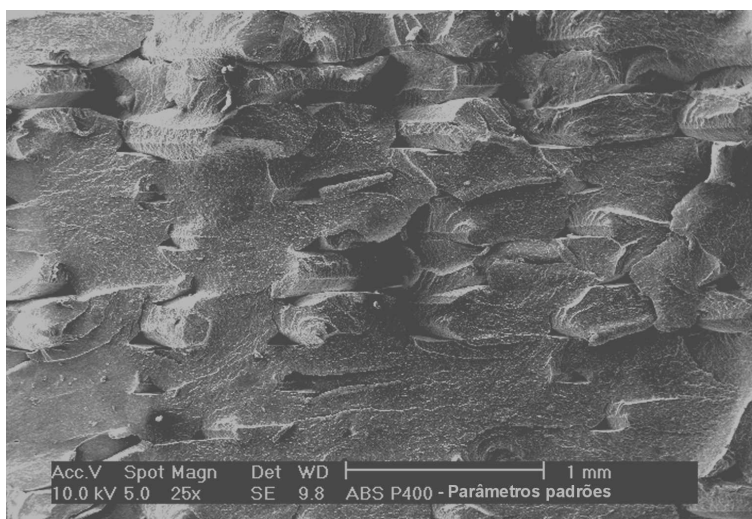


Figura 29 – Micrografia da região fraturada do corpo de prova construído com parâmetros padrões.

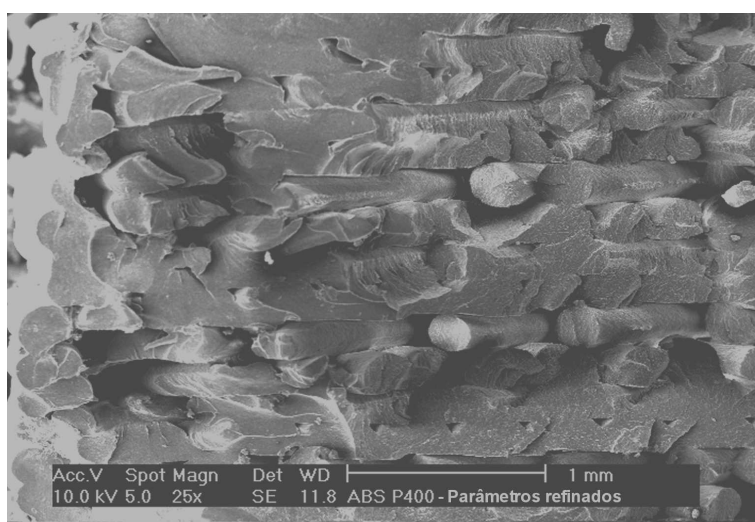


Figura 30 - Micrografia da região fraturada do corpo de prova construído com parâmetros refinados.

- **Ensaio de dilatométrica**

Os valores fornecidos pelo dilatômetro foram utilizados para a confecção do gráfico mostrado na Figura 31. O valor do coeficiente de dilatação térmica para os dois conjuntos de parâmetros construtivos (padrão e refinado) foi calculado como sendo o ângulo que a curva faz com o eixo horizontal (temperatura). A temperatura de amolecimento foi também extraída desse gráfico e situa-se no ponto onde os valores de $\Delta L/L_0$ começam a decrescer.

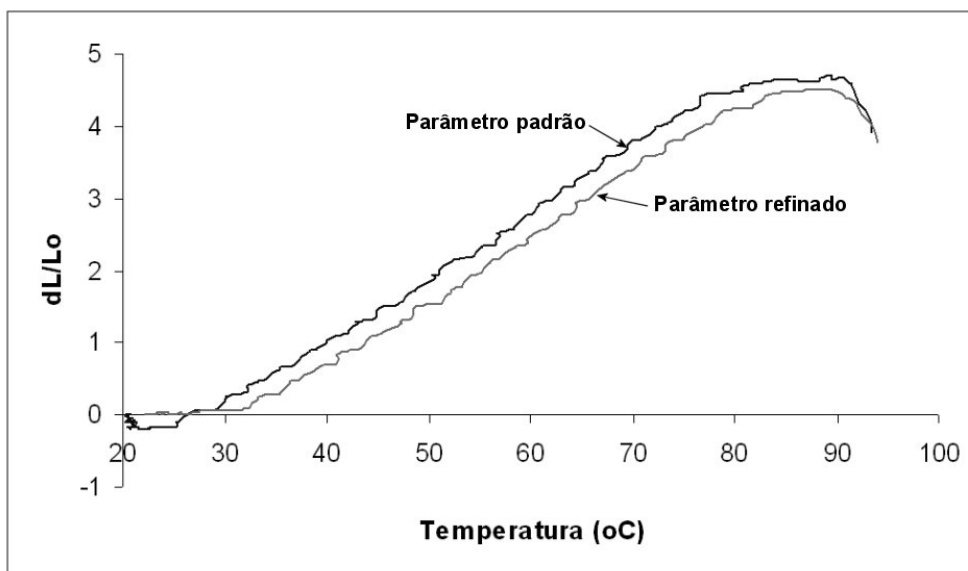


Figura 31 – Gráfico resultante no ensaio de dilatométrica para os corpos de prova construídos com parâmetros padrões e refinados.

Os resultados estão apresentados na Tabela 14 onde pode-se constatar que a utilização de parâmetros construtivos diferentes não afetou muito os coeficientes de dilatação térmica e a temperatura de amolecimento. Para referência são também listados os valores dessas propriedades para um ABS genérico utilizado para injeção.

Tabela 14 – Valores do coeficiente de dilatação térmica e da temperatura de amolecimento para o ABS.

	Parâmetros de construção		Valores tabelados para ABS injetado ⁵
	Padrão	Refinado	
Coeficiente de dilatação térmica α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$91,9 \times 10^{-6}$	$91,3 \times 10^{-6}$	94×10^{-6}
Temperatura de amolecimento T_a ($^{\circ}\text{C}$)	91,3	90,5	100

Nota-se uma diferença de quase 10% nos valores de temperatura de amolecimento entre os corpos de prova construídos por FDM e os valores tabelados (material típico de injeção). Embora a composição do ABS P400 não esteja disponível, essa diferença pode estar relacionada com a necessidade de uma maior

⁵ MATWEB, 2004.

fluidez do material no bico extrusor da máquina FDM. No caso do coeficiente de expansão térmica a presença de vazios na estrutura das peças prototipadas pode também ser um dos fatores que justificam a pequena diferença encontrada entre os valores. Vale lembrar também que as análises de dilatométrica ou de temperatura de amolecimento, para serem comparadas necessitam ser conduzidas em condições idênticas com relação a taxa de aquecimento, calibração do sistema LVDT e principalmente da pressão (força x área) aplicada durante o ensaio.

- **DSC – Calorimetria diferencial de varredura**

Este ensaio foi realizado para determinação das temperaturas de transição do ABS P400. A temperatura de transição vítrea do butadieno pode ser localizada no gráfico da Figura 32 e foi igual a $-75,5^{\circ}\text{C}$. No entanto seria necessário repetir o ensaio em um outro equipamento que permitisse o resfriamento das amostras para valores abaixo dos -100°C utilizados, visto que o valor encontrado se encontra na região onde a linha base ainda estava se ajustando. Analisando o mesmo gráfico é possível localizar a região onde ocorre a temperatura de transição vítrea da matriz estirênica ($T_g=104,5^{\circ}\text{C}$ – ASTM D 3418-82).

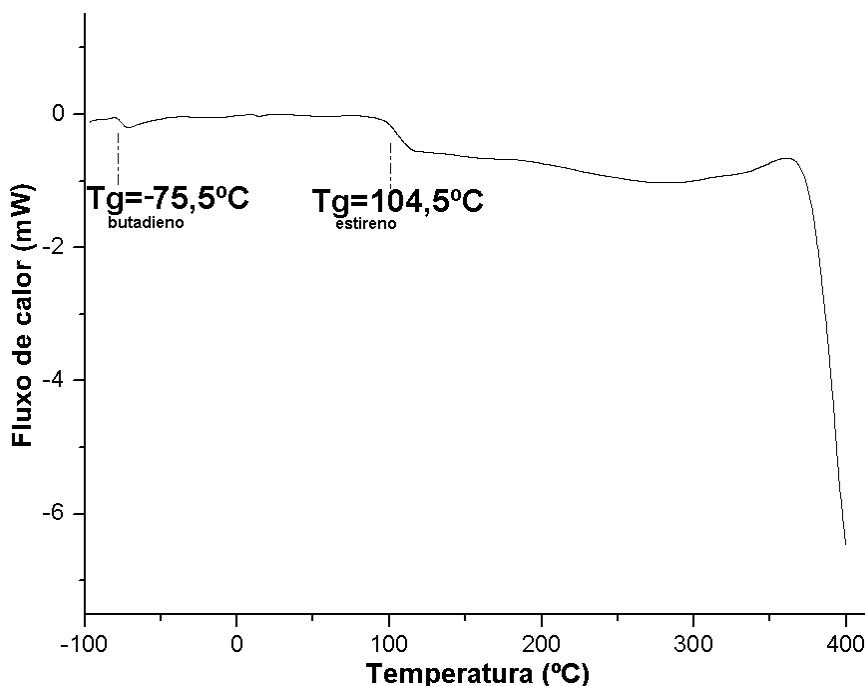


Figura 32 – Resultado da análise de DSC para uma amostra de ABS P400.

CAPÍTULO 4 - MOLDAGEM POR INJEÇÃO EM INSERTOS DE ABS FABRICADOS POR FDM

Com o objetivo de comprovar experimentalmente a possibilidade de utilizar insertos fabricados em ABS pelo processo FDM para a injeção de termoplásticos foram desenvolvidos quatro experimentos.

Inicialmente realizou-se um experimento para avaliar a viabilidade de injetar peças de geometria simples num inserto fabricado com os parâmetros de construção usualmente pré-ajustados (*default*) para máquinas FDM 2000. Procurou-se identificar as dificuldades a serem encontradas utilizando insertos em ABS fabricados pelo processo FDM de prototipagem rápida.

O experimento seguinte utilizou um inserto projetado para injetar a geometria de um corpo de prova de tração ASTM D 638m tipo IV. O estudo teve por objetivo verificar a utilização de novos valores de parâmetros de construção do inserto pela máquina FDM 2000 para melhorar seu acabamento superficial e comparar as propriedades das peças injetadas com as das peças obtidas a partir de insertos metálicos. Para aumentar a extração de calor dos insertos foi planejado um outro experimento com a utilização de tubos de cobre no seu interior para circulação de água com temperatura abaixo da ambiente. Finalmente foi avaliada a utilização de um inserto do tipo macho/fêmea para verificar o seu desempenho, principalmente na fase de extração da peça.

4.1 Inserto de ABS com Parâmetros de Construção Padrão

4.1.1 Justificativa

Este estudo avaliou preliminarmente a possibilidade de injetar termoplásticos em um inserto fabricado em ABS pelo processo FDM de prototipagem rápida. Procurou-se levantar as dificuldades técnicas e as possibilidades de soluções para o planejamento dos demais experimentos. Os diversos trabalhos desenvolvidos no CIMJECT-UFSC (Gomide, 2000; Ribeiro Jr, 2003; Vandresen, 2003; Lafratta, 2004 e Beal, 2002) utilizando insertos em estereolitografia orientaram a execução desse experimento com relação a geometria do inserto, forma de preenchimento da parte posterior e parâmetros de injeção.

4.1.2 Procedimento

O projeto e fabricação de um molde é uma etapa que demanda muito tempo no ciclo de desenvolvimento de produtos de plástico injetado, sendo desejável que essa etapa ocorra em paralelo com a fase de projeto do componente. Visando sistematizar esta atividade, Daré (2001) propôs a divisão da fase de projeto do molde em três etapas: projeto de leiaute, projeto preliminar e projeto detalhado. Essa divisão foi proposta visando permitir a simultaneidade entre as tarefas de projeto do componente e o projeto do molde. Cada uma das etapas é dividida em tarefas relacionadas na Tabela 15.

Tabela 15– Etapas e atividades de projeto do molde Daré (2001).

Projeto de Leiaute do Molde
<ol style="list-style-type: none"> 1. Determinação do número, posição e tipo dos pontos de injeção 2. Determinação do número e leiaute das cavidades 3. Determinação da posição da(s) linha(s) de partição 4. Determinação do leiaute, dimensões básicas e tipo do sistema de alimentação 5. Definição das características básicas do molde 6. Análise “compre ou faça” (<i>make or buy</i>) referente aos componentes padrões do molde
Projeto Preliminar do Molde
<ol style="list-style-type: none"> 1. Dimensionamento exato das cavidades, canais de alimentação/distribuição e bucha de injeção 2. Projeto do sistema de refrigeração 3. Projeto mecânico (dimensionamento das placas e demais elementos e especificação de materiais) 4. Projeto do sistema de extração e definição dos pontos de exaustão de ar aprisionado 5. Compra dos itens padronizados 6. Modelagem geométrica preliminar dos itens que serão fabricados 7. Análise crítica do projeto preliminar
Projeto Detalhado do Molde
<ol style="list-style-type: none"> 1. Elaboração dos desenhos detalhados dos itens do molde 2. Elaboração dos desenhos de montagem 3. Avaliação crítica do projeto do molde

Em todos os experimentos realizados foi utilizado um porta-moldes já existente restringindo-se o projeto apenas a concepção do inserto (molde). Nesse

primeiro estudo a fase de projeto de leiaute ficou limitada a escolha da melhor solução de concepção para o inserto. Optou-se pelo uso de uma geometria já existente ilustrada na Figura 33, que foi utilizada anteriormente por Beal (2002) para fabricação de insertos em estereolitografia para a injeção de pós-metálicos. Em outras palavras, utilizou-se o mesmo arquivo STL para construção do novo inserto em ABS. Essa escolha simplificou também as fases de projeto preliminar e detalhado, restando apenas a definição do sistema de refrigeração do inserto. Nesse estudo inicial optou-se, por simplificação, pela refrigeração através de jatos de ar sobre o inserto, conforme sugerido por Dickens (1999) e Saurkar *et al.* (1999).

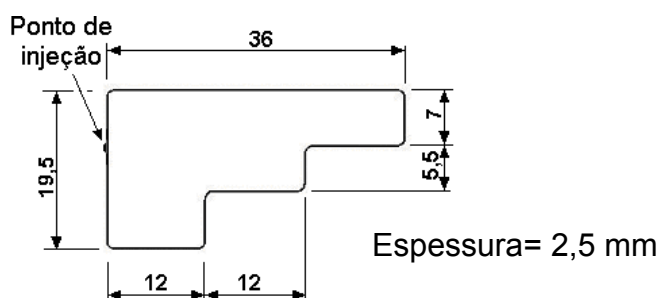


Figura 33 – Geometria da primeira peça estudada.

A fabricação do inserto de ABS foi realizada em uma máquina FDM 2000 utilizando os parâmetros de construção padrão configurados no programa de pré-processamento *Insight*, listados na Tabela 16. Foi utilizado o bico T12 com furo calibrado de 0,305mm de diâmetro.

Tabela 16– Parâmetros de construção padrão.

Parâmetros de Construção	Valores
Espessura de camada	0,254 mm
Largura do contorno	0,508 mm
Largura da varredura (<i>raster</i>)	0,508 mm
Tipo de bico	T12

O inserto foi construído na forma de casca e a sua parte posterior foi preenchida com várias camadas de resina à base de poliéster (cola plástica Anjo) que depois de curada foi lixada para garantir a planicidade e o paralelismo com a face frontal. Os insertos não foram submetidos a nenhuma etapa de pós-processamento para permitir a análise das peças injetadas em um inserto sem

nenhum acabamento. Depois de ajustado no porta-moldes (Figura 34), esse foi montado na máquina injetora para o início da injeção.

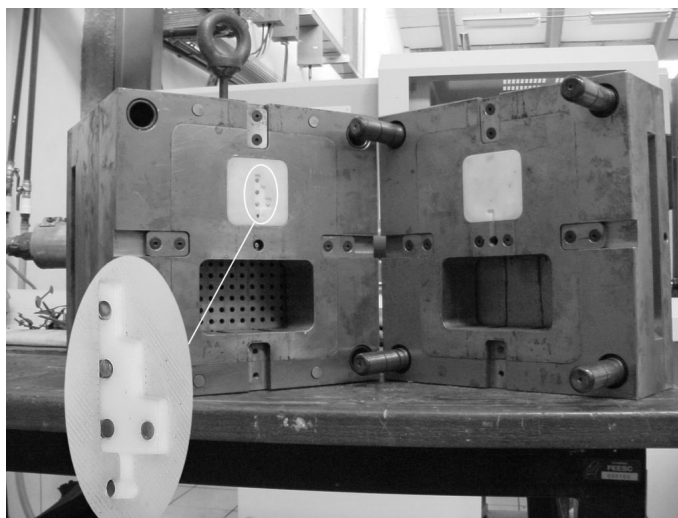


Figura 34 – Insertos montados no porta-moldes.

Uma das limitações na moldagem de termoplásticos diretamente em insertos de ABS, é a possibilidade de ocorrer afinidade química entre estes materiais durante o processo de injeção. É preciso, portanto, estabelecer um procedimento de escolha do material a ser injetado, devendo este se restringir àqueles que possivelmente não possuam afinidade com o ABS. Na literatura é possível encontrar tabelas que apresentam dados de afinidade do ABS com diferentes polímeros, como a Tabela 17 (DSM,1999).

Tabela 17 – Afinidade do ABS com outros polímeros (Adaptada de DSM,1999).

Material	Fabricante	ABS	ASA	PBT	PC	PEAD	PEBD	PET	PMMA	PP	PPO-MOD	PS-GP	PS-HI	PVAC	PVC	SAN	TPE
		ABS	Ronfalin														

Muita afinidade	
Pouca afinidade	
Sem afinidade	

Outra alternativa, utilizada nesse trabalho, é fazer uso do parâmetro de solubilidade de Hildebrand δ (também chamado de parâmetro de coesão no caso de materiais não líquidos), que indica quais polímeros ou substâncias químicas

possuem afinidade entre si. A Tabela 18 fornece valores de δ para os polímeros mais conhecidos e uma boa aproximação é escolher polímeros com valores de δ diferentes para evitar a possibilidade de afinidade entre esses materiais.

Tabela 18 – Parâmetros de solubilidade de alguns polímeros⁶.

Polímero	Sigla	Parâmetro de solubilidade δ
Polifenilsulfona	PPSF	ND ⁷
Politetrafluoretileno	PTFE	6,2
Polietileno	PE	7,9
Elastômero de Butadieno-estireno	SBR	8,1
Polipropileno	PP	8,1
Polibutadieno	BR	8,6
Poliestireno	PS	9,1
Policloropreno	CR	9,2
Elastômero de Butadieno-acrilonitrila	NBR	9,4
Poli(acetato de Vinila)	PVA	9,4
Polimetil Metacrilato	PMMA	9,5
Policloreto de Vinila	PVC	9,7
Policarbonato	PC	9,8
Polietileno Tereftalato	PET	10,7
Polioximetileno	POM	11,1
Policloreto de Vinilideno	PVDC	12,2
Nylon 6.6	PA-66	13,6
Poliacrilonitrila	PAN	15,4

Para o caso dos insetos em ABS (matriz estirênica), comparou-se o valor do parâmetro de Hildebrand para o poliestireno, cujo valor é $9,1 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$, com os valores para dois polímeros disponíveis: o PP (H-301- Braskem) e o PEBD (reciclado) com parâmetros δ iguais a 8,1 e 7,9 $\text{(cal/cm}^3)^{1/2}$ respectivamente, e verificou-

⁶ Extraído de <http://notes.chem.usyd.edu.au/course/fellows/CHEM1401/>. Acesso em 14/01/2004.

⁷ ND = Não Disponível.

se, pela diferença entre os valores, que possivelmente não há afinidade entre esses materiais. Este resultado pode ser confirmado consultando-se a Tabela 17.

Foram então injetadas peças em PEBD e, em seguida, peças em PP. O experimento foi realizado em uma injetora Arburg Allrounder 320S 50T (CIMJECT/LABMAT) e os principais parâmetros de injeção utilizados estão listados na Tabela 19:

A definição desses parâmetros teve como valores iniciais os utilizados por Beal (2002) que injetou peças em insertos fabricados por estereolitografia. Para facilitar a retirada das peças do inserto e diminuir os esforços provocados pela extração, foi utilizado silicone em spray como desmoldante.

Tabela 19 – Parâmetros de injeção para o PEBD e para o PP.

Parâmetros de injeção	PEBD	PP
Pressão de injeção (Bar)	120	120
Pressão de recalque (Bar)	95	100
Tempo de recalque (s)	1	5
Velocidade de injeção (m/s)	0,035	0,036
Temperaturas no cilindro (°C)	195,180,170,160,150	200,195,190,185,180

4.1.3 Resultados e discussões

Este primeiro experimento demonstrou ser possível injetar PEBD e PP em insertos de ABS, sendo que foram injetadas 30 peças em PEBD reciclado e 120 peças em PP. Embora o processo construtivo do inserto gere superfícies com uma textura ranhurada, a ação da temperatura e pressão sobre essas superfícies produziu um efeito “reticulado” nas superfícies das peças injetadas.

No decorrer do experimento foi verificado um gradual desgaste dos insertos nas suas arestas e nas superfícies de contato, que foram se acentuando, até que nas últimas peças injetadas, os insertos apresentavam em suas superfícies regiões com vazios devido ao aumento do espaçamento entre os filetes (trincas). O canal de injeção também ficou avariado apresentando arredondamentos em sua superfície (Figura 35 e Figura 36). Percebe-se, com mais clareza na Figura 36, que apareceram trincas perpendiculares as demais. Isso aconteceu por que a segunda camada, construída com os filetes a 90 graus em relação aos da primeira camada,

teve um aumento do espaçamento entre filetes rompendo os filetes da camada acima.

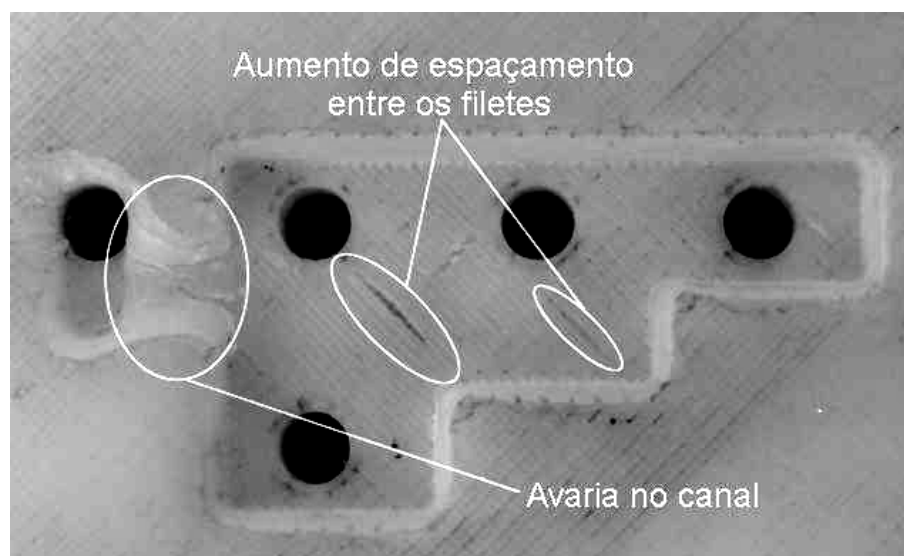


Figura 35 – Aumento do espaçamento entre filetes e avaria no canal no inserto móvel.

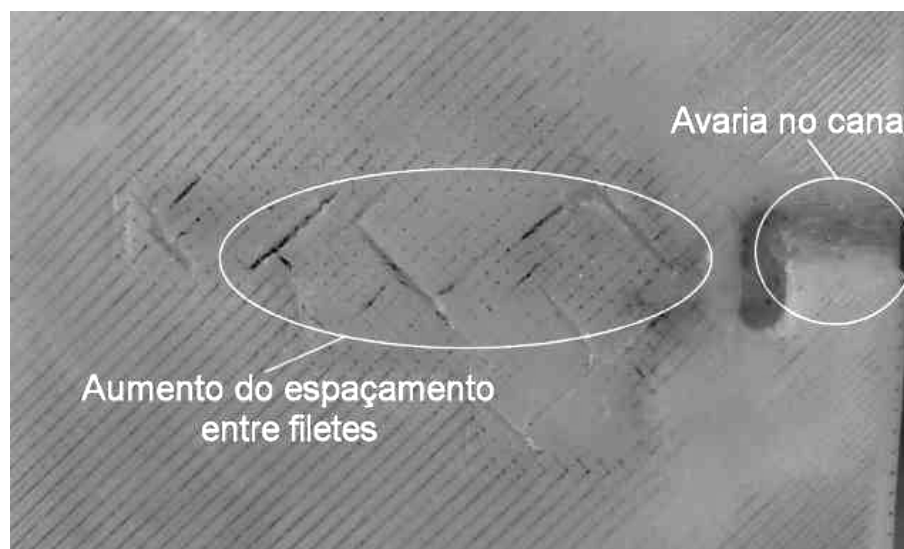


Figura 36 – Aumento do espaçamento entre filetes e avaria no canal no inserto fixo.

Acredita-se que o aumento do espaçamento entre filetes deve ter ocorrido em função dos parâmetros de construção utilizados na fabricação dos insertos. Espera-

se que, com a utilização de parâmetros mais refinados, esse efeito possa ser minimizado.

O experimento seguinte foi planejado levando-se em consideração os resultados supracitados. Para possibilitar a determinação das propriedades mecânicas das peças injetadas a geometria de um corpo de prova foi utilizada.

4.2 Inseto de ABS com Parâmetros de Construção Refinados

4.2.1 Justificativa

Esse experimento foi realizado objetivando injetar peças em PP sob condições controladas de injeção em insertos construídos utilizando parâmetros de construção refinados. Foram também determinadas as propriedades mecânicas das peças injetadas através de ensaios de difração de raios X, tração e de dureza Shore D. Os resultados foram comparados com os valores obtidos a partir de peças injetadas em moldes convencionais. A temperatura do inserto foi monitorada para evitar que o material do inserto atingisse temperaturas próximas a temperatura de transição vítrea da matriz estirênica.

4.2.2 Procedimento

- **Projeto do inserto**

Para a determinação das propriedades mecânicas das peças injetadas foi necessário o projeto de um novo inserto. Foram levantadas as necessidades e restrições para a definição da geometria a ser usada. Para que fosse possível a execução de ensaios de tração foi escolhida a geometria de um corpo de prova. As dimensões do porta-moldes já existente restringiram a escolha da geometria para o corpo de prova de tração normalizado ASTM D 638m tipo IV (Figura 37).

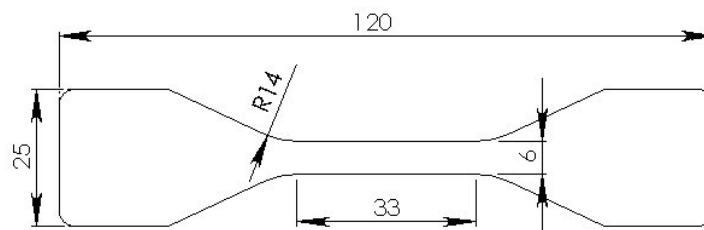


Figura 37 - Geometria do corpo de prova de tração ASTM D 638m tipo IV.

Durante a escolha da melhor concepção, procurou-se a opção que resultasse no menor custo, ou seja, no menor tempo de construção utilizando-se o processo FDM. Foi escolhida a opção cujo inserto seria confeccionado na forma de casca com altura do inserto igual 14 mm. A disponibilidade da máquina FDM 2000 restringiu o material do inserto para o ABS P400. O porta-moldes existente também restringiu a determinação do número e leiaute das cavidades e do tipo e sistema de alimentação. O inserto foi modelado com uma cavidade e com alimentação lateral. As dimensões do ponto de injeção foram determinadas de acordo com a norma ASTM D 638m. O inserto foi projetado prevendo a inclusão de um sistema de refrigeração. A Figura 38 ilustra o modelo geométrico com a concepção final do inserto.

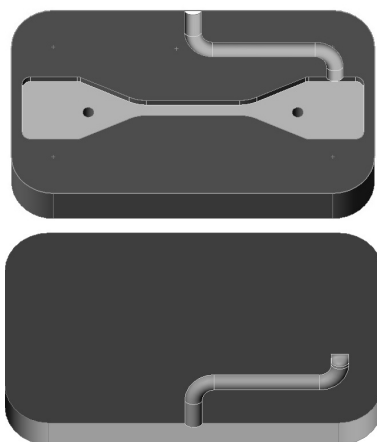


Figura 38 – Concepção final dos insertos para o corpo de prova ASTM D 638m tipo IV.

- **Fabricação e montagem do inserto**

Na fase de fabricação do inserto foram utilizados os parâmetros construtivos refinados definidos no capítulo 3. A Tabela 20 lista os principais parâmetros utilizados no programa *Insight* para a construção dos insertos numa máquina FDM 2000 (o Anexo 5 apresenta a lista completa). O uso desses parâmetros aumentou o tempo de fabricação, pois há maior gasto de material. O tempo de fabricação na máquina foi de 18h06min e 18h50min, para os insertos fixo e móvel respectivamente.

Tabela 20 – Parâmetros de construção refinados.

Parâmetros de Construção	Valores
Espessura de camada	0,178 mm
Largura do contorno	0,305 mm
Largura da varredura (<i>raster</i>)	0,305 mm
Espaçamento (<i>gap</i>)	0,0
Bico	T12

A superfície do inserto fixo recebeu acabamento superficial com lixa d'água 3M® grana 400 para diminuir as marcas superficiais, próprias do processo FDM. Apenas um dos insertos recebeu acabamento para que fossem comparadas às superfícies das peças injetadas retiradas dos insertos com e sem acabamento.

O resultado final do lixamento de superfícies construídas pelo processo FDM pode ser afetado negativamente se houver de um espaçamento entre filetes (*gap* positivo), conforme ilustra a Figura 39. Percebe-se que, com a existência dos espaçamentos, não é possível chegar-se a uma superfície totalmente lisa com o lixamento.

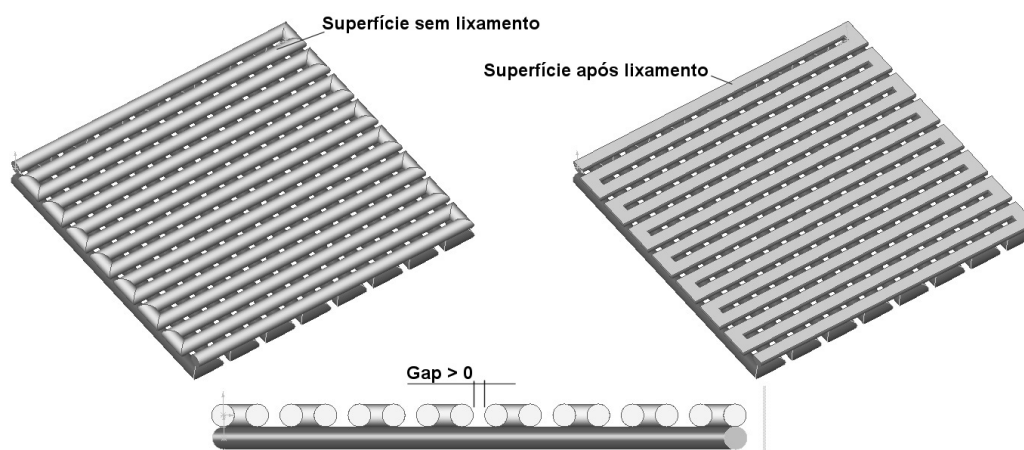


Figura 39 – Ilustração da influência do espaçamento (*gap*) positivo sobre o acabamento das superfícies

A Tabela 20 mostra que nesse experimento foi utilizado um valor de espaçamento nulo visando permitir que o lixamento produzisse melhores resultados na superfície do inserto (Figura 40).

Para que fosse possível monitorar a temperatura do inserto nas proximidades da sua superfície, foi previsto o posicionamento de um termopar do tipo K no centro

do corpo de prova. Os dados foram coletados com a ajuda de um sistema de aquisição de dados TC-08 da *Pico Technology Limited*.

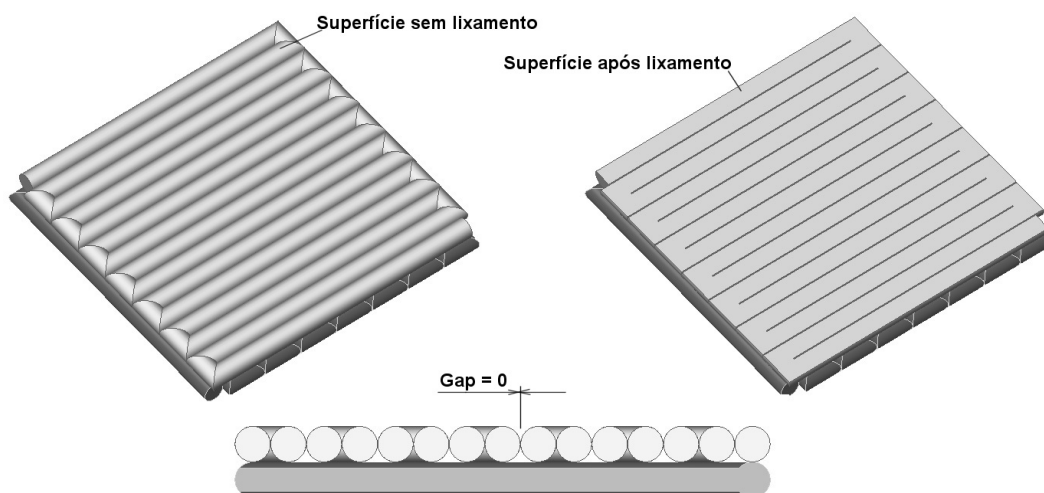


Figura 40 – Ilustração do melhoramento da superfície com a utilização do espaçamento (*gap*) nulo.

O porta-moldes utilizado tem altura igual a 70mm e por essa razão todos os insertos feitos anteriormente em outros trabalhos, em estereolitografia, também utilizavam essa altura. Isso possibilitava o preenchimento da parte traseira fora do porta-moldes mas aumentava o tempo de fabricação. Nesse estudo a concepção escolhida tem 14mm de altura, e essa diminuição implicou em uma modificação no processo de preenchimento da parte posterior. O material de preenchimento (resina à base de poliéster) foi adicionado diretamente na cavidade do porta-moldes sobre o inserto. As desvantagens desse procedimento são: Indisponibilidade do porta-moldes durante o processo de preenchimento e dificuldade na desmontagem e limpeza do porta-moldes. Foi utilizado um agente desmoldante (QZ 5100 – Vântico[®]) nas superfícies do porta-molde para facilitar a retirada do inserto.

A Figura 41 mostra os insertos em ABS e o porta-moldes antes da montagem e a Figura 42 ilustra a parte traseira do porta-moldes depois de preenchida com resina a base de poliéster.

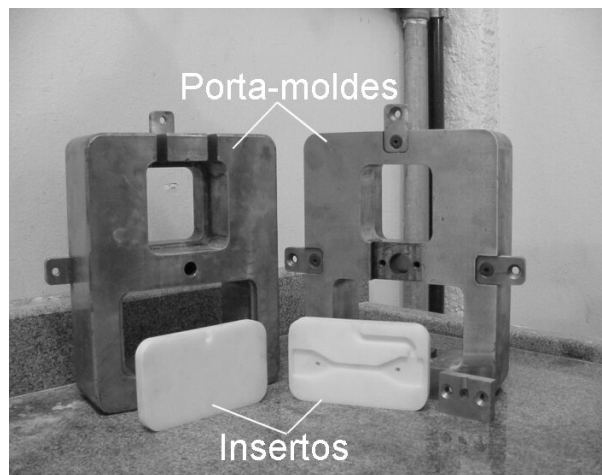


Figura 41 – Insertos do corpo de prova antes da montagem.

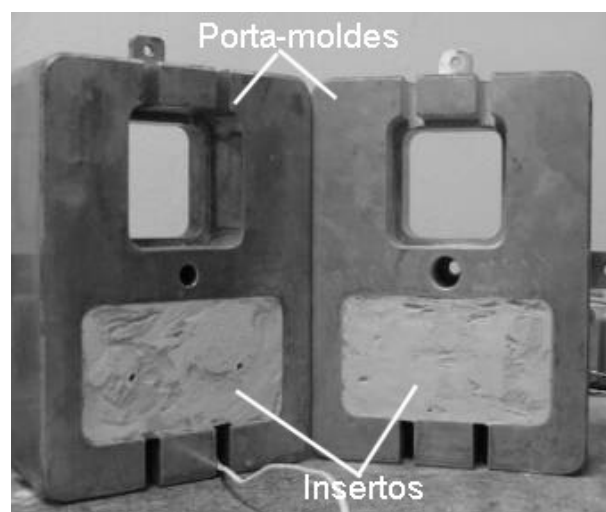


Figura 42 – Vista traseira dos insertsos do corpo de prova preenchidos com resina a base de poliéster no porta molde.

- **Moldagem por injeção**

O experimento foi realizado na injetora Arburg Allrounder 320S 50T. O material escolhido para a injeção dos corpos de prova foi o PP (H301 - Braskem). Esse termoplástico não apresenta afinidade química com o ABS e permite captar as oscilações da taxa de retirada de calor do moldado através da análise das mudanças em sua estrutura cristalina (Lafratta, 2004).

Os ajustes dos parâmetros de injeção foram realizados utilizando-se o “Método de Preenchimento Incompleto” (Barry *et al.*, 1995), também conhecido como “*short shot method*” (Anexo 3). Paralelamente Lafratta (2004) projetou um inserto metálico com a mesma geometria do corpo de prova. Esse inserto foi usado nesse trabalho para que as peças injetadas na forma convencional fossem usadas como referência.

Injeção do PP a 170°C (T1)

Numa primeira etapa foi utilizada uma temperatura mais baixa para a injeção do PP, objetivando aumentar a vida do inserto em ABS. Os principais parâmetros utilizados durante a injeção nos insertos de ABS e aço são listados na Tabela 21.

Tabela 21 – Parâmetros de injeção para o PP (1º etapa).

Parâmetros de injeção	Inserto de ABS	Inserto de aço
Pressão de injeção (Bar)	270	310
Pressão de recalque (Bar)	160	155
Tempo de recalque (s)	7	12
Velocidade de injeção (m/s)	0,12	0,11
Temperaturas no cilindro (°C)	170, 165, 160, 155, 150	180, 175, 165, 160, 155

A temperatura medida na superfície do inserto foi controlada para que não fossem atingidos valores acima dos 50°C. A refrigeração foi feita com jatos de ar comprimido sobre a superfície do inserto. Houve a necessidade de lixamento nas paredes da cavidade para aumentar o ângulo de saída da peça e facilitar sua extração. Foi utilizado o silicone em spray como desmoldante.

Depois de injetadas foram selecionadas 5 peças de cada experimento para os ensaios de difração de raios X. O equipamento utilizado foi o difratômetro de raios X Philips modelo X'PERT MPD com radiação $K\alpha$ do cobre. Este ensaio permite a determinação do grau de cristalinidade do polímero e foi realizado nas duas regiões extremas do corpo de prova em PP (pontos 1 a 9 e 17 a 25 - Figura 43).

As peças foram submetidas a ensaios de dureza em um durômetro WULTEST SD 300, com resolução de um dígito onde foram analisados 25 pontos em cada amostra (Figura 43).

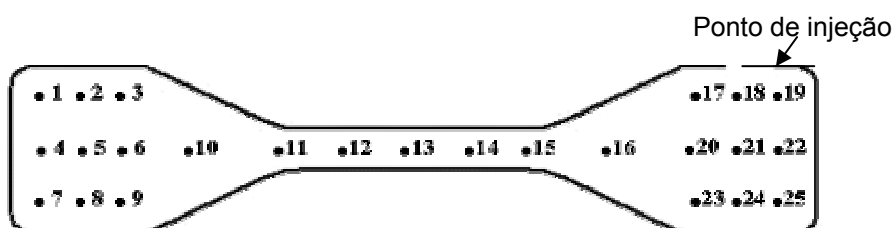


Figura 43 – Localização dos pontos submetidos ao ensaio de dureza Shore D.

Foram também realizados ensaios de tração, utilizando um equipamento EMIC, (temperatura de ensaio=20°C e velocidade de deformação=5mm/minuto) nos corpos de prova injetados em insertos de ABS e aço para a determinação e comparação dos seus módulos de elasticidade e tensões de resistência a tração.

Injeção do PP a 205°C (T2)

Em função dos resultados obtidos na injeção de peças em PP a 170°C, um novo inserto foi confeccionado para utilização de temperaturas mais altas no processo. Para melhorar o controle da temperatura do inserto acrescentou-se mais um termopar no canal.

Outro melhoramento acrescentado nesse experimento foi na fase de preenchimento do inserto. A resina a base de poliéster foi utilizada inicialmente para exercer um papel estrutural no inserto. No entanto, também é desejável que o material de preenchimento auxilie na extração de calor da superfície do inserto. A utilização de resinas a base de epóxi com cargas metálicas, embora apresentem aproximadamente um custo sete vezes superior em relação às resinas a base de poliéster, são mais adequadas para esse propósito. Foi utilizada a resina de epóxi com carga de alumínio RenCast 436 da Huntsman[®] para preenchimento da primeira camada (região de contato com o inserto) e a resina a base de poliéster (cola plástica Anjo) no preenchimento da segunda e última camada.

Durante o preparo da resina de epóxi deve-se utilizar uma proporção de 100 para 6 em peso de resina e de endurecedor, respectivamente. Em seguida é preciso misturar bem para que o processo de cura seja eficiente. Nesse experimento aconteceu um problema na fase de mistura da resina com o endurecedor. A mistura manual dos componentes não foi suficiente para garantir a homogeneidade dos elementos da resina e isso ocasionou o não endurecimento da resina em regiões internas do preenchimento. Esse fato só foi percebido durante o processo de injeção quando o esforço provocado pela pressão de injeção deformou o inserto de ABS inutilizando-o. O processo foi melhorado com a utilização de um misturador elétrico rotativo. O fabricante da resina recomenda que após endurecer a temperatura ambiente por aproximadamente 24 horas, é recomendável que seja realizada uma pós-cura térmica de 2 horas a 70 °C, somada a 2 horas a 90°C, 2 horas a 120 °C e,

por fim, de 8 a 16 horas a 150 °C. Este procedimento inviabilizaria seu uso no preenchimento de insertos de ABS, pois as temperaturas sugeridas ultrapassariam a de temperatura de transição vítrea da matriz estirênica. (~104°C). Foram então construídos corpos de prova para realização de ensaios de dureza Shore D em amostras produzidas com e sem pós-cura para verificar se a dureza é muito influenciada pela ausência de pós-cura.

Os demais procedimentos da primeira etapa (injeção a 170°C) foram repetidos sendo que os principais parâmetros de injeção utilizados estão listados na Tabela 22. Foram também realizados ensaios de difração de raios X e dureza Shore D nas amostras dos corpos de prova injetados.

Tabela 22 - Parâmetros de injeção para o PP (2º etapa)

Parâmetros de injeção	Inserto de ABS	Inserto de aço
Pressão de injeção (Bar)	210	250
Pressão de recalque (Bar)	120	200
Tempo de recalque (s)	15	30
Velocidade de injeção (m/s)	0,15	0,05
Temperaturas no cilindro (°C)	200, 195, 190, 185, 180	205, 200, 195, 190, 185

4.2.3 Resultados e discussões

Esse experimento comprovou que a utilização dos parâmetros construtivos refinados melhorou as características mecânicas do inserto resolvendo o problema do aumento do espaçamento entre filetes (trincas) na superfície.

Para ilustrar a diferença provocada pelo uso de diferentes parâmetros construtivos, foram realizadas micrografias em dois corpos de prova. A Figura 44 mostra micrografias de duas superfícies: uma construída com parâmetros de construção padrão (A) e outra com os parâmetros refinados (B).

Observou-se que o corpo de prova fabricado com o parâmetro padrão apresentou 0,485mm para a espessura do filete, bem próximo do valor configurado (0,508 mm), enquanto que o inserto construído com parâmetros refinados apresentou 0,324mm (valor configurado=0,305mm) Foi verificado também que o espaçamento entre filetes adjacentes de 0,069mm, indicado na micrografia A da Figura 44, torna essa região mais suscetível ao aumento do espaçamento entre

filetes do que a segunda, onde esse espaçamento não existe e conseqüentemente permite uma adesão lateral entre os filetes.

Verificou-se também que a utilização dos parâmetros refinados causou um aumento da vida dos insertos, pois foram injetadas 250 peças sem o aparecimento de trincas na sua superfície. A Figura 45 ilustra um corpo de prova em PP injetado no inserto em ABS.

A utilização de acabamento com lixa nas superfícies do inserto apresentou resultados positivos melhorando o aspecto da superfície dos corpos de prova. Isso foi observado no lado que recebeu acabamento. No entanto, foi verificado no decorrer do experimento que a primeira camada lixada foi se moldando na segunda camada da superfície do inserto fazendo com que as marcas inerentes ao processo FDM reaparecessem de forma suavizada. Esse efeito ocorreu devido a ação da pressão e temperatura sobre a superfície do inserto.

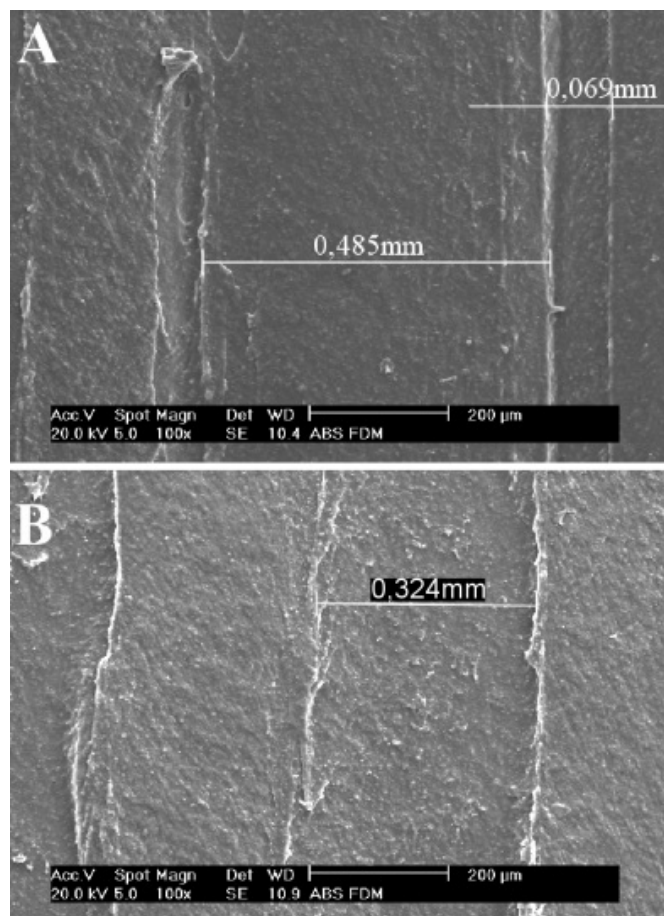


Figura 44 - Micrografias: (A) Parâmetro de construção padrão - (B) Parâmetro de construção refinado.

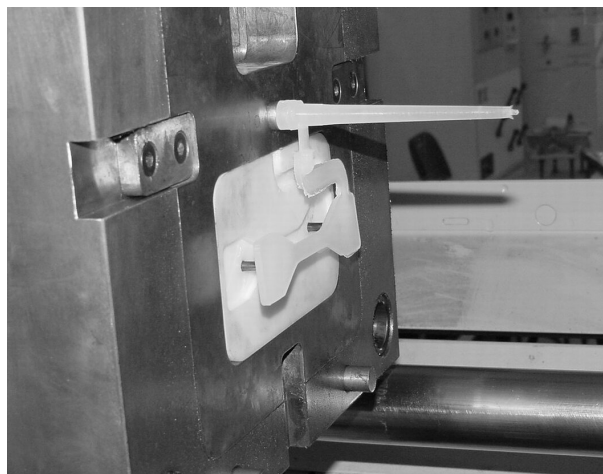


Figura 45 – Corpo de prova em PP injetado no inserto de ABS.

O uso do método de preenchimento incompleto (*short shot method*) durante a determinação dos parâmetros de injeção não se mostrou adequado para insertos em ABS, pois são utilizadas pressões muito altas, sobrecarregando o inserto já na fase de otimização dos parâmetros de injeção (*tryout*).

O processo de injeção foi finalizado quando ocorreu delaminação na superfície do canal de injeção devido, provavelmente, a sua geometria semi-circular não permitir boa adesão entre as camadas. Da mesma forma que no experimento anterior, ocorreu uma deformação nos cantos do canal (Figura 46), que foi consequência da associação do desgaste por atrito com a alta temperatura na região. Finalmente, observou-se uma deformação por fluxo de material nas arestas da cavidade do corpo de prova (Figura 47).

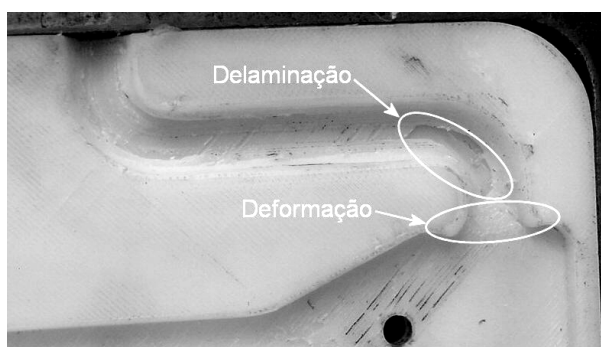


Figura 46 – Delaminação e arredondamento no canal de injeção.

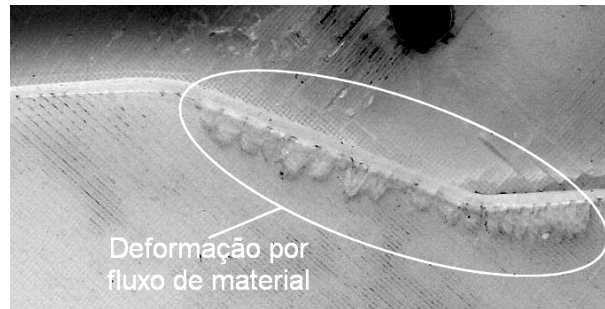


Figura 47 – Desgaste nas arestas da cavidade do inserto

O monitoramento da temperatura permitiu controlar os valores na superfície do inserto para que não atingisse patamares próximos a temperatura de transição vítrea da matriz estirênica. A Figura 48 mostra que, para a etapa 1 de injeção (temperatura de injeção de 170°C), os termopares mediram valores máximos em torno de 40°C na região central da cavidade.

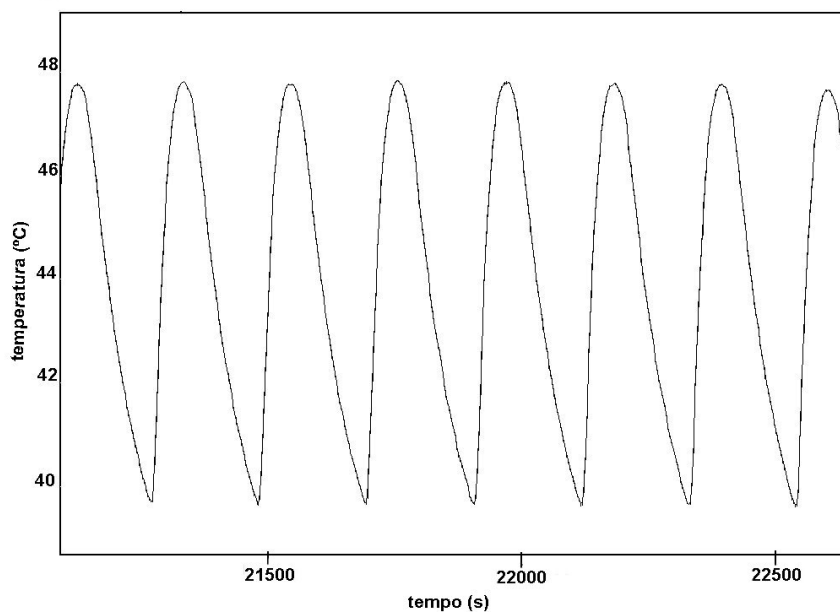


Figura 48 – Monitoramento da temperatura na superfície do inserto.

Na avaliação dos problemas encontrados durante o preenchimento da parte traseira do inserto, ficou constatado, pelos ensaios de dureza Shore D em amostras de epóxi, que a pós-cura térmica não tem grande influência sobre a dureza da resina. A faixa de dureza fornecida pelo fabricante para amostras com pós-cura é de 85 a 90 Shore D. A Tabela 23 ilustra que a média dos valores de dureza está dentro dessa faixa para corpos de prova com e sem pós-cura térmica.

Tabela 23 - Dureza corpos de prova em epoxi RenCast 436 (Huntsman®).

Nº amostra	1	2	3	4	5	Média	D.P.
CP sem pós-cura	85	85	86	86	84	85	0,84
CP com pós-cura	84	85	84	86	86	85	0,89

O uso de um misturador elétrico possibilitou a homogeneização da mistura evitando o risco de regiões menos rígidas após a cura. A troca da resina de preenchimento por outra de maior eficiência térmica pode ser melhorada com o projeto de um sistema de refrigeração no inserto.

Os ensaios de difração de raios X permitiram mostrar graficamente uma pequena diferença de cristalinidade entre os corpos de prova injetados nos moldes de aço e de ABS, como pode ser observado nos difratogramas da Figura 49.

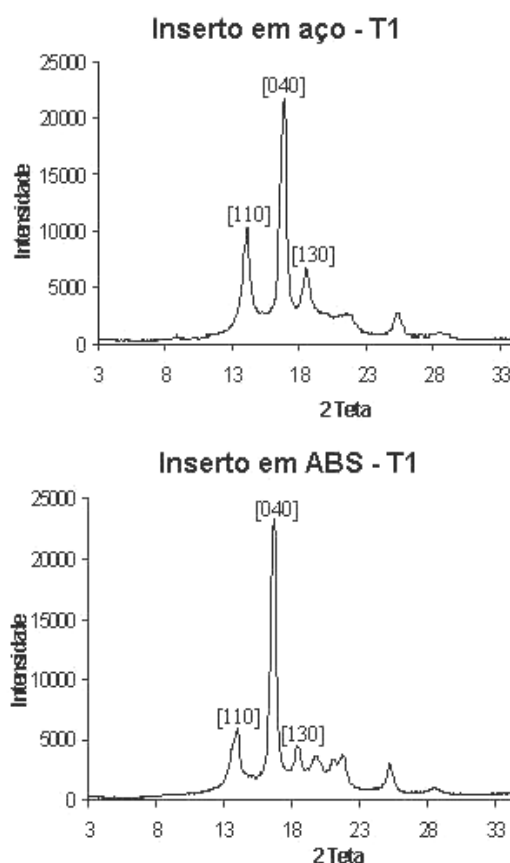


Figura 49 – Difratogramas de raios X das amostras em PP injetadas em insertos de aço e ABS nas temperaturas de injeção T1.

Foram também injetados corpos de prova utilizando temperaturas de trabalho maiores, entre 200 e 210°C (T2) e nos ensaios de difração de raios X foram obtidos os difratogramas mostrados na Figura 50. Neste caso a diferença entre as duas estruturas ficou mais evidente com as amostras injetadas em moldes metálicos apresentando uma maior região amorfa.

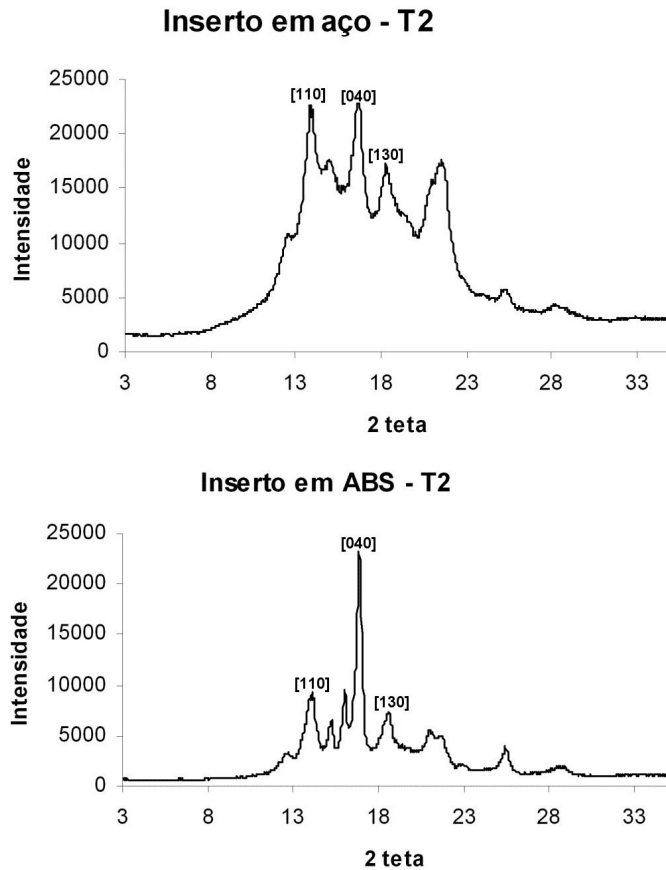


Figura 50 – Difratogramas de raios X das amostras obtidas em insertos de aço e ABS nas temperaturas de injeção T2.

O ensaio de dureza Shore D foi realizado para comparar as peças injetadas em insertos em ABS com as injetadas em insertos de aço. Os valores de dureza dos corpos de prova injetados em PP são mostrados na Tabela 24 seguindo o mapeamento de pontos ilustrado na Figura 43.

Tabela 24 – Dureza Shore D dos corpos de prova.

Temp.	Inserito	Pontos																										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Méd	D.P.
170°C	ABS	66	68	70	68	70	70	67	69	70	71	70	69	69	68	68	69	68	66	66	70	70	66	68	66	65	68	1,70
180°C	Aço	67	68	69	68	70	71	68	69	69	70	70	70	70	71	70	70	70	70	69	70	70	69	69	69	69	69	0,96
200°C	ABS	69	71	71	69	73	72	68	69	69	70	72	70	68	72	72	72	67	66	69	70	70	67	70	70	67	70	1,86
205°C	Aço	70	71	72	71	72	72	70	71	71	71	72	73	73	73	73	72	72	73	73	72	71	72	71	71	70	72	0,99

A Tabela 24 mostra que as peças injetadas nos insertos de ABS e de aço utilizando temperaturas menores de processo apresentaram médias de dureza iguais a 68 e 69 Shore D respectivamente, e as peças injetadas com temperaturas maiores apresentaram durezas médias de 70 e 72 Shore D. A variação de dureza entre os pontos foi maior nas peças injetadas em insertos de ABS. As médias dos valores de dureza dos corpos de prova injetados em insertos de ABS são um pouco inferiores aos valores comumente encontrados para peças injetadas em PP (71 a 73 Shore D).

Os ensaios de tração mostraram que o limite de resistência à tração e o módulo de elasticidade, para os corpos de prova injetados nos insertos de ABS e aço, tiveram valores bastante próximos (Figura 51) sugerindo não existir diferenças marcantes nas propriedades mecânicas das peças injetadas em insertos de ABS se comparadas às injetadas em insertos de aço. Observou-se que as regiões de escoamento tiveram comportamentos diferenciados, este fato pode estar ligado a diferença de cristalinidade do PP detectada nas análises de difração de raios X. Os valores médios (para 6 medições) de módulo de elasticidade e de resistência a tração estão listados na Tabela 25.

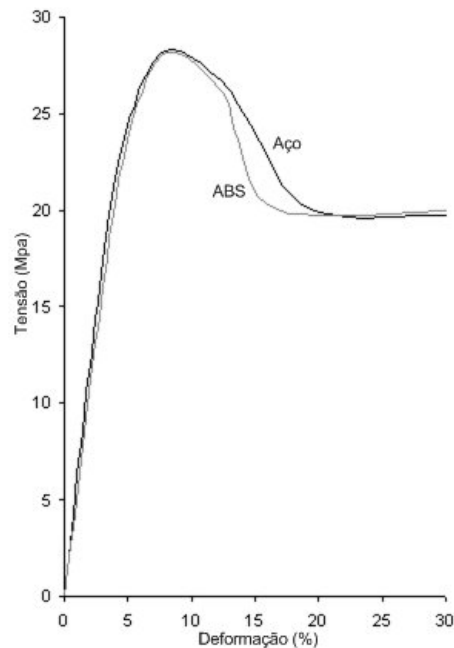


Figura 51 – Diagrama tensão/deformação de corpos de prova em PP injetados em insertos de aço e de ABS a 170°C.

Tabela 25 - Valores médios de módulo de elasticidade e resistência a tração para corpos de prova em PP injetados em insertos de aço e ABS.

Corpo de prova em PP		Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência a tração (MPa)
Inserito de aço	Valor médio	698	27,8
	Desvio padrão	29	0,27
Inserito de ABS	Valor médio	641	27,5
	Desvio padrão	20	0,25

Com esse estudo foi possível comprovar a melhora das propriedades mecânicas do inserto com o uso de parâmetros construtivos mais refinados. O uso desses parâmetros não dispensa o acabamento das superfícies com lixa para eliminar as marcas inerentes do processo. Ficou evidenciada que a ação combinada da temperatura e pressão de injeção sobre as superfícies dos insertos fazem reaparecer, de forma suavizada, essas marcas, pela moldagem da primeira camada lixada sobre a segunda camada. Esse efeito pode ser considerado como uma das limitações do uso desses insertos para moldagem por injeção. Uma alternativa é a utilização de recobrimentos metálicos ou poliméricos para reforçar a superfície de contato com o moldado e, adicionalmente, resolver o problema de afinidade com outros polímeros.

O uso do método de preenchimento incompleto durante a determinação dos parâmetros de injeção (*tryout*) não se mostrou adequado para o uso em insertos em ABS, pois utiliza pressões muito altas no início do processo sobrecarregando o inserto.

Os ensaios realizados em corpos de prova de PP injetados em ABS revelaram pequenas diferenças de orientação e de cristalinidade, no entanto suas propriedades mecânicas não foram afetadas, sendo estas similares às injetadas em moldes convencionais, conforme demonstraram os ensaios de dureza Shore D e de tração. Foi verificado que a pós-cura térmica da resina de epóxi não é necessária para garantir a resistência da resina de preenchimento do inserto.

4.3 Insertos de ABS com sistema de refrigeração

4.3.1 Justificativa

O projeto do sistema de refrigeração de um molde visa diminuir o tempo que a peça leva para solidificar-se e ser desmoldada e minimizar a existência de diferentes taxas de resfriamento no molde. Para que isso ocorra procura-se otimizar a velocidade da troca térmica entre a peça injetada e o molde (Menges, 1993). Dessa forma se ganha em produtividade e é possível evitar a perda de qualidade das peças injetadas por problemas como contração, brilho, linhas de solda e tensões diferenciadas na peça. A quantidade de calor que deve ser extraída depende da temperatura do material fundido, temperatura de extração da peça e calor específico do material. Usualmente são projetados canais para circulação de um fluido refrigerante, sendo que a sua localização tem grande influência sobre a qualidade das peças injetadas (Berins, 1991).

O uso de insertos poliméricos exige um maior controle de temperatura durante o processo de moldagem por injeção, sendo que a temperatura dos insertos precisa ficar abaixo da temperatura de amolecimento do seu material para que a resistência mecânica não seja comprometida. A prática mais comum, utilizada em insertos rápidos construídos na forma de casca, é o uso de tubos de cobre para circulação de um líquido refrigerante. A eficácia desse sistema de refrigeração dependerá de vários fatores, como: distância dos tubos de cobre até superfície do inserto, temperatura, vazão e propriedades do líquido refrigerante, condutividade

térmica dos materiais empregados e diâmetro, quantidade e arranjo dos tubos de cobre dentro do inserto.

Os trabalhos analisados, entre eles Geiger & Özel (2001), Ahrens *et al.* (2001), Lafratta (2004) e Barlow *et al.* (1996), utilizaram água a temperatura ambiente como fluido refrigerante, fato que instigou a investigação, nesse trabalho, da utilização de água em temperaturas mais baixas para a refrigeração. Dessa forma, esse experimento foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito da refrigeração com circulação de água a temperatura abaixo da ambiente em insertos construídos em material polimérico.

4.3.2 Procedimento

O inserto de um corpo de prova de tração normalizado ASTM D 638m tipo IV, apresentado no experimento anterior foi utilizado para receber o sistema de refrigeração. Foi adotada a solução que utiliza tubos de cobre encostados sobre a parte interna do inserto. A seleção dos tubos levou em conta a sua disponibilidade no mercado e a facilidade de conformação no espaço disponível no inserto. Foram utilizados tubos de cobre com diâmetro externo de 3/16" (4,76mm) e parede de 1mm. A disposição dos tubos na parte interna do inserto foi analisada com o auxílio de um software de CAE (Moldflow[®]), que permitiu escolher entre três concepções (Figura 52), utilizadas em outros trabalhos, aquela que produzisse a melhor troca térmica.

Como objetivo era determinar qual a melhor concepção, não foi necessário diferenciar o material da resina de preenchimento do material do inserto. Isso permitiu simplificações na modelagem do sistema inserto, tubos e resina de preenchimento no Moldflow[®].

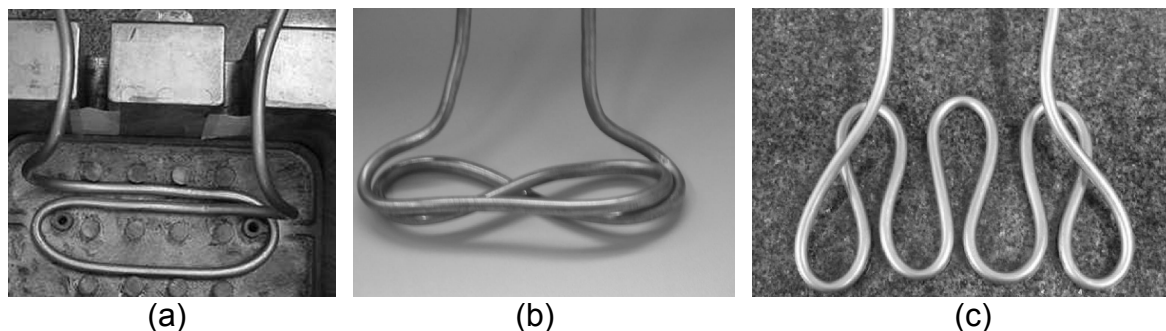


Figura 52 – Alternativas de concepções para os tubos de cobre: (a) Concepção em zero; (b) Concepção em oito; (c) Concepção em serpentina.

Um inserto em ABS P-400 foi construído na forma de casca com 2mm de espessura e foi utilizada uma resina de epóxi com carga de alumínio RenCast 436 da Huntsman® para o preenchimento da primeira e segunda camadas e no restante foi utilizada uma resina a base de poliéster. A colocação dos tubos de cobre foi realizada em paralelo com o preenchimento da parte posterior do inserto. Para evitar o aparecimento de regiões com vazios entre o tubo e o inserto, foi adotado o seguinte procedimento: Depositou-se uma pequena camada de resina sobre o inserto, depois os tubos de cobre foram posicionados de forma a encostar na superfície traseira do inserto e em seguida foi adicionada uma segunda camada de resina, conforme ilustra a Figura 53.

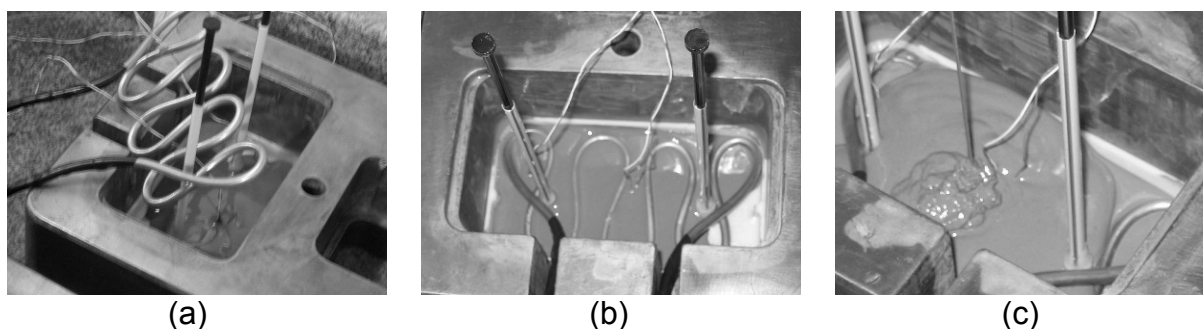


Figura 53 – Procedimento inicial de preenchimento da parte traseira do inserto: (a) Primeira camada; (b) Posicionamento dos tubos; (c) Segunda camada.

O controle de temperatura do inserto foi possível com o posicionamento de dois termopares (tipo K) instalados no canal de injeção e no ponto central da superfície da cavidade.

Todos os trabalhos analisados que utilizavam a refrigeração com circulação de água, o fizeram com o fluido a temperatura ambiente. Para melhorar o processo de extração de calor, esse experimento utilizou a circulação de água com temperaturas mais baixas obtidas com o uso de um banho termocriostático modelo MQBTC99-20 (Microquímica Equipamentos Ltda). Inicialmente houve a preocupação de se usar temperaturas que evitassem condensação de água sobre a cavidade do inserto. Sabendo-se a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar e com o auxílio de uma carta psicrométrica, é possível determinar qual a temperatura mínima para que não ocorra a condensação.

Esse estudo analisou o efeito do uso de um sistema de refrigeração de água a baixas temperaturas sobre o ciclo de injeção e sobre a temperatura máxima na superfície do inserto medida pelo termopar. Para que os insertos fixo e móvel

recebessem água a mesma temperatura foi utilizada uma conexão “Y” na entrada do fluido refrigerante. A vazão do fluido foi de aproximadamente 2 litros por minuto para cada inserto. Conforme recomendação do trabalho de Saurkar *et al.* (1999), o circuito foi montado de forma que a região mais quente do inserto recebesse a água na temperatura mais fria, visando uma maior uniformidade na temperatura do inserto.

A análise foi dividida em duas partes: A primeira considerou o processo de injeção em duas situações: Sem refrigeração e com refrigeração (água a temperatura de 17°C). Nesse experimento foi também testada a injeção de peças em POM (Celcon M90-45H - Ticona). Os valores do parâmetro de Hildebrand para o POM e para o estireno são $11,1 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ e $9,1 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ respectivamente, mostrando uma baixa afinidade entre esses materiais. Os principais parâmetros de injeção utilizados estão listados na Tabela 26.

Tabela 26 – Parâmetros de injeção utilizados na injeção de peças em POM e PP.

Parâmetros de Injeção	POM (M90-45H)	PP (PH 1310)
Pressão de injeção (Bar)	250	200
Pressão de recalque (Bar)	200	150
Tempo de recalque (s)	11	16
Velocidade de injeção (m/s)	0,05	0,15
Temperaturas no cilindro (°C)	205, 200, 195, 190, 185	200, 195, 190, 185, 180
Temperatura do inserto (°C)	20	30

A segunda parte do experimento foi feita em um inserto de PC com as mesmas características do sistema de refrigeração utilizado anteriormente. Nesse estudo foi considerada a influência da redução da temperatura da água sobre o ciclo de injeção e sobre a temperatura máxima, medida por um termopar, no canal do inserto. A temperatura da água variou de dois em dois graus a partir de 24°C até 10°C, sendo que em cada temperatura foram injetadas 7 peças em PP (PH-1310 - Ipiranga) com os principais parâmetros de injeção listados na Tabela 26. Os parâmetros de Hildebrand para o PC e para o PP são $9,8 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ e $8,1 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ respectivamente, denotando também pouca afinidade entre esse dois materiais.

4.3.3 Resultados e discussões

Esse experimento avaliou um sistema de refrigeração para insertos fabricados pelo processo FDM de prototipagem rápida. Inicialmente foi feita uma análise de refrigeração utilizando o programa CAE Moldflow[®] para determinar, entre três concepções, qual seria a mais eficiente termicamente. Os resultados, apresentados na Figura 54, mostram que a concepção em serpentina foi a que apresentou melhor uniformidade na extração de calor do inserto, pois manteve todas as temperaturas na faixa entre 27 e 47°C. Para as concepções em oito e em zero a faixa foi de 27 a 57°C.

Para verificar se a utilização de um sistema de refrigeração com água a temperatura abaixo da ambiente pode melhorar o desempenho de um inserto fabricado em material polimérico, a concepção em serpentina foi montada em um inserto em ABS. O experimento foi realizado inicialmente com a injeção de corpos de prova em POM.

O efeito da utilização de um sistema de refrigeração com água gelada é verificado logo que a circulação de água no inserto é acionada. A Figura 55 mostra que antes da circulação da água o termopar indicava uma temperatura na superfície do inserto de 29,7°C e a partir do início da circulação de água à 17°C, esse valor foi decrescendo até 19,5°C, quando se iniciou o processo de injeção. O fato da injeção iniciar com o inserto a temperaturas mais baixas permite que suas temperaturas máximas sejam reduzidas, poupando-o termicamente.

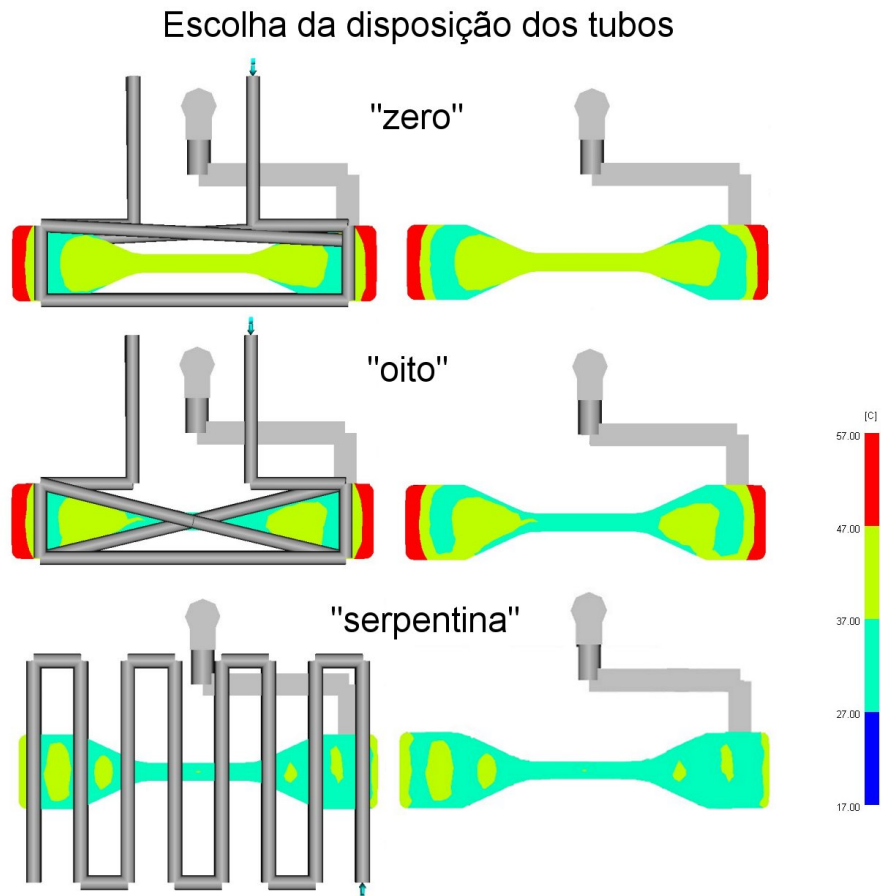


Figura 54 – Análise de distribuição de temperatura para três disposições de tubos.

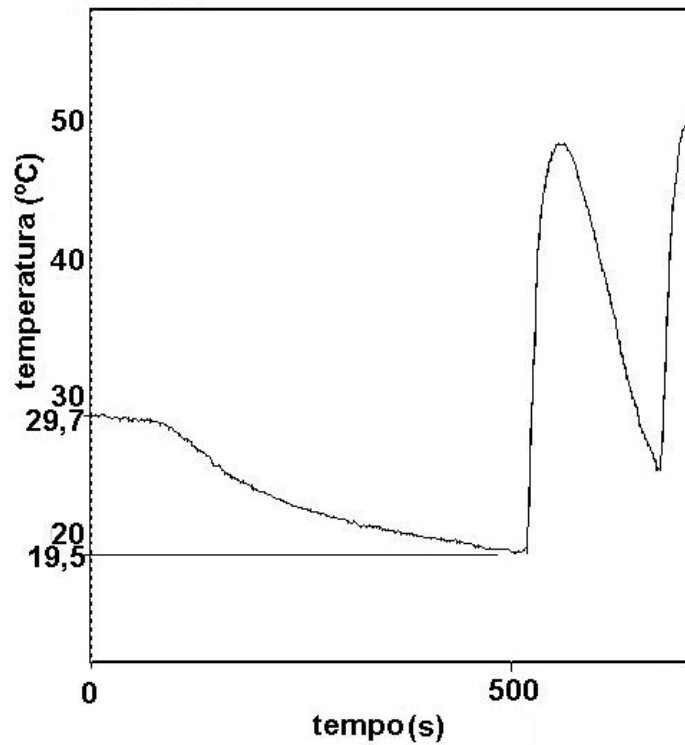


Figura 55 – Gráfico representativo do início da refrigeração do inserto.

Durante o processo de injeção de corpos de prova em POM, a temperatura foi monitorada para duas situações: Inserto com e sem refrigeração. Para que isso fosse possível foi estabelecido um valor de temperatura inicial do inserto acima da ambiente (30°C). A Figura 56 mostra que, para o caso sem refrigeração, o tempo de ciclo foi de 6,8 minutos e a temperatura máxima no centro da peça (0,5 mm da superfície) medida pelo termopar foi de 57,7°C.

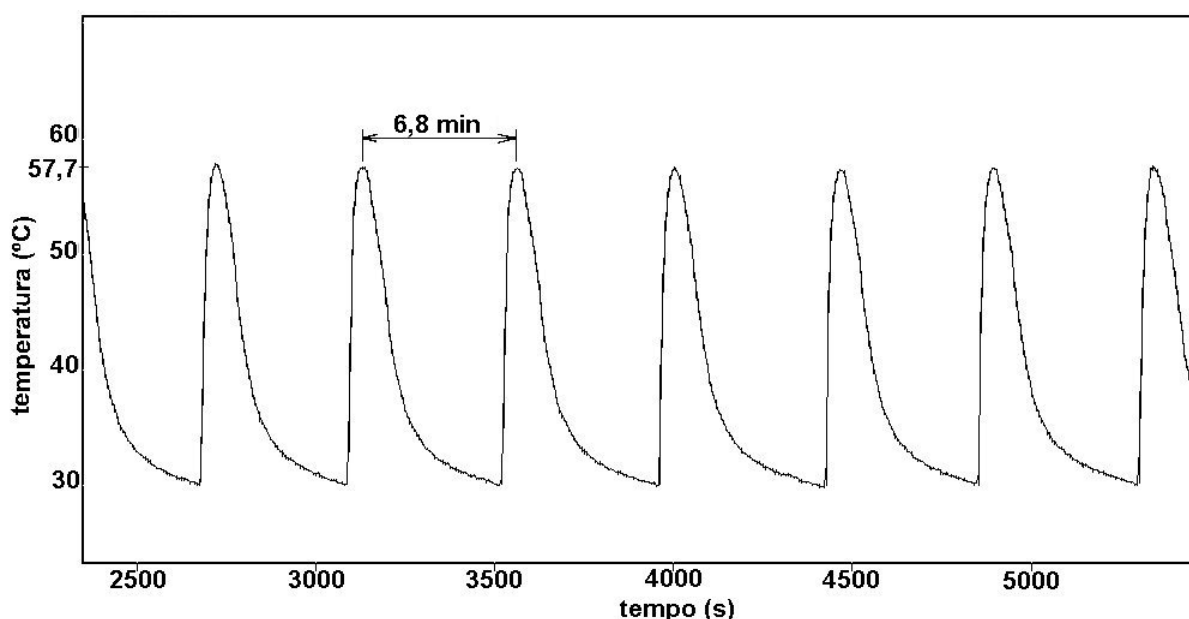


Figura 56 – Perfil da variação de temperatura para inserto sem refrigeração.

Para o caso com refrigeração (água gelada à 17°C) o tempo de ciclo foi reduzido para 2,28 min e a temperatura máxima reduziu para 53,9°C (Figura 57). Comparando os resultados verifica-se um ganho de 2,4 vezes no ciclo de injeção e uma redução de 3,8°C na temperatura máxima medida pelo termopar.

Os resultados comprovam que, apesar da baixa condutividade térmica do material do inserto, a utilização de sistemas de refrigeração em moldes rápidos diminui substancialmente o tempo de ciclo e ainda garante valores mais baixos de temperaturas no inserto.

Para esse estudo foram injetadas 20 peças de POM. O processo de injeção foi finalizado quando o inserto apresentou uma falha na entrada do canal de injeção.

Anteriormente haviam sido injetadas 50 peças em PP e 20 peças em PEAD sem afetar essa região.

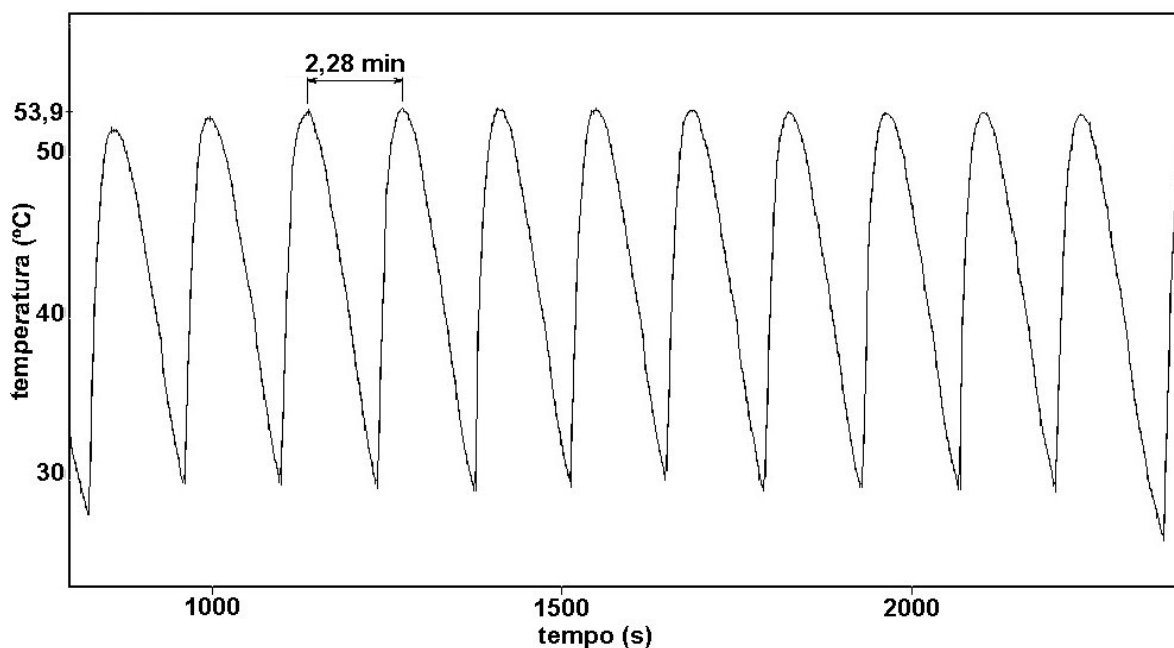


Figura 57 – Perfil da variação de temperatura para inserto com refrigeração.

O outro estudo foi realizado para avaliar a influência da redução da temperatura da água sobre o ciclo de injeção e sobre a temperatura máxima no canal do inserto medida por um termopar. A temperatura da água variou de dois em dois graus a partir de 24°C até 10°C, sendo que em cada temperatura foram injetadas 7 peças em PP num inserto de PC. Os resultados para o ciclo de injeção são apresentados na Figura 58.

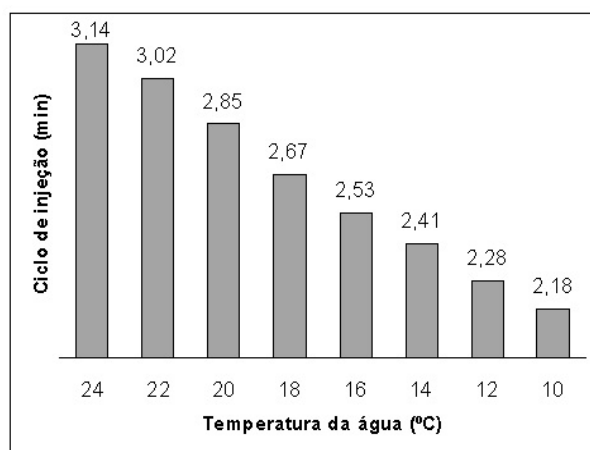


Figura 58 – Influência da temperatura da água sobre o tempo de ciclo de injeção.

Se forem analisados os valores extremos (24°C e 10°C), os valores medidos revelaram um ganho de 44% no tempo de ciclo e que, por exemplo, numa produção de 200 peças, representariam um ganho de 3,2 horas. Os resultados para temperatura máxima no canal do inserto são apresentados na Figura 59. Observa-se uma redução de 2,7 graus entre os valores extremos e pode-se afirmar que isso representa uma melhora no processo visto que permite um maior distanciamento da temperatura de amolecimento do material do inserto.

Os resultados encontrados permitem afirmar que o uso de água gelada diminui o ciclo de injeção e diminui o efeito da temperatura sobre o inserto. A diminuição do ciclo de injeção em insertos poliméricos é importante, pois além do ganho em produtividade evita uma maior degradação do material que está aquecido e preparado na injetora para a próxima peça a ser moldada (Vandresem, 2003).

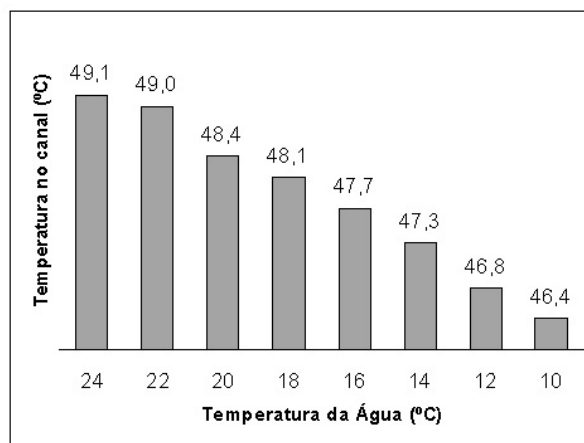


Figura 59 - Influência da temperatura da água sobre a temperatura máxima no canal de injeção.

Embora os resultados mostrem que o uso de água gelada seja uma boa alternativa para a refrigeração de insertos, é importante que seja feito um estudo sobre o efeito que o uso dessas temperaturas podem causar nas propriedades das peças injetadas. Vale salientar que dependendo da temperatura da água utilizada e das condições climáticas, pode ocorrer condensação de água sobre a superfície do inserto, que pode resultar em defeitos na peça injetada.

4.4 Inserto de ABS do tipo macho/fêmea

4.4.1 Justificativa

As duas geometrias utilizadas nos experimentos anteriores não permitiram uma análise sobre o efeito do processo de injeção em insertos poliméricos do tipo macho/fêmea. Este estudo utilizará uma geometria com esta característica para avaliar seu desempenho na injeção de PP e PA, principalmente na fase de extração da peça. A geometria escolhida, ilustrada na Figura 60, foi modificada a partir da utilizada anteriormente em trabalhos envolvendo insertos em estereolitografia (Salmoria *et al.*, 2003, Gonçalves, 2003, Lencina, 2004).

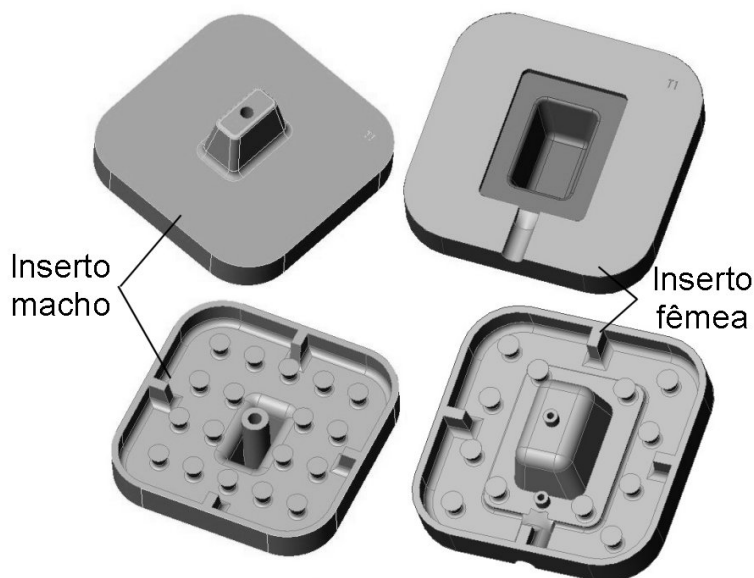


Figura 60 – Geometria do inserto tipo macho/fêmea.

4.4.2 Procedimento

A escolha de uma geometria já utilizada em outros trabalhos simplificou as fases do projeto do inserto. Da mesma forma que nos insertos do corpo de prova, a altura foi reduzida para diminuir o tempo de fabricação. Além disso, o inserto móvel (parte macho) foi modificado para eliminar uma região maciça (Figura 61) e permitir melhor troca de calor com a resina de preenchimento.

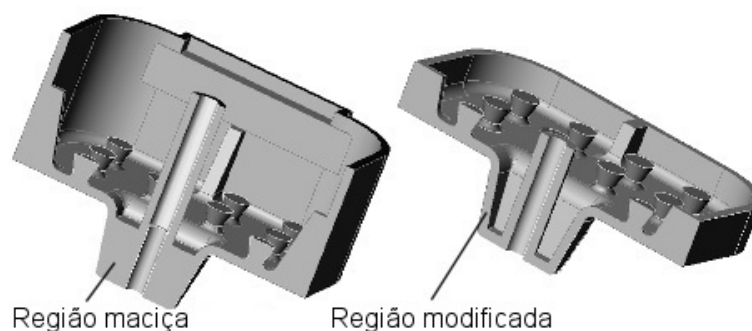


Figura 61 – Modelos geométricos dos insertos antes e depois das modificações.

O inserto móvel teve outra particularidade na escolha da sua disposição na máquina de prototipagem rápida. Para garantir uma maior resistência na direção da extração da peça, o inserto foi construído na vertical (Figura 62). O tempo de construção desse inserto foi de 9h10min (caso fosse construído na horizontal seria de 7h08min). O inserto fixo (parte fêmea) foi construído na horizontal com tempo de fabricação igual a 5h28min. Os parâmetros de construção foram os mesmos utilizados para a construção do inserto do corpo de prova (Tabela 20).

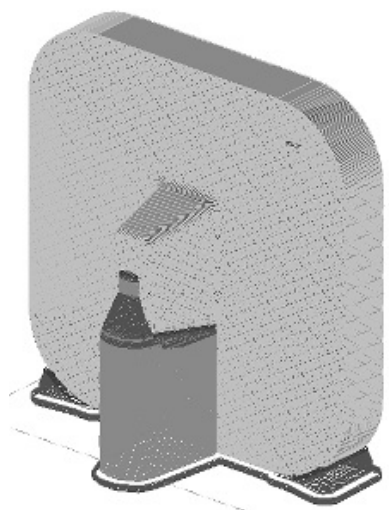


Figura 62 – Disposição de construção do inserto macho na máquina de prototipagem rápida.

Os insertos foram montados no porta-moldes, da mesma forma que nos experimentos anteriores, com a instalação de 2 termopares do tipo K para monitoramento da temperatura e com tubos de cobre para refrigeração através da circulação de água.

O experimento foi realizado na injetora Arburg Allrounder 320S 50T e o processo de injeção iniciou utilizando-se PP (PH 1310 - Ipiranga) e numa segunda etapa PA (Technyl A216 - Rhodia). Os principais parâmetros de injeção estão relacionados na Tabela 27.

As peças foram injetadas de forma que toda vez que o termopar localizado no canal indicasse 20°C, um novo ciclo de injeção fosse iniciado. A temperatura da água para a refrigeração do inserto foi de 17°C.

Tabela 27 – Parâmetros de injeção utilizados no inserto do tipo macho/fêmea.

Parâmetros de injeção	PP (PH 1310)	PA (A216)
Pressão de injeção (Bar)	120	150
Pressão de recalque (Bar)	100	100
Tempo de recalque (s)	16	6
Velocidade de injeção (m/s)	0,05	0,05
Temperaturas no cilindro (°C)	205, 200, 195, 190, 185	285, 280, 270, 260, 250
Temperatura do inserto (°C)	20	20
Temperatura da água (°C)	17	17

4.4.3 Resultados e discussões

O experimento com o inserto de ABS do tipo macho/fêmea iniciou com a injeção de peças em PP (Figura 63). Foram injetadas 150 peças sem que o inserto apresentasse falhas.



Figura 63 – Peça em PP injetada no inserto do tipo macho/fêmea.

A refrigeração foi feita com água a 17°C e a temperatura, medida pelo termopar, não ultrapassou o valor de 50°C (Figura 64). O tempo de ciclo médio foi de 215 s (3,58 min).

Numa segunda etapa foram injetadas peças em PA 6.6 para testar o comportamento do inserto com um polímero de temperatura de fusão mais alta. A temperatura foi monitorada da mesma forma que no caso anterior, mas nesse caso a temperatura máxima medida pelo termopar foi 55°C e o tempo de ciclo médio foi igual a 190 s (3,15min).

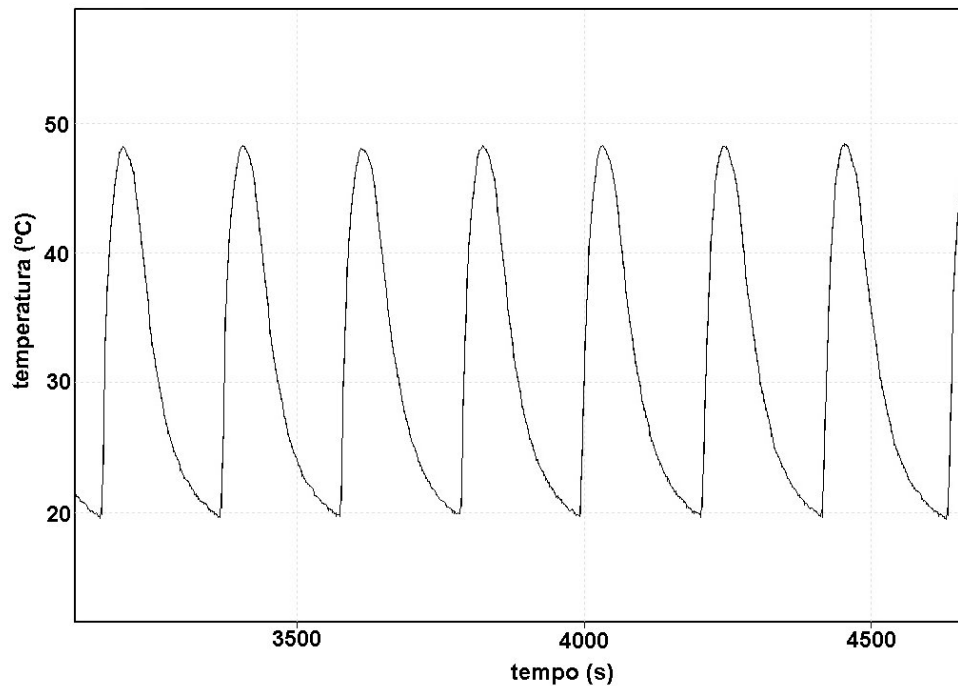


Figura 64 – Monitoramento da temperatura no inserto de ABS do tipo macho/fêmea.

Foram injetadas 18 peças até que a superfície do inserto iniciou um processo de descamação. Comparando-se a temperatura de transição vítrea da matriz estirênica, que é aproximadamente 104°C, e a temperatura da peça em PA, no momento da extração, que era de aproximadamente 170°C (termômetro digital a Laser MT350 - Minipa), pode-se afirmar que o defeito foi ocasionado pela temperatura e pelo fluxo do plástico fundido sobre a superfície do inserto. A Figura 65 ilustra o aspecto das superfícies dos insertos macho e fêmea danificados:

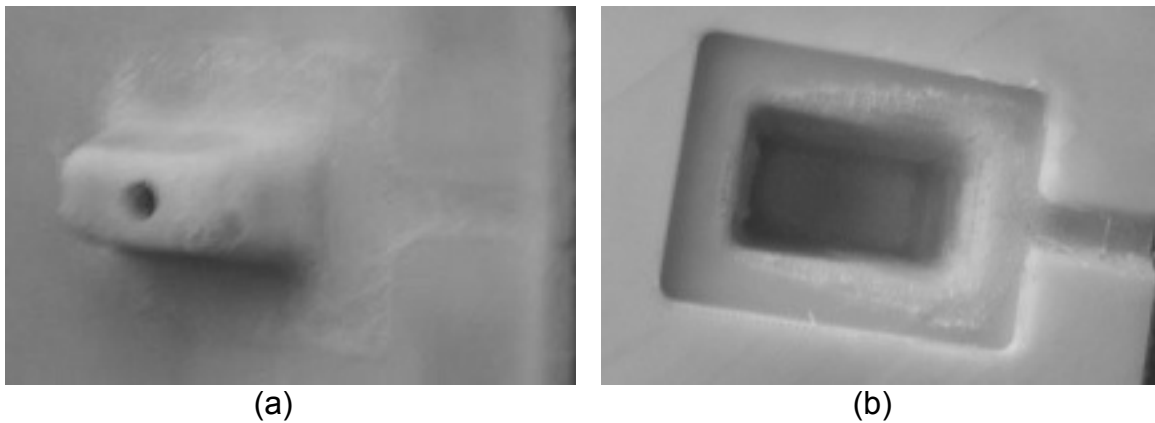


Figura 65 – Aspecto da superfície dos inserts após a injeção de 18 peças de PA:
(a) Inserto macho; (b) Inserto fêmea

No inserto fêmea ocorreu também uma delaminação de camada na região vizinha ao canal de injeção. Esse defeito ocorreu devido ao esforço no momento da extração associado a ação do fluxo de plástico fundido na entrada do canal. É possível um melhoramento nesse inserto modificando-se a disposição de construção, na máquina de prototipagem rápida, para vertical, como foi feito com o inserto macho. A Figura 66 ilustra a delaminação ocorrida no inserto fêmea:

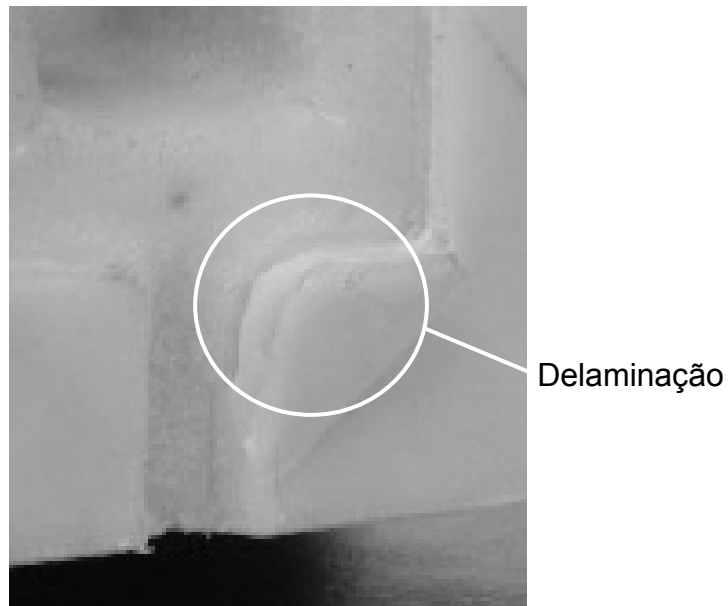


Figura 66 – Delaminação no inserto fêmea.

No trabalho desenvolvido por Salmoria *et al.* (2003), injetando PA 6.6 em inserts feitos em estereolitografia (resina SOMOS[®] 7110), foi observado que as primeiras peças injetadas provocaram delaminações e fraturas no fundo da cavidade e que na injeção da 12^a peça ocorreu o colapso total do macho. No caso do inserto

em ABS o inserto macho suportou os esforços decorrentes da extração da peça não havendo, portanto, o colapso dessa região.

Comparando os resultados de Gonçalves (2003) foi verificado que, com a exceção da delaminação, os defeitos ocorridos nos insertos em ABS são muito semelhantes aos encontrados na injeção de PA 6.6 em insertos feitos em estereolitografia. A Figura 67 mostra o aspecto desses insertos após o trigésimo segundo ciclo de injeção. Percebe-se que a região do canal e proximidades são as mais afetadas pela ação do fluxo de material fundido.

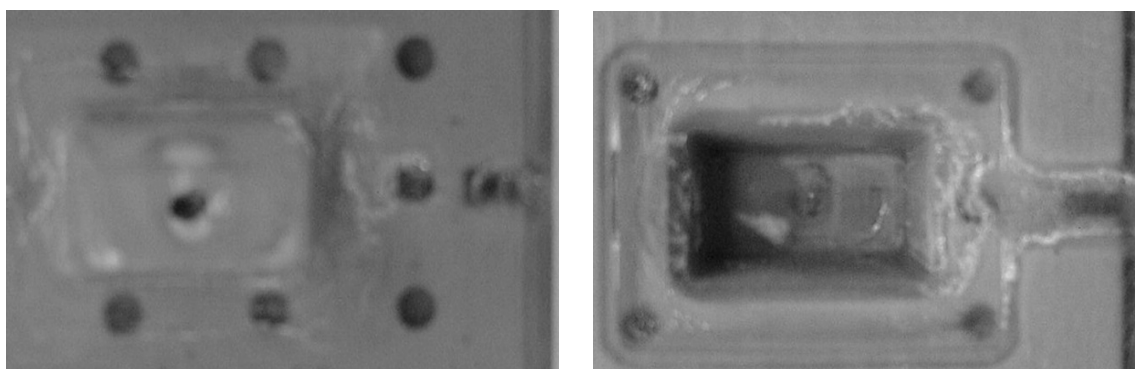


Figura 67 - Aspecto dos insertos construídos com resina SOMOS 7110 ao final do trigésimo segundo ciclo de injeção de PA 6.6 (Gonçalves, 2003).

O experimento permitiu estudar o comportamento de insertos em ABS do tipo macho/fêmea na moldagem por injeção de peças em PP e PA 6.6. O desempenho dos insertos para a injeção de PP pode ser considerado aceitável na injeção de lotes piloto para a avaliação de uma peça sem a necessidade da produção do ferramental definitivo. A injeção das peças em PP foi finalizada para permitir também a avaliação da injeção em PA, mas ficou evidente que seria possível a injeção de um número superior a 150 peças.

Os resultados obtidos na injeção da PA 6.6 demonstraram que, embora não haja afinidade química entre o ABS e a poliamida, sua temperatura durante o processo de injeção é muito alta se comparada a temperatura de transição vítrea da matriz estirênica. Os trabalhos anteriores, utilizando insertos em estereolitografia, também não conseguiram injetar um número muito alto de peças e as falhas nos insertos também se concentraram nas regiões próximas ao canal.

A disposição de construção vertical do inserto móvel permitiu uma resistência da parte macho suficiente para não haver o seu colapso. Essa mesma disposição

deverá ser utilizada no inserto fixo para evitar o desprendimento de camadas. O uso de um sistema de refrigeração permitiu trabalhar com o inserto a temperaturas mais baixas e reduzir o ciclo de injeção.

Uma alternativa para melhorar o desempenho do inserto com materiais, como a poliamida, é aplicar um recobrimento sobre a sua superfície com propriedades térmicas e mecânicas melhores que o material do inserto.

CAPÍTULO 5 - MOLDAGEM POR INJEÇÃO EM INSERTOS DE ABS COM RECOBRIMENTO SUPERFICIAL E EM INSERTOS DE PC E PPSF

Esse capítulo é dividido em duas partes. Na primeira serão descritos os experimentos realizados com a finalidade de melhorar a superfície dos insertos em ABS construídos pelo processo FDM. Foram avaliados três tipos de recobrimentos nos insertos de ABS para a injeção de termoplásticos. Na segunda parte foram testados insertos construídos em outros dois materiais, considerados de alto desempenho, disponíveis na tecnologia FDM: o PC e o PPSF.

5.1 Insertos de ABS com recobrimento superficial

5.1.1 Justificativa

A utilização de insertos poliméricos, fabricados pelo processo FDM de prototipagem rápida pode apresentar problemas de afinidade química entre a peça injetada e o inserto. Conforme já explanado em capítulo anterior, durante o planejamento da injeção é importante fazer uma análise para determinar quais materiais poliméricos não possuem afinidade com o material do inserto. Uma alternativa que pode viabilizar a injeção dos polímeros que possuem esta afinidade química é recobrir a superfície do inserto com uma camada cerâmica, metálica ou polimérica. Além disso, acredita-se que a camada de material de recobrimento pode melhorar as propriedades mecânicas e térmicas na superfície do inserto aumentando a sua vida. Neste experimento foram testados os recobrimentos cerâmico com níquel-fósforo (sem eletrodos ou *electroless*), metálico com níquel-cobre-cromo (sem eletrodos e deposição eletrolítica) e polimérico com poliuretano em insertos de ABS utilizados posteriormente na moldagem por injeção.

O processo de deposição de níquel-fósforo (Ni-P) sem eletrodos foi utilizado recentemente nos trabalhos de Badotti (2002) e Lencina (2004) para o recobrimento de peças e insertos construídos por estereolitografia. O fato do ABS ser um material de fácil galvanoplastia e a experiência acumulada nos experimentos com deposição sem eletrodos em peças feitas por estereolitografia motivaram a utilização desse processo de recobrimento. O experimento com deposição de níquel-fósforo foi realizado com a colaboração do Laboratório de Estudos do Efeito Mössbauer do Departamento de Física da UFSC.

A deposição de níquel-cobre-cromo (Ni-Cu-Cr) foi realizada pela empresa Boreal – Tratamentos de Superfície situada em Joinville/SC e para o recobrimento polimérico, foi testado um poliuretano de baixa viscosidade fornecido pela empresa Huntsman®. A escolha deste material se deu em função dos bons resultados obtidos no recobrimento de insertos em poliamida (PA 2200 – EOS of North America, Inc.) fabricados pelo processo SLS de prototipagem rápida (trabalho interno do CIMJECT/UFSC).

5.1.2 Recobrimento com deposição de níquel-fósforo sem eletrodos

- **Introdução**

O processo de recobrimento sem eletrodos (*electroless*) criado em 1947 por Brenner & Riddell, consiste no depósito de uma película contínua de metal em um substrato, por meio de uma solução aquosa, sem o uso de uma corrente elétrica externa. A deposição de níquel-fósforo é utilizada devido sua boa resistência à corrosão e ao desgaste e grande lubrificidade. Além disso, é de baixo custo, pode ser realizado a baixas temperaturas (em torno de 65°C) e as propriedades do filme de níquel-fósforo são facilmente controladas alterando-se a composição do banho (Lencina, 2004).

O processo é realizado seguindo as seguintes etapas: ataque químico, neutralização, aplicação do catalisador, aceleração e deposição do Níquel-fósforo. A seguir estas etapas estão descritas detalhadamente.

Ataque químico:

Como os polímeros não possuem uma superfície condutora é necessário prepará-la para receber a camada metálica. A primeira etapa consiste em deixar a superfície do substrato com uma micro-aspereza. Isso é feito por ataque químico com soluções saturadas de ácido crômico e sulfúrico. No caso do ABS, a exposição com esses agentes oxidantes provoca a remoção do butadieno na superfície gerando micro-cavidades. O ataque químico é importante para aumentar a área superficial do substrato e para permitir a adsorção do paládio (agente catalisador). Normalmente é utilizada uma solução sulfocrômica que é bastante prejudicial ao meio ambiente, pois tem o inconveniente de produzir o cromo hexavalente (Cr⁶⁺),

que é cancerígeno, altamente poluente e mutagênico (Domenech *et al.*, 2003). Uma alternativa, utilizada nesse trabalho, foi a sua substituição por uma solução permangânica.

Neutralização:

Essa etapa consiste na retirada do óxido de manganês, no caso de se utilizar uma solução permangânica, gerada durante o ataque químico. A limpeza é feita por imersão da peça em uma solução de ácido sulfúrico diluído em água deionizada.

Aplicação do catalisador:

Tem por finalidade formar uma camada catalítica sobre a superfície do plástico, para que seja possível a deposição do níquel-fósforo. O paládio é utilizado por ser de fácil ancoragem nas micro-cavidades resultantes do ataque químico. A aplicação é feita por imersão da peça em uma solução de cloreto de estanho e cloreto de paládio em ácido clorídrico.

Aceleração:

Nessa etapa é feita a remoção do hidróxido de estanho da superfície para que os núcleos de paládio fiquem expostos. É feita por imersão da peça em uma solução diluída de ácido hidrocloreídrico ou um sal ácido.

Deposição do níquel-fósforo:

A deposição química é feita pela imersão da peça em uma solução composta por diversos componentes. Usualmente elas contêm sulfato de níquel, agentes redutores, agentes complexantes, aceleradores e estabilizadores. O potencial de deposição é dependente do pH, temperatura, concentração iônica e composição química da solução. A espessura da camada dependerá do tempo de imersão da peça na solução (Wick, 1985).

Entre cada uma das etapas citadas, as peças são lavadas em água corrente para retirada de excessos na superfície. Neste experimento foi utilizado o procedimento recomendado pela empresa Atotech[®], para o recobrimento de Ni-P

sem eletrodos. Essa empresa colaborou com o experimento fornecendo gratuitamente os produtos necessários para o recobrimento.

- **Determinação dos tempos nas soluções**

O processo sem eletrodos é realizado pela imersão seqüencial da peça em diversas soluções. Os tempos de imersão em cada etapa variam em função da espessura de camada desejada, do material, da geometria e da qualidade das superfícies da peça. Como não havia recomendações específicas para o recobrimento de peças em ABS P-400, foi necessário antes fazer um experimento em corpos de prova para determinação dos tempos de imersão em cada solução que resultassem na melhor adesão do filme metálico sobre o substrato.

As soluções utilizadas no experimento são relacionadas abaixo:

Solução permangânica: 25 ml de ácido nítrico, 150 ml de água e 4 g de permanganato de potássio. Misturar e aquecer até 65°C.

Solução com paládio: 2 ml de solução AK1 (Atotech[®]), 100 ml água e 30 ml de ácido clorídrico. Misturar e utilizar a temperatura ambiente.

Solução com Níquel: 15 ml de sal metálico (Ni-AK parte A – Atotech[®]), 15 ml hipofosfito redutor (Ni-AK parte B – Atotech[®]), 30 ml de complexador (Ni-AK parte C – Atotech[®]) e 150 ml de água. Misturar e aquecer até 65 °C.

Foram construídos 6 corpos de prova em ABS P-400 (10x10x3mm) e cada um foi submetido aos seguintes banhos com as durações mostradas na Tabela 28.

1. Ataque químico em solução permangânica;
2. Limpeza com água;
3. Ativação em solução de paládio AK1, para permitir o ancoramento do níquel;
4. Limpeza com água;
5. Imersão em solução de paládio AK2 redutor;
6. Limpeza com água;
7. Deposição em solução com níquel.

Os corpos de prova nº 1 e 2 precisaram de maior tempo de ativação devido ao pouco tempo de permanência no ataque químico. O tempo de deposição foi

anotado no momento em que toda a superfície do corpo de prova estava coberta pelo filme.

Tabela 28 – Duração do ataque químico, ativação e deposição do níquel.

Nº	Ataque	Ativação	Deposição	Adesão	Obs.
1	15	90	30	Média	-- --
2	30	75	25	Média	-- --
3	45	60	25	Boa	-- --
4	60	60	40	Boa	-- --
5	75	60	50	Ruim	empenou
6	90	60	50	Ruim	empenou

Após o recobrimento, os corpos de prova foram submetidos a um teste de aderência (*peel test*), utilizando uma fita adesiva (3M[®] Scotch). O procedimento consiste em colar e descolar a fita sobre a superfície do corpo de prova para avaliar o grau de aderência do filme sobre o substrato. Quanto menos material a fita adesiva retirar melhor será a aderência do filme. A Tabela 28 também apresenta os resultados de adesão obtidos. Os tempos utilizados para a metalização dos corpos de prova nº 3 e 4 foram os que propiciaram os melhores resultados. A Figura 68 mostra um corpo de prova sem recobrimento e outros quatro recobertos.

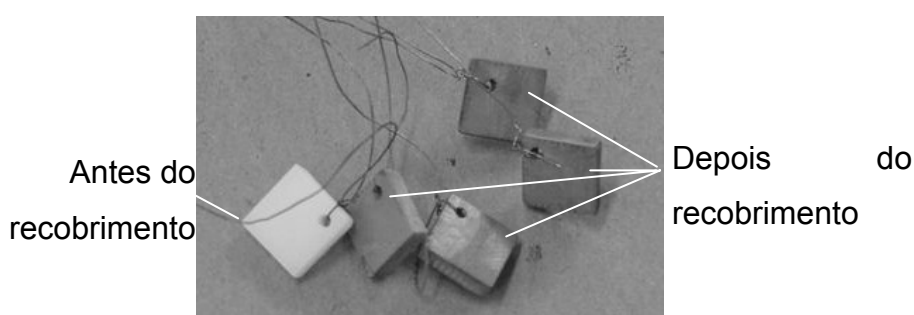


Figura 68 – Corpos de prova antes e depois do recobrimento com níquel-fósforo.

- **Recobrimento dos insetos com níquel-fósforo**

O recobrimento foi realizado em um inserto de ABS com a geometria do corpo de prova de tração ASTM D 638m tipo IV. O experimento seguiu os seguintes passos:

- 1- Banho em solução permangânica para promover o ataque químico durante 45 minutos a 50°C;
- 2- Limpeza mergulhando os insertos em água;
- 3- Limpeza com jato de água;
- 4- Limpeza com jato de álcool (etanol);
- 5- Banho em solução 50% água + 50% HCl durante 10 minutos;
- 6- Limpeza com água oxigenada 30 volumes com algodão;
- 7- Limpeza com álcool (etanol) com algodão;
- 8- Banho em solução de paládio AK1 (ativação) durante 1 hora para permitir ancoramento do níquel;
- 9- Imersão rápida em água;
- 10-Imersão rápida em acelerador AK2;
- 11-Imersão rápida em água;
- 12-Banho em solução de níquel AK durante aproximadamente 25 minutos (tempo suficiente para cobrir a peça) a 50°C; Controlar Ph entre 7 e 8 (se baixar Ph adicionar 10 ml hidróxido de sódio);
- 13-Limpeza com jato de água;
- 14-Limpeza com jato de álcool (etanol);
- 15-Secagem com papel absorvente.

A execução desses passos não garantiu a cobertura completa da superfície do inserto, sendo que o inserto teve que retornar duas vezes ao banho de paládio e em seguida ao banho de níquel AK para tentar recobrir toda a superfície. Embora esse procedimento tenha aumentado a cobertura ainda restaram regiões sem recobrimento, conforme ilustra a Figura 69.

O processo de recobrimento foi encerrado, pois a repetição desse procedimento poderia aumentar a espessura do filme facilitando o aparecimento de fissuras. As possíveis causas do não recobrimento de regiões do inserto podem ter sido devido a ineficiência nas soluções utilizadas ou a limpeza insuficiente das superfícies, o que impediria a ação do ataque químico ou a ancoragem do paládio.

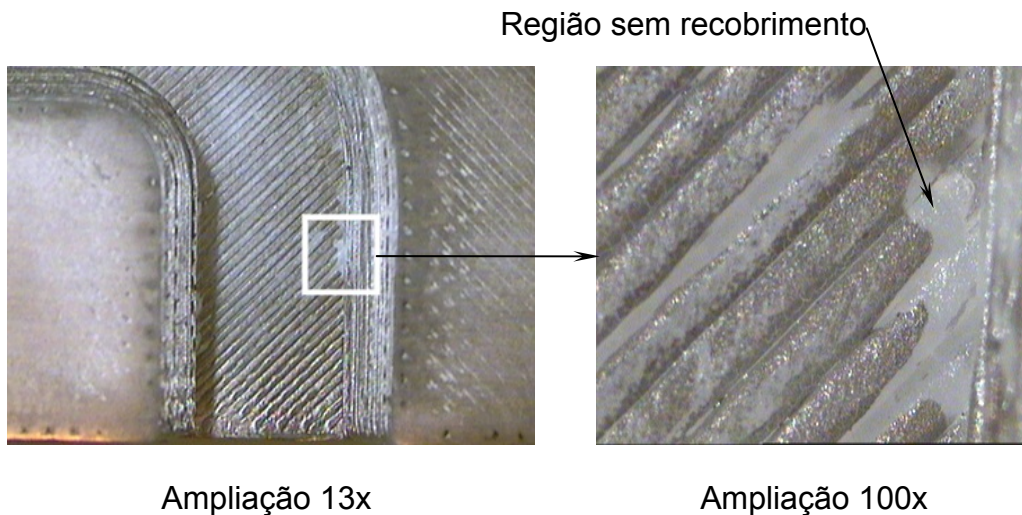


Figura 69 – Detalhe do canal de injeção com região sem recobrimento.

A Figura 70 mostra os dois insetos após o recobrimento com Ni-P. Pode-se observar pelas manchas nas superfícies do inserto, a umidade residual no filme depositado. Foi constatado que mesmo depois de 24 horas secando a temperatura ambiente essas manchas não haviam desaparecido denotando que a umidade poderia estar migrando do interior das paredes do inserto.

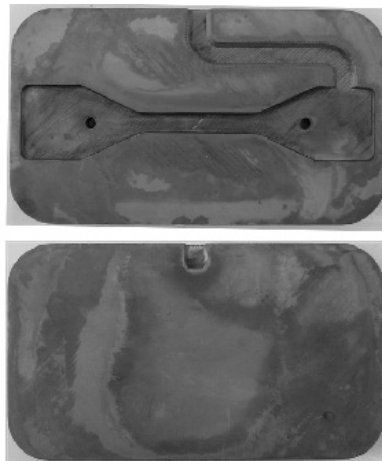


Figura 70 – Insetos em ABS recobertos com níquel-fósforo.

- **Injeção de peças utilizando os insetos recobertos com Ni-P**

O inserto recoberto foi preparado para receber tubos de cobre para a refrigeração e termopares para o monitoramento da temperatura no canal de injeção e no meio da cavidade. O preenchimento da parte traseira foi realizado conforme

descrito em capítulos anteriores. O inserto foi montado na injetora para ser usado na moldagem por injeção de corpos de prova em ABS (GPM 6300 - GE Plastics). Os principais parâmetros de injeção utilizados estão mostrados na Tabela 29.

Tabela 29 - Parâmetros de injeção utilizados na injeção de peças em ABS.

Parâmetros de Injeção	ABS (GPM 6300)
Pressão de injeção (Bar)	250
Pressão de recalque (Bar)	200
Tempo de recalque (s)	11
Velocidade de injeção (m/s)	0,05
Temperaturas no cilindro (°C)	210, 215, 220, 225, 230
Temperatura da água	16
Temperatura do inserto (°C)	25

• Resultados e discussões

No início do processo de injeção foi verificado que o filme depositado não resistiu ao fluxo do material fundido. Antes mesmo do ajuste dos parâmetros de injeção (*try-out*) o filme já havia sido quase todo retirado nas regiões da cavidade, conforme ilustra a Figura 71 (região mais clara). A temperatura medida pelos dois termopares não ultrapassou o valor de 60°C. A figura também destaca a presença de resíduos de ABS injetado sobre a superfície descoberta do inserto.



Figura 71 – Filme de Ni-P retirado no início do processo de injeção.

Com a retirada do filme ocorreu uma excessiva aderência entre a peça moldada e o inserto resultando no seu colapso com o desprendimento de uma das camadas do inserto móvel, conforme é mostrado na Figura 72.

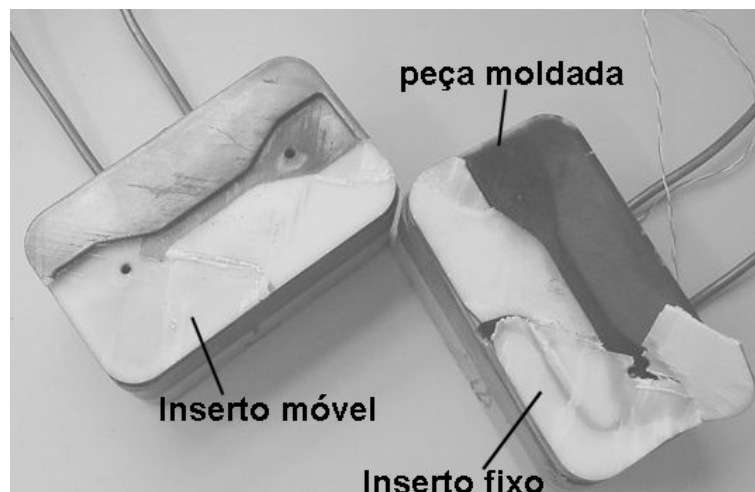


Figura 72 – Insetos colapsados devido aderência entre peça moldada e inserto.

5.1.3 Recobrimento com níquel-cobre-cromo

O processo de recobrimento com níquel-cobre-cromo (Ni-Cu-Cr) foi realizado nas dependências da Empresa Boreal -Tratamentos de Superfície. Foram aplicadas duas técnicas de recobrimento, sendo que inicialmente a técnica sem eletrodos foi utilizada para cobertura com níquel químico e as demais camadas (cobre, níquel brilhante e cromo) foram adicionadas através de deposição eletrolítica. Foi utilizado o inserto do tipo macho/fêmea e a fase de aplicação do níquel químico foi bastante semelhante a apresentada no experimento anterior. Os procedimentos que foram utilizados para a metalização do inserto foram os mesmos que são aplicados em peças injetadas em ABS comercializadas por diversas empresas no Brasil.

Foram seguidas as seguintes etapas para o recobrimento do inserto:

1. Limpeza da peça por imersão em uma solução desengraxante por 2 minutos;
2. Lavar com água;
3. Banho em neutralizador (ácido sulfúrico a 5%) por 1 minuto para retirada de resíduos da solução desengraxante;
4. Lavar com água;

5. Ataque químico em banho numa solução sulfo-crômica a 75°C por 5 minutos (Figura 73a);
6. Lavar com água;
7. Banho em neutralizador por 2 minutos para retirada do excesso da solução sulfo-crômica (Figura 73b);
8. Lavar com água;
9. Ativação com ácido clorídrico por 1 minuto;
10. Banho em solução com paládio por 12 minutos;
11. Banho em acelerador para retirar o excesso de paládio por 40 segundos;
12. Banho em níquel químico em temperatura entre 25 e 30°C por 10 minutos. Como não houve o total recobrimento (Figura 73c), a peça retornou ao acelerador e novamente para o níquel químico. Mesmo assim a falha continuou e a peça retornou duas vezes para a ativação em banho de paládio (4 minutos) até o total recobrimento (Figura 73d);
13. Lavar com água;
14. Ativação em ácido sulfúrico;
15. Banho em cobre ácido em temperatura entre 24 a 28°C por 25 minutos;
16. Lavar com água;
17. Ativação em ácido sulfúrico;
18. Banho em solução com níquel brilhante por 10 minutos;
19. Lavar com água;
20. Ativação em ácido sulfúrico;
21. Banho em solução com cromo por 2 minutos;
22. Lavar com água.

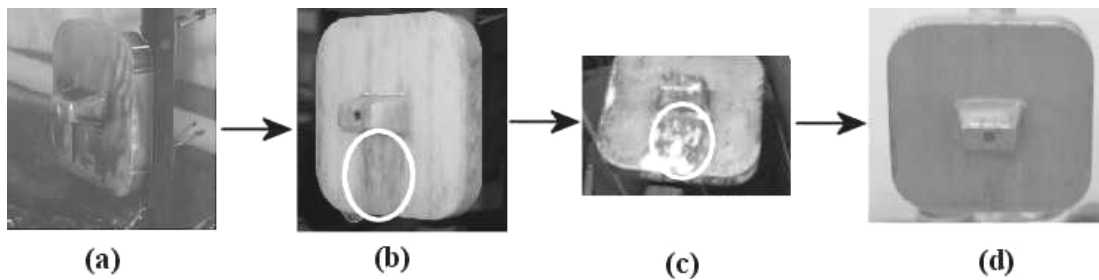


Figura 73 – Seqüência ilustrando falha no recobrimento devido resíduos do ataque químico: (a) Inserto após ataque químico; (b) Inserto após retirada do excesso da solução sulfo-crômica; (c) Em destaque: região sem cobertura (d) Inserto totalmente coberto.

Embora tenha sido a primeira vez que a empresa metalizou peças em ABS fabricadas pelo processo FDM, o resultado foi considerado bom. O tempo total do processo descrito foi de 2 horas e a espessura aproximada do filme foi de 20 μm . É importante ressaltar que a posição da peça na gancheira (suporte para fixação das peças) interfere no resultado final do processo. Na região onde escorreu a solução do ataque químico, a direção do escoamento coincidiu com a orientação dos filetes de construção da peça e possivelmente favoreceu a retenção de resíduos na superfície dificultando a ancoragem do paládio. O mesmo não aconteceu com o inserto fêmea, onde os filetes ficaram posicionados transversalmente ao sentido em que a solução escorreu (Figura 74b).

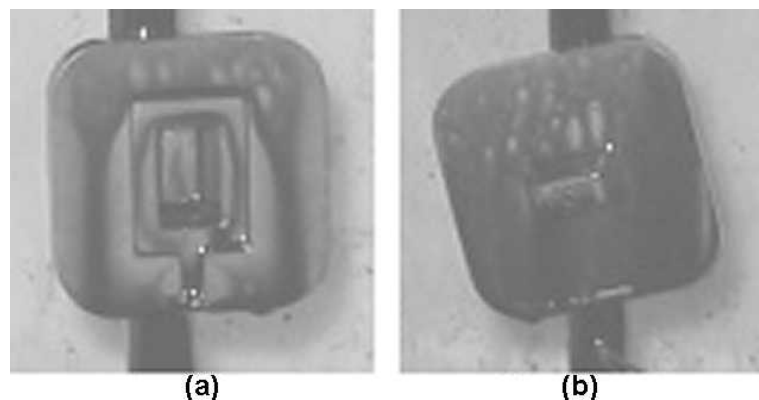


Figura 74 – Disposição dos insertos do tipo macho/fêmea na gancheira: (a) Inserto fêmea; (b) Inserto macho.

A qualidade da superfície na região onde houve o acúmulo desses resíduos foi prejudicada com o aumento da aspereza (região destacada na Figura 75b). A Figura 75 mostra os dois insertos ao final do processo.

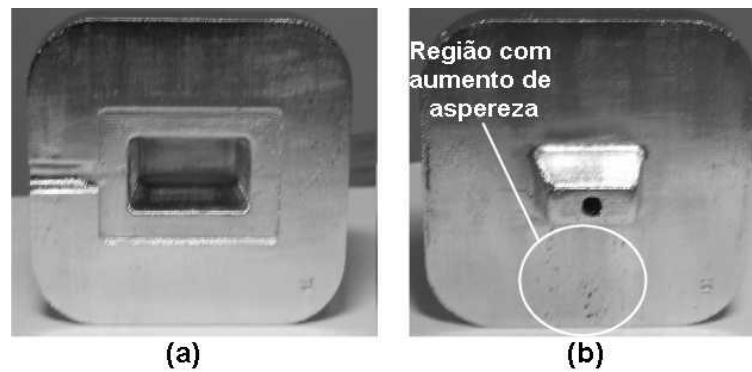


Figura 75 – Inseros do tipo macho/fêmea metalizados: (a) Inseto fêmea; (b) Inseto macho.

As falhas ocorridas nas superfícies dos inseros também foram ocasionadas pelas imperfeições do processo construtivo. O aspecto brilhante do cromo tem como característica destacar os defeitos nas superfícies e por essa razão recomenda-se muito cuidado no manuseio das peças que serão metalizadas. O caso das peças fabricadas pelo processo FDM possui a desvantagem de não produzir superfícies lisas e ainda apresentar vazios devido a falhas durante o processo de deposição do ABS. A Figura 76, obtida por microscopia ótica por reflexão, destaca uma região com vazios na superfície metalizada do inseto macho.

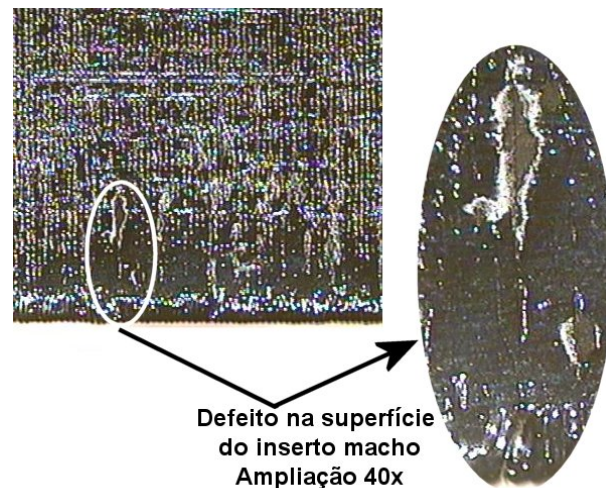


Figura 76 – Vazios na superfície metalizada do inseto macho .

- **Injeção de peças utilizando os inseros recobertos com Ni-Cu-Cr**

O inseto metalizado foi preparado para ser utilizado na injeção de peças em PP (PH 1310 - Ipiranga) e ABS (Lustran M202 AS - Bayer). Foram utilizados os

mesmos procedimentos que no caso anterior e os principais parâmetros de injeção são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Parâmetros de injeção utilizados no inserto metalizado.

	PP (PH 1310)	ABS (M202 AS)
Pressão de injeção (Bar)	150	300
Pressão de recalque (Bar)	100	240
Tempo de recalque (s)	16	11
Velocidade de injeção (m/s)	0,05	0,05
Temperaturas no cilindro (°C)	205, 200, 195, 190,185	230, 225, 210, 215, 210
Temperatura da água	16	16
Temperatura do inserto	30	30

• Resultados e Discussões

Nesse experimento foram injetadas 15 peças em polipropileno e 50 peças em ABS. As peças em PP foram injetadas para servirem de parâmetro de avaliação do acabamento de um inserto em ABS metalizado caso a injeção das primeiras peças em ABS provocasse avarias no inserto. Conforme esperado a injeção de peças em polipropileno (Figura 77) transcorreu sem causar nenhum dano ao inserto.

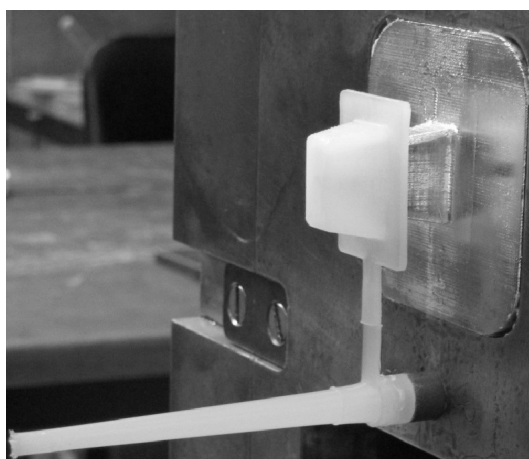


Figura 77 – Peça em polipropileno injetada em inserto de ABS metalizado.

Por outro lado, a injeção de peças em ABS apresentou problemas de aderência na superfície do inserto (Figura 78). A rugosidade resultante do processo

construtivo e da metalização na superfície do inserto se mostrou inadequada para a injeção do ABS na geometria escolhida.

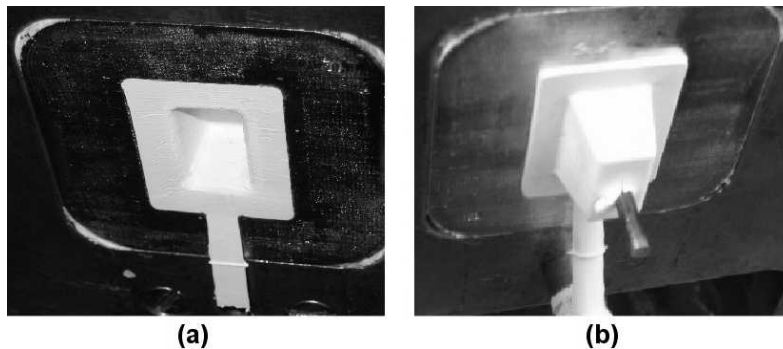


Figura 78 – Peças em ABS aderidas no inserto metalizado: (a) Aderência no inserto fêmea; (b) Aderência no inserto macho.

A dificuldade em retirar a peça do inserto e os efeitos da alta temperatura no canal provocaram a retirada prematura da camada metalizada nessa região (Figura 79). Embora essa avaria comprometesse a geometria da peça, optou-se em dar continuidade ao experimento para que fossem retiradas mais informações sobre o comportamento do filme metálico sob o efeito dos esforços oriundos do processo de injeção.

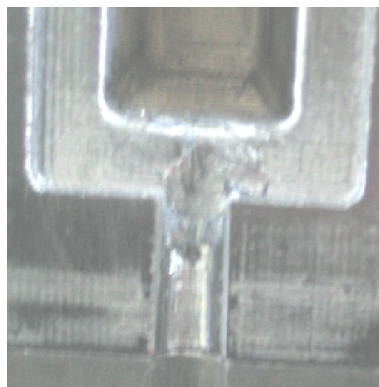


Figura 79 – Avaria na entrada do canal do inserto fêmea.

Durante a injeção de 50 peças foi observado o aparecimento de fissuras no filme metálico do inserto macho, conforme ilustra a Figura 80 (a e b). Outro defeito observado foi a corrugação do filme metálico (Figura 80c). As fissuras também apareceram no inserto fêmea além da delaminação do filme metálico nas bordas e na região do canal (Figura 81).

A diferença entre os coeficientes de expansão térmica linear do substrato e do filme metálico é o principal fator para a ocorrência de fissuras e corrugações nos filmes metálicos (Margolis, 1986). Os coeficientes são de 4 a 15 vezes maiores para o ABS se comparados aos metais comumente utilizados para o recobrimento. Em outras palavras, pode-se afirmar que o substrato movimenta-se de 4 a 15 vezes mais do que o filme metálico com a variação de temperatura. Dessa forma quando a temperatura aumenta o substrato se expande gerando tensões no filme metálico podendo causar até a sua ruptura (fissuras) e no caso da temperatura diminuir o substrato contrai mais que o filme metálico gerando bolhas ou corrugações. A Tabela 31 lista os valores de coeficientes de expansão térmica para os materiais utilizados nesse experimento (Hypertextbook, 2004).

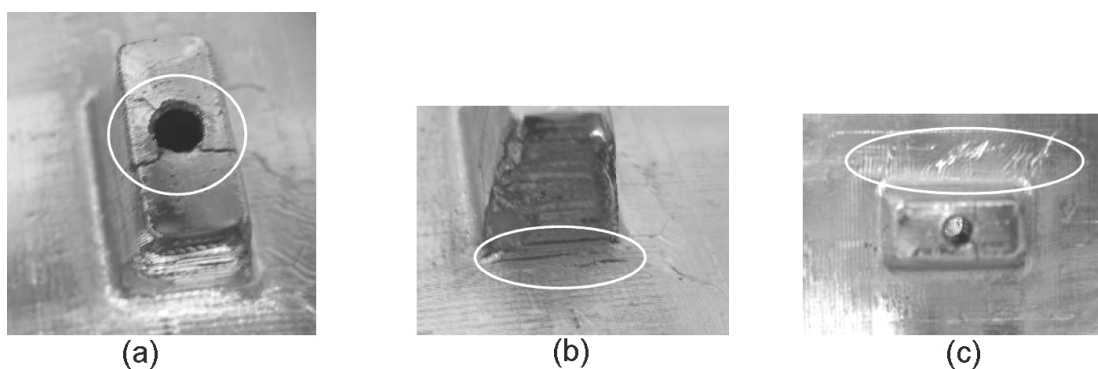


Figura 80 – Defeitos no filme metálico no inserto macho: (a) Fissuras no filme metálico; (b) Fissuras no filme metálico; (c) Corrugação no filme metálico.

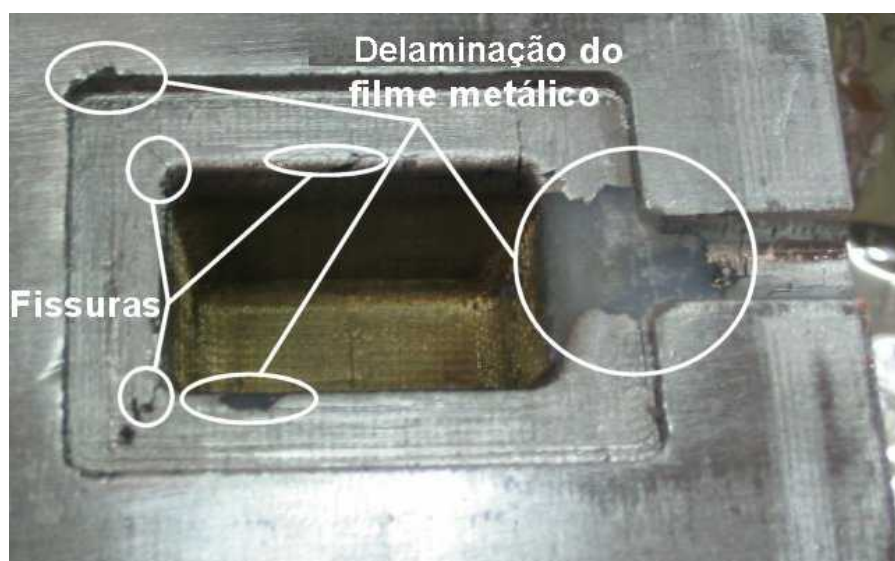


Figura 81 – Defeitos no filme metálico no inserto fêmea.

Tabela 31 – Coeficientes de expansão térmica linear.

Material	Coeficiente de expansão térmica linear ($^{\circ}\text{C}$). 10^{-5}
ABS	7,2
Níquel	1,3
Cobre	1,7
Cromo	0,5

Em um estudo semelhante, Lencina (2004) utilizou a mesma geometria em um inserto de resina DSM SOMOS 7110 construído por estereolitografia e recoberto apenas com níquel-fósforo pela técnica sem eletrodos. Foi relatado que após a injeção de 16 peças em PA 6.6, o canal de injeção começou a delaminar. Nesse trabalho foram injetadas 42 peças até que houvesse delaminação na região esteticamente importante. Não foi relatado nenhum problema de adesão entre o inserto e as peças injetadas e isso pode ser justificado pela qualidade do acabamento superficial gerado pelo processo de estereolitografia. O inserto apresentou também fissuras e delaminações do filme, no entanto não apresentou problemas de corrugação na superfície.

5.1.4 Recobrimento polimérico

O recobrimento polimérico pode ser uma boa alternativa para evitar os problemas de afinidade química entre os materiais do inserto e o da peça moldada. Além disso, ele pode ser usado para corrigir imperfeições na superfície do inserto tornando-a menos rugosa e diminuindo os problemas na extração da peça. Como desvantagens pode-se citar a dificuldade de aplicação de um filme polimérico de espessura constante e a perda de precisão dimensional das peças injetadas.

Esse experimento testou a aplicação de um filme de poliuretano (Ren Cast 452 A/B da Huntsman[®]) sobre a superfície de insertos em ABS. Embora esse material seja indicado para a produção de peças protótipos ele foi recentemente utilizado com sucesso no recobrimento de um inserto polimérico produzido pelo processo SLS de prototipagem rápida em um trabalho interno do CIMJECT/UFSC. A

Tabela 32 lista as principais propriedades do poliuretano Ren Cast 452 A/B após uma cura de 7 dias a 25°C⁸:

Tabela 32 – Propriedades típicas do Ren Cast 452 A/B (Huntsman[®]) curado.

Propriedade	Unidade	Valor
Dureza Shore D	----	72 – 75
Resistência a flexão	N/mm ²	65 – 70
Resistência a tração	N/mm ²	35 – 40
Resistência a compressão	N/mm ²	50 – 55
Resistência ao impacto	kJ/ m ²	3,5 – 4,5
Temperatura de deflexão ao calor (HDT)	°C	44 – 46

Foi utilizado o inserto do tipo macho/fêmea para a realização deste experimento. O preparo do poliuretano foi feito através da mistura de 50% em peso de resina (componente A) com 50% em peso de endurecedor (componente B). Depois de colocados em um recipiente limpo recomenda-se mexer por no mínimo 45 segundos para que o resultado seja homogêneo. Como esse material solidifica entre 4 e 8 minutos, a sua aplicação com pincel foi feita imediatamente após a mistura.

Depois de recoberto, o inserto foi montado no porta-moldes para o preenchimento da parte traseira com resina epóxi. Paralelamente foram colocados o sistema de refrigeração com tubos de cobre e dois termopares do tipo K para monitoramento da temperatura. O inserto foi montado na injetora para ser utilizado na injeção de peças em ABS (GPM 6300 - GE Plastics). Os principais parâmetros de injeção estão apresentados na Tabela 33.

O inserto foi refrigerado com água a 16°C e o processo de injeção foi controlado de forma que uma nova peça fosse injetada toda vez que a temperatura medida pelos termopares indicasse 30°C.

⁸ Extraído de www.huntsman.com. Acesso em 05/08/2003.

Tabela 33 – Parâmetros de injeção para o ABS GPM 6300 (inserto macho/fêmea).

Parâmetros de Injeção	ABS (GPM 6300)
Pressão de injeção (Bar)	250
Pressão de recalque (Bar)	200
Tempo de recalque (s)	21
Velocidade de injeção (m/s)	0,075
Temperaturas no cilindro (°C)	190, 200, 210, 220, 230
Temperatura da água	16
Temperatura do inserto (°C)	30

• Resultados e discussões

Nesse experimento foi utilizado um inserto em ABS do tipo macho/fêmea com recobrimento polimérico para injetar peças em ABS. A Figura 82 ilustra uma das peças injetadas no inserto de ABS recoberto.

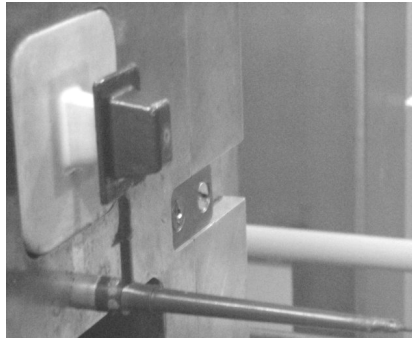


Figura 82 – Peça em ABS injetada em um inserto de ABS com recobrimento polimérico.

Os resultados obtidos indicaram que esse tipo de recobrimento não se mostrou adequado para a injeção de ABS. Houve problemas durante a extração das peças e o recobrimento na região do canal foi retirado já nas primeiras peças injetadas (Figura 83). O local onde houve a retirada de parte do filme polimérico foi o mesmo ocorrido no caso do recobrimento metálico sugerindo que os efeitos da temperatura e do fluxo do material fundido são mais acentuados nessa região.



Figura 83 – Região onde o filme polimérico não resistiu ao esforço de extração da peça.

5.1.5 Conclusões

O uso do processo sem eletrodos para o recobrimento de insetos de ABS não se mostrou adequado para moldagem por injeção, pois o filme de Ni-P depositado não resistiu ao fluxo do material fundido. Será necessário um maior aprofundamento nos estudos para melhorar a adesão entre filme e substrato e para minimizar os efeitos da umidade retida nas paredes do inserto.

No caso da combinação do processo sem eletrodos com o processo eletrolítico na deposição de Ni-Cu-Cr, o resultado foi bastante promissor para a injeção de materiais como o PP, PEBD e PEAD. No entanto a injeção de peças em ABS, que possui uma maior temperatura de injeção, apresentou problemas de aderência entre molde e moldado impossibilitando a extração das peças. Além disso, as variações de temperatura durante o processo de injeção mostraram ser limitantes ao uso dos recobrimentos metálicos em insetos poliméricos, devido às contrações diferenciadas entre filme e substrato.

A alternativa de se usar um filme polimérico para recobrir os insetos de ABS também não produziu bons resultados. O filme polimérico não teve boa adesão com o substrato e foi retirado durante a extração das primeiras peças injetadas, na região mais solicitada termicamente.

5.2 Insetos de PC e de PPSF

O experimento a seguir visou testar a injeção de termoplásticos em insetos construídos com outros dois materiais poliméricos considerados de alto desempenho e disponíveis para a tecnologia FDM: o PC e o PPSF. A construção dos insetos foi realizada em uma máquina FDM Titan.

A confecção dos insetos foi realizada pela empresa Stratasys Inc. – EUA, fabricante do equipamento, uma vez que até o ano de 2004 nenhuma máquina FDM Titan havia sido instalada em instituições ou empresas brasileiras. Foram construídos dois insetos do corpo de prova em PC e dois em PPSF. Com esses insetos foi avaliada a injeção de peças em materiais que não apresentaram bons resultados para os insetos em ABS, como o POM e o PA.

O PC é classificado como termoplástico de engenharia devido as suas propriedades mecânicas e térmicas que combinam rigidez, alta resistência mecânica, alta temperatura de deflexão e transparência. Composto de uma resina resultante da reação entre derivados do ácido carbônico e o bisfenol A, esse termoplástico foi desenvolvido em 1898, mas apenas em 1958 foi disponibilizado no mercado pela Bayer na Alemanha e pela GE Plastics nos Estados Unidos (Harper, 2000). Sua estrutura química (Figura 84) lhe permite mobilidade suficiente para dissipar energia de impacto à temperatura ambiente. De natureza amorfa, o PC apresenta baixa contração, o que proporciona uma estabilidade dimensional nas peças. A Tabela 34 apresenta os valores das suas principais propriedades (Stratasys, 2004^A; Matweb,2004^D).

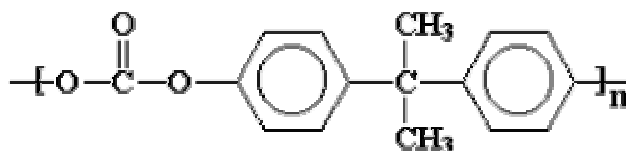


Figura 84 – Estrutura química do policarbonato.

O PPSF é também um termoplástico amorfo de alto desempenho. Suas principais características são: resistência química, ao impacto, ao calor e à combustão. As peças em PPSF podem ser esterilizadas, o que tem permitido a sua utilização em equipamentos médicos e odontológicos (Goodfellow, 2004). A Figura

85 mostra sua estrutura química e a Tabela 34 apresenta as suas principais propriedades (Stratasys, 2004^A; Matweb,2004^E).

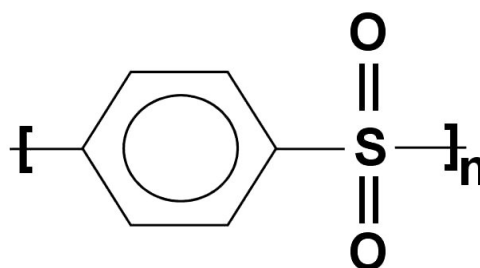


Figura 85 – Estrutura química do polifenilsulfona.

Tabela 34 – Propriedades do ABS, PC e do PPSF.

Propriedades	Unidade	ABS	PC	PPSF
Tensão de ruptura a tração ^A	MPa	34	63	69
Módulo de elasticidade longitudinal ^A	MPa	2495	2380	2312
Resistência ao impacto (Teste Izod) ^A	J/m	107	754	782
Dureza Rockwell (R) ^A	--	78	70	122
Densidade ^A	g/cm ³	1,05	1,2	1,29
Condutividade térmica ^D	W/m.K	0,18	0,19	0,35
Calor específico ^D	J/kg.K	2020	1260	---
Temperatura de deflexão ao calor	°C	93	125	207

Destaca-se na Tabela 34 a superioridade do PPSF nos valores de dureza Rockwell (R) e temperatura de deflexão máxima (HDT) que são aproximadamente 1,7 vezes maiores que os valores para o PC.

Os parâmetros de construção utilizados para o PC e para o PPSF foram os padrões da máquina FDM Titan, sendo a espessura da camada igual a 0,254mm e bico T16 (diâmetro=0,41mm). Para mensurar a evolução tecnológica da máquina FDM Titan em relação a FDM 2000 pode-se destacar o tempo de fabricação do inserto fixo construído com parâmetros de construção padrão (Tabela 35):

Tabela 35 – Comparação entre os tempos de fabricação do inserto fixo nas máquinas FDM Titan e FDM 2000.

Máquina de prototipagem	Tempo de fabricação
FDM Titan	2h10min
FDM 2000	7h07min

5.2.1 Injeção de peças em insertos de PC

Para verificar se o PC tem afinidade química com os materiais selecionados para a injeção, utilizou-se novamente o parâmetro de Solubilidade de Hildebrand (δ). Consultando a Tabela 18 pode-se verificar que os valores de δ para o POM, PA e PS são respectivamente 11,1, 13,6 e 9,1 $(\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2}$. Comparando esses valores com o valor correspondente para o PC $(9,8 (\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2})$, verifica-se que apenas o ABS (PS - matriz estirênica) apresenta afinidade com o PC, já que seus valores são próximos.

Com isso os insertos de PC foram montados no porta-moldes para injeção de peças em POM (Celcon M90-45H - Ticona) e PA (Technyl A-216 – Rhodia). Foram utilizados os procedimentos de montagem do insertos já descritos para os insertos do ABS, destacando-se a inserção dos tubos de cobre para a refrigeração e dos termopares para monitoramento da temperatura. Os principais parâmetros de injeção estão listados na Tabela 36.

O processo de injeção foi feito com monitoramento da temperatura no inserto de forma que o ciclo fosse iniciado toda vez que a temperatura medida pelos termopares indicasse 30°C.

Tabela 36 - Parâmetros de injeção para o POM e para o PA (inserto de PC).

Parâmetros de Injeção	POM (M90-45H)	PA (A-216)
Pressão de injeção (Bar)	200	150
Pressão de recalque (Bar)	160	100
Tempo de recalque (s)	16	6
Velocidade de injeção (m/s)	0,05	0,05
Temperaturas no cilindro (°C)	182, 187, 192, 195, 200	260, 265, 270, 283, 288
Temperatura da água (°C)	14	14
Temperatura do inserto (°C)	30	30

5.2.2 Resultados e discussões sobre a injeção em insertos de PC

Os insertos de PC já haviam sido usados anteriormente no experimento que avaliou o efeito da refrigeração com água gelada no ciclo de injeção. Foram injetadas 60 peças em polipropileno e o inserto não apresentou nenhum defeito.

O próximo passo foi testar os insertos em materiais que não haviam tido bons resultados na utilização em insertos de ABS, como o POM e o PA. Numa primeira etapa foram então injetadas 170 peças (corpos de prova) em POM sem que o inserto apresentasse avarias. Foram separadas 100 peças para que fossem feitas medições de comprimento e peso para analisar a repetibilidade do processo. Foi verificado que o valor do comprimento não teve grande alteração ao longo do processo de injeção, isto porque, o valor obtido pelo coeficiente de correlação ($R^2=0,982$) que foi calculado através de uma regressão linear, ficou próximo de 1. No caso da massa o resultado não foi muito bom, visto que o coeficiente de correlação foi de 0,873. Esse valor pode indicar a presença de fontes de variação atuando no processo, como por exemplo, a pressão de recalque, que pode ter variado durante o processo de injeção.

Em seguida foram injetadas 26 peças em PA (Figura 86). O experimento foi encerrado devido aparecimento de rebarbas na 26ª peça e também devido a avarias na superfície do inserto que resultou num progressivo aumento na rugosidade na superfície das peças.



Figura 86 – Corpo de prova em PA injetado no inserto de PC.

Durante o processo de injeção a temperatura máxima no canal de injeção, medida pelo termopar, não ultrapassou de 56°C e o ciclo total foi de 138 s (2,3min), conforme mostra a Figura 87. É importante ressaltar que a temperatura real é um

pouco maior do que a medida pelo termopar, já que ele foi posicionado a aproximadamente 1mm da superfície do inserto.

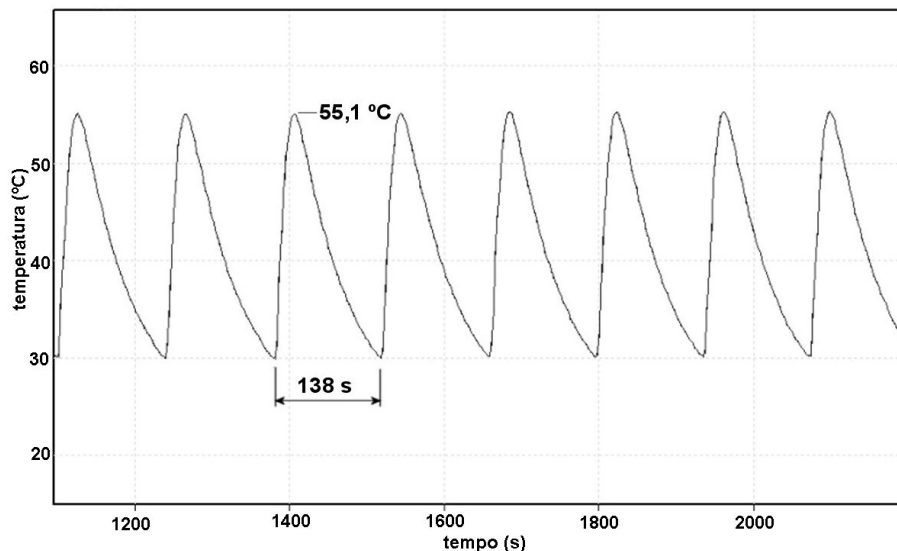


Figura 87 - Perfil da variação de temperatura para inserto de PC.

5.2.3 Injeção de peças em insertos de PPSF

Os insertos de PPSF foram utilizados para avaliar a possibilidade de injetar peças em POM, PA e ABS. Como o PPSF foi disponibilizado para utilização em máquinas de prototipagem rápida recentemente (junho de 2002), não foram encontradas referências sobre a sua afinidade química com outros materiais.

O controle da temperatura do inserto foi idêntico ao descrito para o inserto de PC. A Tabela 37 lista os principais parâmetros de injeção utilizados para injetar peças em POM (Celcon M90-45H - Ticona) e em PA (Technyl A-216 – Rhodia).

Tabela 37 - Parâmetros de injeção para o POM e para o PA (inserto de PPSF).

Parâmetros de Injeção	POM (M90-45H)	PA (A-216)
Pressão de injeção (Bar)	200	150
Pressão de recalque (Bar)	160	100
Tempo de recalque (s)	16	6
Velocidade de injeção (m/s)	0,05	0,05
Temperaturas no cilindro (°C)	182, 186, 192, 200, 205	260, 265, 280, 290, 292
Temperatura da água (°C)	14	14
Temperatura do inserto (°C)	30	30

Foi feita também uma tentativa de injetar peças em ABS, mas não foi possível estabilizar os parâmetros de injeção, por que houve problemas de aderência entre a peça e o inserto.

5.2.4 Resultados e discussões sobre a injeção em insetos de PPSF

Os insetos em PPSF foram utilizados para injeção de peças em POM, PA e ABS. Para a injeção de peças em POM o inserto teve um bom desempenho e foram injetadas 150 peças sem que houvesse nenhuma avaria aparente. Durante todo o processo de injeção as temperaturas no canal, medidas pelo termopar, ficaram entre 30°C (início da injeção) e 48°C e o tempo total do ciclo foi de 168s (2,78min). Também foram utilizadas 100 peças em POM para avaliar a repetibilidade do processo em termos de comprimento e massa. Os coeficientes de correlação foram de 0,951 para o comprimento e 0,946 para a massa, revelando uma melhora nos resultados em relação a massa comparativamente ao molde de PC.

A injeção de peças em PA apresentou resultados bem melhores do que os obtidos em moldes de PC. Foram injetadas 201 peças quando foi observado apenas o aparecimento de pequenas rebarbas devido a delaminação nas bordas (Figura 88), de fácil extração com o uso de um estilete.

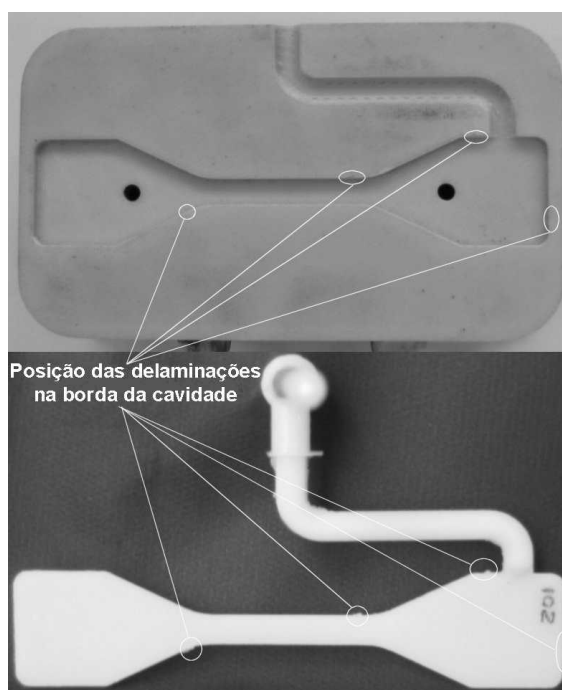


Figura 88 - Inseto de PPSF e última peça injetada em PA.

A temperatura máxima no canal de injeção, medida pelo termopar, não ultrapassou o valor de 50°C e o ciclo total foi de 108s (1,8min), conforme mostra a Figura 89.

Comparando os perfis de variação de temperatura para os insertos de PC e PPSF (Figura 87 e Figura 89) verifica-se uma redução de aproximadamente 7,6°C na temperatura máxima no inserto. Uma das causas para essa diminuição é o coeficiente de condutividade térmica do PPSF (0,35W/m.K) que é maior que o do PC (0,19W/m.K) e que permitiu melhorar a troca térmica com o sistema de refrigeração.

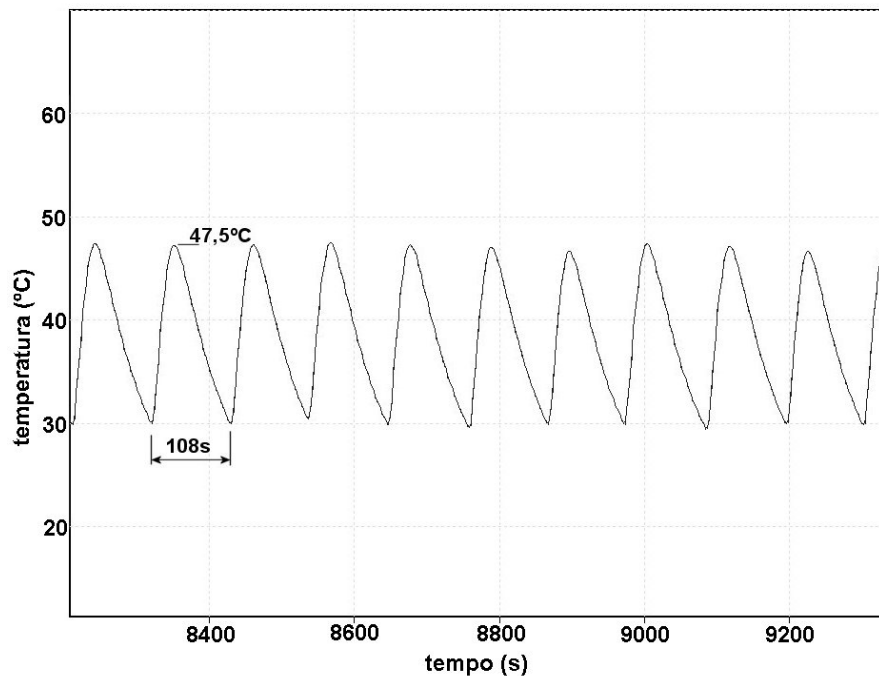


Figura 89 – Perfil da variação de temperatura para o inserto de PPSF.

O experimento foi encerrado com a tentativa de injeção de peças em ABS nos insertos de PPSF. Houve adesão entre a peça de ABS e o inserto, denotando afinidade química entre o ABS e o PPSF. Toda a região da cavidade foi impregnada com ABS. A Figura 90 ilustra os dois insertos depois da injeção da primeira peça.

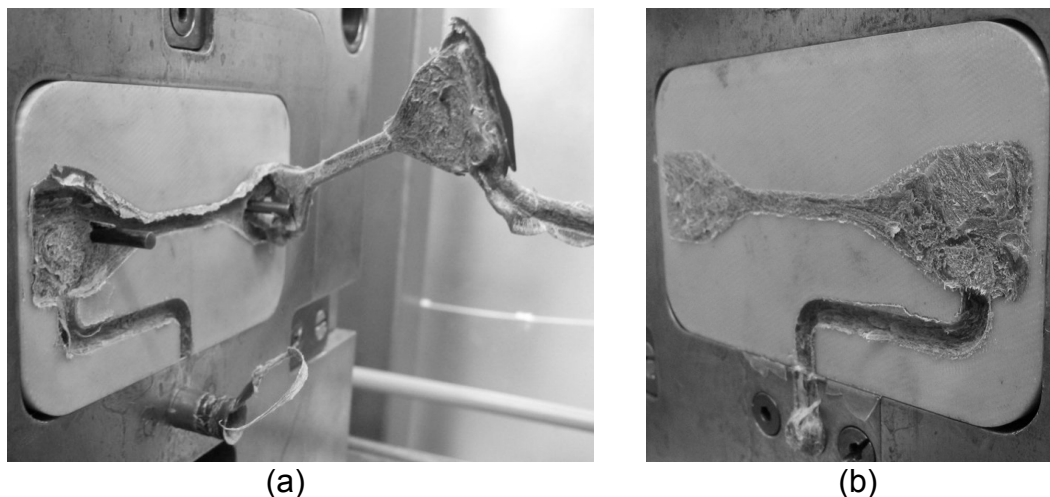


Figura 90 – Insertos em PPSF depois da injeção da primeira peça em ABS:
(a) Inseto móvel; (b) Inseto fixo.

5.2.5 Conclusões sobre a utilização de insertos de PC e PPSF na moldagem por injeção

Os experimentos comprovaram a superioridade do PC e do PPSF em relação ao ABS. Suas melhores propriedades mecânicas e térmicas garantiram a esses insertos um melhor desempenho na injeção de peças em POM e PA. No caso dos insertos de PC, os resultados obtidos permitem afirmar que é possível a injeção de mais de 170 peças de POM sem que o inserto apresente qualquer avaria. No caso da injeção de peças em PA, o número de peças ficou limitado a 26. O refinamento dos parâmetros de construção do inserto podem ajudar a aumentar esse valor, além de permitir uma melhora na qualidade das superfícies das peças injetadas.

Os melhores resultados foram obtidos com os insertos de PPSF. Além de alcançar um resultado semelhante ao PC na injeção de peças em POM, foi possível injetar 201 peças em PA, sendo que o inserto apenas apresentou pequenas delaminações nas bordas da cavidade que resultaram no aparecimento de rebarbas na peça. Não foi possível a injeção de peças em ABS nos insertos de PPSF por problemas de afinidade química. Uma solução seria a aplicação de um recobrimento metálico nesses insertos.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Este trabalho avaliou a utilização de insertos construídos pelo processo FDM na moldagem por injeção de termoplásticos sob diferentes aspectos. Inicialmente foram realizados diversos ensaios para conhecer melhor as propriedades de peças em ABS fabricadas por FDM. Em seguida foram fabricados insertos em ABS para avaliar dois conjuntos de parâmetros construtivos, denominados de padrões e refinados. Para aumentar a troca térmica dos insertos foram feitos experimentos com o uso de água gelada na refrigeração. Uma geometria do tipo macho/fêmea foi testada para a injeção de PP e PA. Na seqüência foram testados os recobrimentos cerâmico, metálico e polimérico para melhorar as propriedades térmicas e mecânicas das superfícies dos insertos. Finalmente foram construídos insertos em outros dois materiais, considerados de alto desempenho, disponíveis para a tecnologia FDM. A seguir serão apresentadas as principais conclusões e contribuições da pesquisa, resultantes das análises dos ensaios e experimentos supracitados.

Os ensaios de rugosidade permitiram escolher um conjunto de parâmetros construtivos, denominados parâmetros refinados, que resultaram numa superfície de melhor qualidade que as obtidas com os parâmetros padrões. Na análise dimensional linear foi visto que praticamente não houve diferença entre os erros nas direções X e Y (plano horizontal), enquanto que os erros nas dimensões na direção z (direção vertical) tiveram variações ligeiramente maiores, possivelmente devido a influência dos suportes. No caso das dimensões angulares, foi percebida uma diminuição do erro, com o aumento do ângulo utilizado na amostra. Isso pode ser atribuído a uma maior influência do efeito escada nos ângulos menores o que teria efeito sobre o método de medição.

Foi determinado o coeficiente de dilatação térmica do ABS P400 que resultou num valor bastante próximo ao do ABS comercial comumente utilizado para injeção de peças, enquanto que a temperatura de amolecimento ficou em torno de 10% menor. Nos ensaios de tração, os resultados mostraram que os corpos de prova

construídos com parâmetros refinados possuem uma resistência a tração 4% maior que os construídos utilizando os parâmetros padrões.

Os experimentos realizados para testar a utilização dos insertos de ABS na moldagem por injeção, iniciaram-se com a fabricação de um inserto utilizando os parâmetros construtivos padrões. Ficou comprovada a possibilidade da injeção de pequenos lotes de peças em PEBD e PP. Nesse estudo, foi verificado que os parâmetros construtivos utilizados não eram adequados para a construção dos insertos devido ao aparecimento de trincas na superfície em função da pouca adesão lateral entre os filetes.

No segundo experimento foi fabricado um inserto utilizando parâmetros construtivos refinados. Foram injetados 250 corpos de prova em PP sem o aparecimento de trincas na superfície. Dessa forma, com a melhora das propriedades mecânicas do inserto, os parâmetros construtivos utilizados se mostraram adequados para essa aplicação. No entanto, o uso desses parâmetros não dispensa o acabamento das superfícies com lixa para eliminar as marcas inerentes do processo. Outra observação importante foi que as superfícies lixadas, quando sujeitas as temperaturas e pressões de injeção, tendem a se moldar na camada inferior reproduzindo, de forma suavizada, um reticulado sobre a superfície. Foi testado o uso do método de preenchimento incompleto para a determinação dos parâmetros de injeção (tryout). Esse método não se mostrou adequado para o uso em insertos poliméricos, pois utiliza pressões muito altas no início do processo, e podem causar danos no inserto.

As propriedades mecânicas das peças injetadas em PP nos moldes em ABS são similares às injetadas em moldes metálicos, embora os ensaios de difração de raios X tenham detectado diferenças entre a estrutura cristalina das peças injetadas nos moldes de ABS e as injetadas nos moldes de aço.

Para aumentar a troca térmica nos moldes poliméricos, foi feito um experimento com o uso de tubos de cobre, encostados na parte posterior do inserto, para circulação de água gelada. Os resultados foram bastante positivos, pois mostraram que houve uma redução de até 44% no tempo de ciclo e uma queda de 2,7°C na temperatura máxima do inserto. Esses valores evidenciam a importância do uso de sistemas de refrigeração de insertos poliméricos pois, além do ganho em produtividade, ainda diminuem a permanência, no bico de injeção, do material a ser injetado evitando a sua degradação. É necessário ainda que sejam feitos estudos

para avaliar o efeito que o uso de água a baixas temperaturas pode causar nas propriedades das peças injetadas.

O experimento com insertos do tipo macho/fêmea foi realizado para avaliar a injeção de peças em PP e PA nesse tipo de geometria. O desempenho do inserto para a injeção de peças em PP foi considerado bom, visto que foram injetadas 150 peças sem que houvesse o aparecimento de danos relevantes. Já no caso da injeção das peças em PA o resultado foi negativo, pois embora não houvesse afinidade química entre o ABS e o PA, a temperatura de injeção era muito alta se comparada a temperatura de transição vítrea da matriz estirênica, o que causou o desgaste prematuro do inserto. Nesse estudo, ficou evidente que a escolha correta da disposição de construção, na máquina de prototipagem rápida, é um fator importante para evitar que os efeitos dos esforços de extração da peça danifiquem prematuramente o inserto.

Com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas e térmicas das superfícies dos insertos em ABS, foram feitos recobrimentos cerâmicos, metálicos e poliméricos. Inicialmente o uso da técnica sem eletrodo não forneceu bons resultados em função da fraca adesão do filme de Ni-P com o substrato de ABS. No entanto, em outro experimento que utilizou esse processo e em seguida o processo eletrolítico no recobrimento de um inserto de ABS com Ni-Cu-Cr, os resultados foram promissores. Nesse inserto foram injetadas peças de PP sem o aparecimento de avarias. Foram injetadas também peças em ABS, mas nesse caso a maior rigidez do material e a rugosidade da superfície provocaram uma forte aderência entre o inserto e a peça injetada, o que causou a retirada de uma região do filme durante a extração da peça. Além disso, as variações de temperatura durante o processo de injeção provocaram fissuras e corrugações na superfície do inserto devido às contrações diferenciadas entre filme e substrato.

O uso de um recobrimento polimérico nos insertos de ABS não produziu bons resultados para a injeção do ABS. O filme polimérico não teve suficiente adesão com o substrato e foi retirado, na região mais solicitada termicamente, na injeção das primeiras peças.

O último experimento testou outros dois materiais disponíveis nas máquinas FDM: o PC e o PPSF. Suas melhores propriedades mecânicas e térmicas, em relação ao ABS, garantiram a esses insertos um melhor desempenho na injeção de peças em POM e PA. Os melhores resultados foram obtidos com os insertos de

PPSF, pois além de alcançar um resultado semelhante ao PC na injeção de peças em POM, foi possível injetar 201 peças em PA, sendo que o inserto apenas apresentou delaminações nas bordas da cavidade que resultaram no aparecimento de pequenas rebarbas na peça. A injeção de peças em ABS não foi possível por problemas de afinidade química com o PPSF.

Os resultados dos experimentos realizados nesse trabalho permitem concluir que o uso do processo FDM para fabricação de insertos para serem usados na moldagem por injeção é possível desde que os materiais injetados sejam “compatíveis” com o material do inserto. A escolha dos materiais deve considerar principalmente a temperatura de injeção, a resistência mecânica e a afinidade química entre os polímeros. A rugosidade das superfícies das peças injetadas é uma das desvantagens do uso desse processo. Pode-se recomendar o uso de insertos em ABS para a injeção de materiais como o PP, PEBD e o PEAD. Os insertos de PC e os de PPSF podem ser usados para injetar todos esses materiais citados e ainda o POM e o PA. O PPSF foi o material que apresentou o melhor desempenho. A Tabela 38 lista resumidamente os experimentos com moldagem por injeção e o número de peças injetadas para cada inserto.

Tabela 38 – Resumo dos principais experimentos realizados com moldagem por injeção.

INSERTOS FABRICADOS POR FDM					PEÇAS INJETADAS	
Geometria	Material	Parâmetros Construtivos	Recobertos	Refrigeração	Material	Nº de peças
Escada	ABS	Padrão	Não	Não	PEBD	30*
					PP	120
CDP ⁹	ABS	Refinado	Não	Não	PP	250
CDP	ABS	Refinado	Não	Sim	PP	50*
					PEAD	20*
					POM	20
Macho/Fêmea	ABS	Refinado	Não	Sim	PP	150*
					PA	18
Macho/Fêmea	ABS	Refinado	Sim	Sim	PP	15*
					ABS	50
CDP	PC	Padrão	Não	Sim	PP	60*
					POM	170*
					PA	26
CDP	PPSF	Padrão	Não	Sim	POM	150*
					PA	201

* Experimento encerrado antes do inserto apresentar avarias.

⁹ CDP = Corpo de Prova.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho pode ser considerado como um dos primeiros na área de ferramental rápido direto utilizando o processo FDM de prototipagem rápida. A abordagem utilizada explorou vários aspectos do processo e envolveu inúmeros experimentos. Para dar continuidade a essa pesquisa são destacadas a seguir sugestões para trabalhos futuros.

- Avaliar o efeito do uso da refrigeração com água a baixas temperaturas nas propriedades das peças injetadas em moldes poliméricos.
- Testar a utilização da técnica denominada “Canais Incorporados” em insertos feitos por FDM.
- Estudar o processo sem eletrodos (*electroless*) para ser utilizado no recobrimento de peças de ABS, PC e PPSF construídas pelo processo FDM.
- Testar a injeção de peças com mais detalhes construtivos, como furos, encaixes e saliências em moldes fabricados pelo processo FDM.
- Estudar a utilização de moldes poliméricos com postigos metálicos nas regiões mais solicitadas termicamente.

REFERÊNCIAS

3D SYSTEMS; **3D Lightyear Winhelp**, version 1.1, Valencia, CA, USA, 2000.

3D SYSTEMS; **Direct AIM Course Guide**. Education Center, Valencia, CA, USA, June, 1997.

AHN, S.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT, P.K. "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS" **Rapid Prototyping Journal**, v.8, n.4, p.248-257, 2002.

AHRENS, C.H.; RIBEIRO, A.S.; BEAL, V.E. "An alternative cooling technique for stereolithography moulds". **Time-Compression Technologies 2001 Conference**. United Kingdom, 2001.

AHRENS, C.H.; FERREIRA, A.C.; SALMORIA, G.; LAFRATTA, F.H.; VOLPATO, N.; FOGGIATTO, J.A. "Estudo da estrutura e propriedades de peças de PP moldados por injeção em ferramentas de prototipagem". **Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT**, Natal, 2002.

ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P. "Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling", **Journal of Materials Processing Technology**, 118, p.385-388, 2001.

BADOTTI, A. V. B. **Avaliação do processo de metalização superficial aplicado em peças obtidas pelo processo de estereolitografia**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BARLOW, J.W.; BEAMAN, J.J.; BALASUBRAMANIAN, B. "A rapid mould-making system: material properties and design considerations" **Rapid Prototyping Journal**, v.2, n.3, p.4-15, 1996.

BARRY, C.; BOOTHROYD, P.; LAI, F.; NUNN, R.E.; ORROTH, S.A.; SCHOTT N.R. **Short Shot Method of Injection Molding**. 6.ed., Plastics Processing Laboratory Syllabus, University of Massachusetts, Lowell-Plastic Engineering Department, 1995. 61 p.

- BEAL, V. E. **Avaliação do Uso de Insertos obtidos por Estereolitografia na Moldagem de Pós Metálicos por Injeção**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BELLINI, A.; GÜÇERI, S. "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling" **Rapid Prototyping Journal**, v.9, n.4, p.252-264, 2003.
- BERINS, M. L. **SPI - Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry**. 5. Ed. Kruwer Academic Publishers, London, 1991. 869 p.
- BUSATO, F.A. **Parâmetros de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes fabricados por estereolitografia com resina SOMOS 7110**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CEDORGE, T.; BAUT, Y.; PALMER, A.; COLTON, J. "Design rules for stereolithography injection molding inserts". **Proceedings of 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing**, Nottingham, UK. p.193-209, 1999.
- CEDORGE, T.; COLTON, J. "Draft angle and surface roughness effects on stereolithography molds" **Polymer Engineering and Science**, v.40, n.7, p.1581-1588, 2000.
- CHANDA, M.; ROY, S.K. **Plastic Technology Handbook**, New York: Marcel Denker, 1987.
- CHOI, S.H.; SAMAVEDAM, S. "Visualization of rapid prototyping" **Rapid Prototyping Journal**, v.7, n.2, p.99-114, 2001.
- CHUA C.K.; HONG, K.H.; HO, S.L. "Rapid Tooling Technology. Part 1. A Comparative Study" **Int J Adv Manuf Technol**, v.15, p.604-608, 1999.
- DARÉ, G. **Proposta de um Modelo de Referência para o Desenvolvimento Integrado de Componentes de Plástico Injetados**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- DICKENS, P. M. "*Rapid tooling techniques*" **Proceedings of EuroMold'99 Conference, RP's Strategic Benefits and Risks**, Frankfurt, Germany, 1999.

DOMENECH, S.C.; LIMA Jr, E.; DRAGO, V.; BORGES Jr, N.G.; AVILA, A.O.V.; SOLDI, V. "Electroless plating of nickel–phosphorous on surface-modified poly(ethylene terephthalate) films" **Applied Surface Science**, n. 220, p. 238-250, 2003.

DSM; **White Paper**. Design & Application Development Centre, 1999.

FERREIRA, E.C.; NEVES, N.M.; MUSCHALLE, R.; POUZADA, A.S. "Friction properties of thermoplastics in injection moulding", **Proceedings of SPE: ANTEC 2001 Conference**, Dallas, p.1546, 2001.

GEIGER, M.; ÖZEL, T. "Development of Rapid Tooling for Injection Molding using Metal Filled Stereolithography (SLA) Cavity Inserts" **Proceeding of the 2nd International Conference on Design and Production of Dies and Molds**, Kuzadasi, Turkey, 2001.

GOMIDE, R.B. **Fabricação de Componentes Injetados com Uso de Insetos de Resina Termofixa Produzidos por Estereolitografia**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GONÇALVES, M.W. **Estudo das particularidades de moldes utilizados para a injeção de termoplásticos fabricados por estereolitografia**. 2003. Projeto de Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GOODFELLOW **Material Information**, 2004. Disponível em:
<<http://www.goodfellow.com>>. Acesso em: 26 de julho de 2004.

GROOVER, M.P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems**. London: Prentice-Hall International, 1996.

HARRIS, R.A.; HAGUE, R.J.M.; DICKENS, P.M. "The structure of parts produced by stereolithography injection mould tools and the effect on part shrinkage" *International Journal of Machine /tools & Manufacture*, n.44, p.59-64, 2004.

HARPER, C.A. **Modern Plastic Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2000.

HYPertextBOOK **Physics**, 2004. Disponível em:
<<http://www.hypertextbook.com/physics>>. Acesso em: 20 de julho de 2004.

HOPE, R.L.; ROTH, R.N.; JACOBS, P.A. "Adaptive slicing with sloping layer surfaces" **Rapid Prototyping Journal**, v.3, n.3, p.89-98, 1997.

HOPKINSON, N. "Injection Moulding into FDM Tool" **Internal Report**, Rapid Manufacturing Research Consortium, De Montfort University, UK, June 2001. Disponível em http://www.lboro.ac.uk/departments/mm/research/rapid-manufacturing/consortium/project/FDM_ABStools.pdf, acesso em 05/03/05.

HOPKINSON, N.; DICKENS, P.M. "Predicting stereolithography injection mould tool behavior using models to predict ejection force and tool strength", **International Journal of Production Research**, v.38, n.16, p.3747-3757, 2000.

HOPKINSON, N.; TROMANS, G. "Rapid tooling state of the art" **Internal Report**, Rapid Manufacturing Research Consortium, Loughborough University, UK, February 2003.

JACOBS P.F. "Rapid Tooling" **World Class Design to Manufacture**, v.2, n. 6, p.42-50, 1995.

JACOBS P.F. **Stereolithography and other RP&M Technologies**, New York, ASME Press - Society of Manufacturing Engineers, 1996. 392 f.

JACOBS P.F. "Recent advances in rapid tooling from stereolithography" **Proceedings of Seventh International Conference on Rapid Prototyping**, San Francisco, p.338-354, 1997.

KAI, C.C.; FAI, L.K. **Rapid prototyping: principles & applications in manufacturing**, Singapura: John Wiley & Sons, 1997. 317 f.

KARAPATIS, N.P.; van GRIETHUYSEN, J.P.S.; GLARDON, R. "Direct Rapid Tooling: A Review of Current Research". **Rapid Prototyping Journal**, v.4, n.2, p.77-89, 1998.

KATTETHOTA, G.; HENDERSON, M. "A Design Tool to Control Surface Roughness in Rapid Fabrication" **Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium**, Austin, Texas, p.327-334, 1998.

KING, D.; TANSEY, T. "Alternative materials for rapid tooling" **Journal of Materials Processing Technology**, 121, p.313-317, 2002.

KULKARNI, P.; MARSAN, A.; DUTTA, D.A. "Review of process planning techniques in layered manufacturing". **Rapid Prototyping Journal**, v.6, n.1, p.18-35, 2000.

KRUTH, J.-P. "Material increment manufacturing by rapid prototyping techniques" **Annals of the CIRP**, v.40, n.2, p.603-614, 1991.

- KRUTH, J.-P.; LEU, M.C.; NAKAGAMA “Progress in additive manufacturing and rapid prototyping” **Annals of the CIRP**, v.47, n.2, p.525-540, 1998.
- LAFRATTA, F.H. **Uso de fluido refrigerante, temporariamente confinado, em ferramental rápido para a injeção de termoplásticos**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- LENCINA, D. C. **Fabricação rápida de ferramentas produzidas por estereolitografia e recobertas com níquel-fósforo depositado por eletroless - com estudos de caso em moldagem de plásticos por injeção e fundição em areia aglomerada por resinas do tipo caixa fria**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- LEU, M.C.; ZHANG, W. “Research and development in rapid prototyping and tooling in the United States” **Proceedings of the First International Conference on RP&M 98**, Tsinghua University, Beijing, China, p.707-718, July 21-23, 1998.
- LI, Y.; GARGIULO, E.P.; KEEFE, M. “Studies in direct tooling using stereolithography” **Transactions of the ASME**, v.122, p.316-322, 2000.
- LUCAS, E.F.; SOARES, B.G.; MONTEIRO, E.E.C. **Caracterização de Polímeros – Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2001. 366 p.
- MARGOLIS, J.M. **Decorating Plastics**. New York: Carl Hanser Verlag, 1986. 135p.
- MASOOD, S.H.; SONG W.Q.; HODGKIN, J.K.; FRIEDL, C. “Rapid Tooling for Injection Moulding using Fused Deposition Modelling”, **Proceedings of 57th ANTEC – Annual Technical Conference**, New York, 1999.
- MASOOD, S.H.; SONG W.Q. “Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling”, **Material and Design**, v.25, n.7, p.587-594, 2004.
- MATWEB **Material Property Data**, 2004 .Disponível em: <<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 22 de julho de 2004.
- MENGES, G. **How to Make Injection Molds**. Munich: Hansen Gardner Publications, 1993. 540 p.

- PENNINGTON, R.C.; HOEKSTRA, N.L.; NEWCOMER, J.L. "Significant factors on the dimensional accuracy of fused deposition modeling" **Proceedings of 61st ANTEC – Annual Technical Conference**, v.1, p.880-883, Nashville, 2003.
- RADSTOK, E. "Rapid Tooling". **Rapid Prototyping Journal**. v.5, n.4. p.164-168, 1999.
- RIBEIRO Jr., A.S. **Proposta de utilização de ferramentas CAE no planejamento do processo de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes de estereolitografia**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis
- RODRIGUEZ, J.F.; THOMAS, J.P.; RENAUD, J.E. "Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials". **Rapid Prototyping Journal**, v.6, n.3, p.175-185, 2000.
- RODRIGUEZ, J.F.; THOMAS, J.P.; RENAUD, J.E. "Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials - Experimental investigation". **Rapid Prototyping Journal**, v.7, n.3, p.148-158, 2001.
- ROSATO, D.V.; ROSATO, M.G.; ROSATO, D.V. **Concise Encyclopedia of Plastics**, London: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- ROSOCHOWSKI, A.; MATUSZAK, A. "Rapid Tooling: the State of the Art" **Journal of Materials Processing Technology**, 106, p.191-198, 2000.
- RUTGERS, The State University of New Jersey **Fused Deposition Modeling – Tips**, 1998. Disponível em <<http://www.caip.rutgers.edu>>. Acesso em: 02 de outubro de 2003.
- SABINO NETTO, A. C. **Proposta de sistemática para avaliação de soluções de projeto de componentes moldados por injeção auxiliada por protótipos físicos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SALMORIA, G V.; AHRENS, C.H.; BUSATO, F.; PIRES, A.T.N. "Análise de falhas em moldes fabricados por estereolitografia e utilizados na injeção de PP e PA6.6". **Anais do VII Congresso Brasileiro de Polímeros**, Belo Horizonte, 2003.

- SANCHEZ, E.M.S.; FERREIRA, M.M.C.; FELISBERTI, M.I. "Avaliação da Degradação Térmica e Fotooxidativa do ABS Automotivo" **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.9, n.4, p.116-122, 1999.
- SAURKAR, S.; MALLOY, R.; McCARTHY, S. "Rapid Tooling: A Study of Different Cooling Techniques for Mold Inserts Used in the Direct AIM (ACES Injection Molding) Process" **Proceedings of 57th ANTEC – Annual Technical Conference**, v.45, n.1, p. 1105-1108, New York, 1999.
- SEGAL, J.I.; CAMPBELL R.I. "A review of research into the effects of rapid tooling on part properties" **Rapid Prototyping Journal**, v.7, n.2, p.90-98, 2001.
- SCHULTHESS, A. "New resin developments for Stereolithography electroless plating of SL parts" **Proceedings of Society of Manufacturing Engineers (SME)**, Rapid Prototyping and Manufacturing conference, Dearborn, Michigan, 1994.
- STRATASYS INC. **FDM 2000 Manual**, Stratasys Document nº 105215-0001 Rev. 5B, Eden Prairie, USA, 2001.
- STRATASYS INC. **Corporate Narrative**, 2002. Disponível em <<http://www.stratasys.com>>. Acesso em: 11 de junho de 2002.
- STRATASYS INC. **Customer Extranet**, 2004. Disponível em <<http://www.stratasys.com>>. Acesso em: 10 de agosto de 2004.
- ULRICH, K.T.; EPPINGER, S.D. **Product design and development**, McGraw-Hill, 1995. 384 f.
- VANDRESEN, M. **Aplicação da técnica do núcleo perdido na injeção de peças complexas, em moldes de ferramental rápido, a partir da estereolitografia**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- VASUDEVARAO, B.; NATARAJAN, D.P.; HENDERSON, M. "Sensitivity of RP Surface Finish to Process Parameter Variation" **Solid Freeform Fabrication Proceedings**, Austin-Texas, p.251-258, 2000.
- WANG, H. **Concurrent Design of Products, Manufacturing Processes and Systems**, Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1998. p. 153-178.
- WICK, C. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Materials, Finishing, and Coating**, 4. Ed., Michigan: Society of Manufacturing Engineers; 1985.

WOHLERS, T.; **Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report**. Colorado: Wohlers Associates, 2002.

WOHLERS, T.; **Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report**. Colorado: Wohlers Associates, 2004.

ZIEMIAN, C.W.; CRAWN III, P.M. "Computed aided decision support for fused deposition modeling", **Rapid Prototyping Journal**. v.7, n.3, p.138-147, 2001.

ANEXO 1 – PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO

Parâmetros utilizados na fase de fatiamento

Slice height (altura da fatia): Permite fixar a altura de cada fatia a ser utilizada no processo de fatiamento. Esse parâmetro pode assumir os valores 0,178mm ou 0,254mm quando associado ao uso dos bicos extrusores T10 ou T12. A alteração desses valores é feita no menu *Modelers*.

Slicing top height: (altura da fatia de topo): Realiza o fatiamento até a altura especificada, ajustando esse valor em função da altura da fatia utilizada.

Slicing bottom height (altura da fatia de base): O fatiamento é realizado a partir da altura especificada, ajustada de acordo com a altura da fatia utilizada.

Merge open curve tolerance (tolerância para fechamento de curvas abertas): Durante o processo de fatiamento, se o arquivo STL não estiver completamente fechado, ocorrerá o aparecimento de curvas abertas (perímetros não fechados). Esse parâmetro permite definir uma distância máxima entre dois extremos de curvas abertas que poderão ser fechadas automaticamente.

Curve filtering tolerance (tolerância de filtragem das curvas): Tolerância de afastamento das cordas utilizado para filtrar as curvas da peça depois que o fatiamento é realizado. Permite garantir a forma da curva com a interpolação de alguns pontos.

Parâmetros para a construção dos suportes

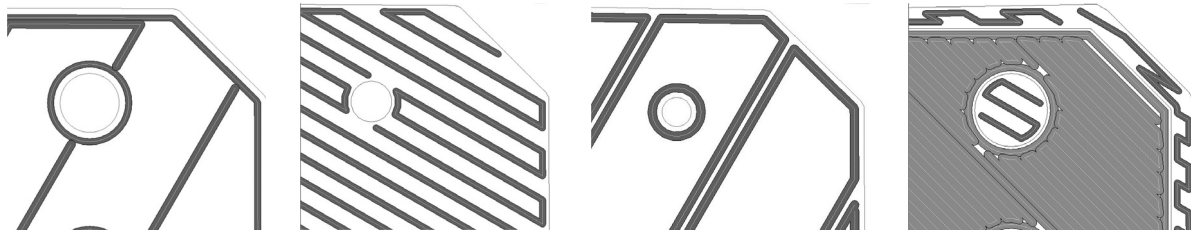
Support style (estilo do suporte): Permite a escolha dos seguintes tipos de suportes:

--Sparse (esparso): É o suporte utilizado como padrão, pois são gerados com o mínimo de material diminuindo assim o tempo de construção e o consumo de material. Outra vantagem é sua facilidade de extração (Figura 91a).

--Basic (básico) Cria suportes com uma rigidez estrutural maior que o tipo sparse (Figura 91b).

-- Break-away (quebra fácil): São construídos na forma de caixa e comparativamente são bastante parecidos com o tipo sparse, no entanto são mais fáceis de extrair e o tempo de construção é maior (Figura 91c).

-- Surround (ao redor): Indicado para situações onde há risco da geometria cair durante a construção (por exemplo, em peças esbeltas fabricadas na vertical). Este suporte é construído externamente a geometria garantindo-lhe sustentação (Figura 91d). Quando esse estilo for utilizado pode-se definir a espessura que terá o suporte ao redor da peça através do parâmetro depth.



(a) Sparse

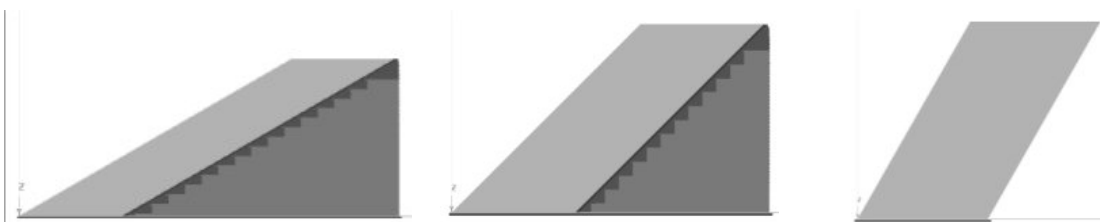
(b) Basic

(c) Break-away

(d) Surround

Figura 91 – Tipos de suportes.

Self supporting angle (ângulo de auto suporte): Esse ângulo, medido a partir da horizontal, é usado para controlar a partir de qual inclinação serão construídos os suportes para dar sustentação às paredes inclinadas. Seus valores são pré-definidos e podem assumir os valores: 30, 35, 40, 45, 50, 60 e 70°, sendo que o valor padrão é 45°. As paredes da peça com ângulos maiores ou iguais que o configurado serão construídas sem suportes. Por exemplo, se um ângulo de 50° for utilizado, as paredes com 30 e 45° terão suportes e uma parede com 60° será construída sem a utilização desses (Figura 92).



(a) Parede a 30°

(b) Parede a 45°

(c) Parede a 60°

Figura 92 – Paredes com ângulo de auto suporte (self supporting angle) ajustadas para 50°.

Grow supports (suportes crescentes ou variáveis): É utilizado para aumentar a estabilidade com a criação de suportes cada vez mais largos abaixo da peça. O padrão é a utilização do parâmetro small only (pequeno apenas) que constrói esse

tipo de suporte apenas em detalhes pequenos do protótipo. É possível configurar para usá-lo sob todas as regiões (parâmetro all) ou não utilizá-lo (parâmetro no).

Starting height (altura de início): Altura usada para controlar o início de um novo conjunto de suportes para a peça. Seu uso é opcional, e na configuração padrão ele não é usado.

Support to create (suporte a criar): Usado para especificar quais tipos de suporte serão construídos. É possível especificar os parâmetros support and base (suporte e base), only support (apenas suporte) e only base (apenas base).

Contour base (contorno da base): Quando habilitado esse parâmetro constrói a base contornando a geometria da peça. Caso contrário é construído um retângulo com dimensões suficientes para conter toda a peça.

Base oversize (sobre-distância da base): Parâmetro que define uma distância excedente da base em relação à peça. Por exemplo, para um cubo de dimensões 80 x 80 x 80mm será construída uma base de 120 x 120mm se o parâmetro Base oversize for igual a 20mm.

Base layers (camadas da base): Número de camadas que será utilizado na construção da base. Um número maior de camadas confere a peça maior estabilidade durante a construção, porém utiliza uma maior quantidade de material.

Perforation interval height (altura do intervalo do picote): Parâmetro utilizado para definir o intervalo em que serão construídos suportes com ligações fracas (picotes). Estes suportes são criados com a finalidade de facilitar a sua extração.

Parâmetros da fase de preenchimento¹⁰

Part fill style (estilo de preenchimento da peça): Especifica o estilo para o preenchimento da peça. A opção *perimeter/raster* (perímetro/varredura) é a mais utilizada e permite a construção das camadas com a extrusão do material nos perímetros que delimitam a fatia e em seguida preenche seu interior seguindo uma trajetória com parâmetros pré especificados (Figura 93). O estilo *contour to depth* (profundidade de contorno) possibilita a inclusão de contornos internos adicionais ao

¹⁰ Valores para bico T12.

perímetro da fatia (Figura 94). O número de contornos é especificado no parâmetro *depth of contours* (número de contornos).

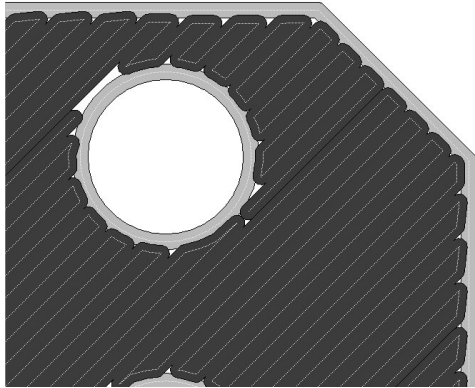


Figura 93 - Estilo de preenchimento perímetro / varredura (*perimeter / raster*)

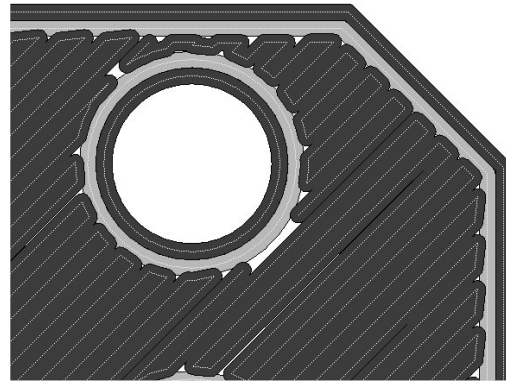


Figura 94 - Estilo de preenchimento profundidade de contorno (*contour to depth*) com 2 contornos.

Contour width (largura do contorno): Define a largura do perímetro (contorno) que delimita a geometria da fatia. São 20 valores pré-definidos que estão na faixa entre 0,305mm e 0,980mm, sendo que o valor padrão é 0,508mm.

Depth of contour: (número de contornos): Essa opção é válida apenas para o estilo de construção *Contour to depth* (Profundidade de contorno) e determina a quantidade de contornos da geometria da fatia. Seus valores podem assumir os valores: 0, 1, 2, 3, 4, 5 e 10 contornos, sendo que o valor padrão é 2.

Part raster width (largura da varredura da peça): Determina a largura utilizada no preenchimento da parte interna da fatia delimitada pelos contornos e seus valores podem variar de 0,305mm a 0,980mm, sendo que o valor padrão é 0,508mm.

Part interior style (Estilo de preenchimento da peça): Permite escolher um estilo de preenchimento para o interior da peça. As opções são:

--*Solid fine* (sólido fino): Preenche a fatia completamente (Figura 95).

--*Solid double wide* (sólido dupla largura): preenche a fatia completamente otimizando o tempo de construção da peça (Figura 96).

--*Sparse* (esparso): Minimiza a quantidade de material utilizado no *raster* garantindo também um menor tempo para a construção da peça (Figura 97). Para

peças com muitos detalhes (furos, nervuras, cavidades) ou com uma geometria que se altere constantemente o uso dessa opção pode aumentar o tempo de fabricação.

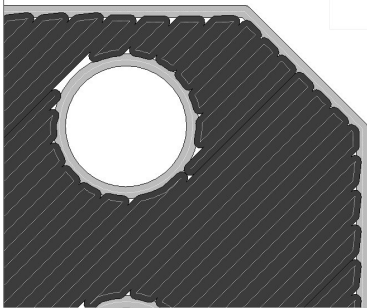


Figura 95 – Estilo sólido fino (*solid fine*)

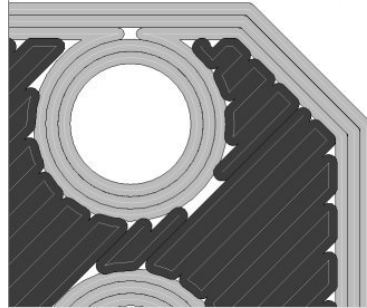


Figura 96 – Estilo sólido dupla largura (*solid double wide*)

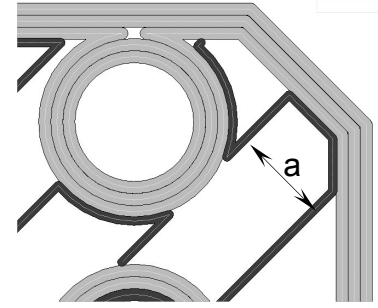


Figura 97 – Estilo esparso (*sparse*)

Part interior depth (contornos no interior): Parâmetro similar ao *Depth of contour* (Números de contornos) que permite a especificação do número de contornos da geometria das fatias do interior da peça, portanto não é válida nas camadas da base e do topo. Essa opção não é ativa para o parâmetro de preenchimento *solid-fine*. É possível a especificação dos valores: 0, 1, 2, 3, 4, 5, e 10 contornos, sendo que o valor padrão é 2 contornos.

Raster angle (Ângulo de varredura): Ângulo que define a orientação dos filetes extrudados durante o preenchimento, sendo que seus valores são pré-especificados e variam de 15 em 15°. De camada para camada este ângulo é alternado em 90° propiciando uma trama no preenchimento e aumentando a resistência da peça. Como exemplo, observa-se na Figura 96 que foi utilizado um ângulo de 45° (padrão).

Part sparse fill air gap (Espaço entre os filetes de preenchimento): Permite especificar a distância entre os filetes de preenchimento para o caso de se utilizar o estilo de preenchimento *sparse* (esparso). A Figura 97 ilustra esse parâmetro, que pode variar de 0 a 12,7 mm, com a distância “a”.

Part xy shrink factor (Fator de contração em xy): Parâmetro que permite inserir um fator de contração no plano xy (plano da fatia) da peça a ser prototipada. Os valores podem variar entre 1 e 1,1 e o valor padrão é 1,007.

Part z shrink factor (Fator de contração em z): Permite inserir um fator de contração para a direção z (altura) da peça a ser prototipada. Os valores podem variar entre 1 e 1,1 e o valor padrão é 1.

Seam control (controle da costura): Altera o local onde o bico inicia o processo de deposição. O início da deposição feito sempre a partir do mesmo ponto pode gerar um defeito superficial denominado costura. Para minimizar esse efeito ela pode ser posicionada em um local mais conveniente ou ser distribuída ao longo da altura da peça. Esse parâmetro pode ser ajustado para três opções:

- *align* (alinhado): alinha o início do bico no ponto escolhido;
- *random* (aleatório): selecionando-se mais de uma linha o local de início de cada trajeto é alternado;
- *automatic* (automático): gera um percurso automático.

Parâmetros utilizados na criação de grupos de preenchimento

Além dos parâmetros de preenchimento já descritos, os seguintes parâmetros podem ser utilizados durante a definição dos grupos:

Air gaps between contours and rasters (Espaço entre contornos e a varredura): Este parâmetro controla a distância entre o(s) filete(s) de contorno externo e os de preenchimento interno da peça. O valor padrão é zero, ou seja eles se tangenciam. A distância entre eles pode estar entre -0.127 até 1.270 mm. Distâncias negativas significam interferência (sobreposição), já distâncias positivas causam um espaçamento entre eles.

Air gaps between adjacent rasters (Espaço entre filetes de varredura): Similarmente ao anterior esta variável controla a distância entre os filetes de preenchimento. O valor padrão é zero, mas pode variar de -0.127 a 1.270 mm.

Other raster fill controls delta angle. (ângulo de variação dos filetes entre camadas): É o ângulo formado pela direção dos filetes de varredura entre camadas sucessivas. O valor padrão é 90 graus, mas pode se ajustado entre 0 e 90 graus, variando de 15 em 15 graus.

Align rasters.(alinhamento de varredura): Se esta opção estiver ativada, os filetes do *raster* estarão sempre na mesma direção. É o mesmo que ajustar o parâmetro *Other raster fill controls delta angle* como igual a zero.

Open curve width (largura para curvas abertas): Parâmetro que regula a largura do *raster* a ser usado quando houverem curvas abertas. O valor padrão é 0.508mm, mas pode estar entre 0.305 e 0.980mm

Open curve location (localização para as curvas abertas): Indica como os filetes do *raster* devem estar posicionados relativos as curvas abertas. O padrão é *Center* (centro) e podem ser escolhidas as opções *left* (esquerda) ou *right* (direita).

ANEXO 2 – POLÍMEROS UTILIZADOS PARA A INJEÇÃO

- Polipropileno (PP) – Braskem H301



Folha de dados de produto
Rev. 2 - 26/07/2002

Polipropileno

H 301

Subfamília

Homopolímero

Descrição

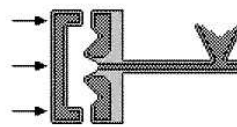
O H 301 é uma resina de Polipropileno de médio índice de fluidez, aditivada para uso geral. Indicada para moldagem por injeção e extrusão de fibras. Produto atóxico, apresenta excelente processabilidade com boa estabilidade do fundido, bom balanço rigidez/impacto e baixa transferência de odor e sabor.

Aplicações

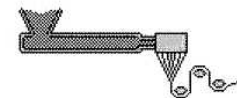
Utilidades domésticas
Tampas com lacre ou flip-top
Filamento contínuo para cordas e tapetes
Fibra cortada para carpetes e cobertores

Processo

Moldagem por Injeção



Extrusão de Fibras




Propriedades de Controle

	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (230°C/2,16kg)	D-1238-L	g/10 min	10

Propriedades Típicas - PP

	Método ASTM	Unidades	Valores
Densidade (23°C)	D-792A	g/cm ³	0,905
Módulo de Flexão	D-790	GPa	1,42
Resistência a Tração no Escoamento	D-638	MPa	34
Alongamento no Escoamento	D-638	%	11
Dureza Rockwell	D-785-A	Escala R	93
Resistência ao Impacto IZOD a 23°C	D-256-A	J/m	25
Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) a 1820kPa	D-648	°C	58
Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) a 455kPa	D-648	°C	93
Temperatura de Amolecimento Vicat - 1kg	D-1525	°C	154

• Polipropileno (PP) PH 1310 – Ipiranga



[Busca de Produtos](#) | [Links](#) | [Mapa do Site](#) | [English](#) | [Español](#)

PRODUTOS
[Catálogo de Produtos](#)
[Fichas de Segurança](#)
[Certificados](#)
[Busca de Produtos](#)
[Literatura Técnica](#)
[Problemas e Soluções](#)
[Propriedades](#)
[Glossário](#)

A Empresa

Produtos

Logística

Meio Ambiente

Qualidade


Informação

PRODUTOS > Catálogo de Produtos / PP / Injeção

Catálogo de Produtos

PEAD | PEBDL | PEMD

Polipropileno


 versão para impressão

Escolha o processo: Injeção

PP / Homopolímero / Injeção

PH 1310

A resina PH 1310 é um polipropileno homopolímero desenvolvida para moldagem por injeção, apresentando excelente processabilidade, produtividade e boa rigidez. Indicado para peças com média espessura de parede.



Aplicações

Injeção

- Brinquedos
- Móveis
- Tampas
- Tampas com lacre
- Utilidades domésticas

Propriedades

MFR 230/2, 16

Tensão no Escoamento

Alongamento no Escoamento

Módulo de Flexão Tangente a 1 %

Dureza Shore D/15

Dureza Rockwell R

Resistência ao Impacto Izod a 23°C

Opacidade (em placa 1,6 mm)

Temperatura de Deflexão sob Carga a 455 kPa

Vicat Softening Point a 9,8 N

Os valores para as propriedades citadas são usuais para este produto, sendo que os mesmos refletem a situação atual, podendo ser alterados a qualquer momento sem comunicação prévia.

Observações

1. A resina atende às exigências do FDA (*Food and Drug Administration*) contidas no 21 CFR 177.1520 (a) 1i. Os aditivos presentes na resina atendem às exigências de suas respectivas regulamentações FDA e aquelas contidas no 21 CFR 177.1520 (b) para contato com todos os tipos de alimentos.
2. Esta resina cumpre com a regulamentação da ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária do Brasil), referente a embalagens e equipamentos plásticos em contato com todos os tipos de alimentos, da temperatura de congelamento até 80°C, conforme laudo do Instituto Adolfo Lutz. O laudo do Instituto Adolfo Lutz está disponível na página de certificados de produtos.
3. Possui laudo do Instituto Adolfo Lutz de citotoxicidade ou reatividade biológica *in vitro* conforme normas ASTM F895 – 84 e ISO 10993 – 5.
4. Resina classificada como PP0110B77165 conforme norma ASTM D 4101 - 03.
5. Para informações de segurança, manuseio, proteção individual, primeiros socorros e disposição de resíduos, consultar a FISPQ - Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos, disponível no site. Esta resina está registrada sob o nº CAS 9003-07-0.
6. As informações aqui disponibilizadas têm como base o conhecimento e a experiência atuais da IPQ. Cabe salientar que diversos fatores podem afetar as propriedades do produto acabado, tais como as condições de processamento e uso do produto final, os quais estão fora do controle da IPQ. Com isso, as informações aqui disponibilizadas não podem ser tomadas como garantia da IPQ e o transformador não está isento da responsabilidade de realizar seus próprios controles e ensaios sobre os artigos que produz. Em caso de dúvidas, entre em contato com a Assistência Técnica, através do e-mail: deproipq@ipiranga.com.br.

Última atualização: 21 de Maio de 2004

Recomendações de Processamento

Perfil de Temperatura:

- Alimentação: 180°C
- Rosca: 190º a 220°C
- Bico: 50 %
- Molde: 10º a 20°C

Norma	Unidade	Valores
ASTM D 1238 - 00	g/10 min	13 ± 2
ASTM D 638 - 97	MPa	36
ASTM D 638 - 97	%	8,2
ASTM D 790 - 97	MPa	1550
ASTM D 2240 - 03	-	72
ASTM D 785 - 98	-	111
ASTM D 256 - 03	J/m	35
ASTM D 1003A - 00	%	90
ASTM D 648 - 97	°C	100
ASTM D 1525 - 97	°C	153

- ABS GE GPM 6300

CYCOLAC ABS Resin

PROPERTY	ENGLISH UNITS (SI UNITS)	TEST METHOD	CYCOLAC GPM4700 resin	CYCOLAC GPM5500 resin	CYCOLAC GPM5600 resin	CYCOLAC GPM6300 resin	CYCOLAC GPM7300 resin	CYCOLAC DSK resin
MECHANICAL								
Tensile Strength, yield, Type 1, 0.125" (3.2 mm)	psi(MPa)	ASTM D 638	6,000(41)	6,500(45)	5,500(38)	6,400(44)	9,400(65)	6,100(42)
Tensile Modulus, Type I, 0.125" (3.2 mm)	psi(MPa)	ASTM D 638	290,000(2,000)	330,000(2,275)	300,000(2,070)	340,000(2,345)	460,000(3,170)	350,000(2,410)
Tensile Elongation, yield, Type I, 0.125" (3.2 mm)	%	ASTM D 638	—	—	—	—	—	34
Tensile Elongation, break, Type 1, 0.125" (3.2 mm)	%	ASTM D 638	—	20.0	—	—	—	—
Flexural Strength, yield, Type 1, 0.125" (3.2 mm)	psi(MPa)	ASTM D 790	9,800(68)	10,800(74)	10,000(69)	11,000(76)	15,500(107)	10,800(74)
Flexural Modulus, 0.125" (3.2 mm)	psi(MPa)	ASTM D 790	320,000(2,205)	380,000(2,620)	310,000(2,135)	360,000(2,480)	500,000(3,445)	370,000(2,550)
Hardness, Rockwell L	—	ASTM D 785	—	—	—	—	98	—
Hardness, Rockwell R	—	ASTM D 785	105	110	105	110	120	111
IMPACT								
Izod Impact, notched, 73°F (23°C)	ft-lb/in(J/m)	ASTM D 256	7.5(400)	5.5(294)	6.5(347)	4.5(240)	0.8(43)	4.0(214)
Izod Impact, notched, -40°F (-40°C)	ft-lb/in(J/m)	ASTM D 256	—	—	—	—	—	1.3(69)
Gardner Impact, 73°F (23°C)	ft-lbs(J)	ASTM D 3029	—	—	—	—	—	5.0(7)
THERMAL								
HDT, 66 psi (0.45 MPa), 0.125" (3.2 mm)	°F(°C)	ASTM D 648	—	—	—	—	203(95)	—
HDT, 66 psi (0.45 MPa), 0.250" (6.4 mm) unannealed	°F(°C)	ASTM D 648	205(96)	205(96)	203(95)	205(96)	210(99)	—
HDT, 264 psi (1.82 MPa), 0.125" (3.2 mm) unannealed	°F(°C)	ASTM D 648	178(81)	178(81)	176(80)	178(81)	181(83)	174(79)
HDT, 264 psi (1.82 MPa), 0.250" (6.4 mm) unannealed	°F(°C)	ASTM D 648	—	—	182(83)	—	—	—
Relative Thermal Index, Elec Prop	°C	UL 746 B	60/80**	60	60	60	—	60
Relative Thermal Index, Mech Prop with impact	°C	UL 746 B	60/80**	60	60	60	—	60
Relative Thermal Index, Mech Prop without impact	°C	UL 746 B	60/80**	60	60	60	—	60
PHYSICAL								
Specific Gravity, solid	—	ASTM D 792	1.04	1.04	1.03	1.04	1.07	1.05
Mold Shrinkage, flow, 0.125" (3.2 mm)	in/in E-3	ASTM D 955	5-8	5-8	5-8	5-8	—	6-8
Melt Flow Rate, nom'l 230°C/3.8 kgf (l)	g/10 min	ASTM D 1238	4.5	7.0	8.0	13.0	20.0	17.2
Melt Viscosity, 260°C, 1000 sec-1	poise	—	1,750	1,550	1,450	1,350	960	1,100
FLAME CHARACTERISTICS*								
UL 94 HB Flame Class Rating	in(mm)	UL 94	0.058(1.47)	0.062(1.58)	0.062(1.58)	0.062(1.58)	—	0.059(1.50)
CSA (See File for complete listing)	File no.	CSA LISTED	LS88480	LS88480	LS88480	LS83480	—	—
Oxygen Index (LOI)	%	ASTM D 2863	—	—	19.0	—	—	—

*These ratings are not intended to reflect hazards presented by any material under actual fire conditions.

** Consult UL guide for RTI by color.

- **ABS Lustran M202 AS - Bayer**



Bayer MaterialScience

Lustran ABS M202AS

Injection molding grades / General purpose grades

Grade for self coloring, optimized base color, easy-flowing, contains antistatic additive

ISO Shortname

ISO 2580-ABS 1,MGZ,095-25-16-25

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
Rheological properties				
C Melt volume-flow rate	220 °C; 10 kg	cm ³ /(10 min)	ISO 1133	32
C Molding shrinkage, parallel	60x60x2	%	ISO 294-4	0.4 - 0.7
C Molding shrinkage, normal	60x60x2	%	ISO 294-4	0.4 - 0.7
Mechanical properties (23 °C/50 % r.h.)				
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2300
C Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	44
C Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	2.4
Strain at break	50 mm/min	%	based on ISO 527-1,-2	> 15
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	100
C Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	80
C Charpy notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	16
C Charpy notched impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	8
Izod notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	15
Izod notched impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	8
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2300
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	70
Ball indentation hardness		N/mm ²	ISO 2039-1	100
Thermal properties				
C Temperature of deflection under load	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	94
C Temperature of deflection under load	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	98
C Vicat softening temperature	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	100
C Coefficient of linear thermal expansion, parallel	23 to 55 °C	10 ⁻⁴ /K	ISO 11359-1,-2	0.9
C Burning behavior UL 94 (1.6 mm)	1.6 mm	Class	UL 94	HB
Burning rate (US-FMVSS)	2.0 mm	mm/min	ISO 3795	65
Glow wire test (GWI)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	700
Electrical properties (23 °C/50 % r.h.)				
C Relative permittivity	100 Hz	-	IEC 60250	3.0
C Relative permittivity	1 MHz	-	IEC 60250	3.0
C Dissipation factor	100 Hz	10 ⁻⁴	IEC 60250	50
C Dissipation factor	1 MHz	10 ⁻⁴	IEC 60250	80
C Volume resistivity		Ohm·m	IEC 60093	1E13
C Surface resistivity		Ohm	IEC 60093	1E15
C Electric strength	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	36
C Comparative tracking index CTI	Solution A	Rating	IEC 60112	600
Other properties (23 °C)				
C Density		kg/m ³	ISO 1183	1050
Processing conditions for test specimens				
C Injection molding-Melt temperature		°C	ISO 294	240
C Injection molding-Mold temperature		°C	ISO 294	70
C Injection molding-Injection velocity		mm/s	ISO 294	240

**Lustran ABS /
Novodur®**

- Poliamida (PA Technyl A-216 – Rhodia)

TECHNYL A 216 ®

Main properties

Values measured at 23 °C

The values of properties are for natural grade.

Properties	Standards	Unit	Values	
			EH 0 – 23 °C	EH 50 – 23 °C
Physical				
Water absorption, 24h in water at 23°C	ISO 62	%	1.3	-
Density	ISO 1183-A	g/cm ³	1.14	-
Moulding shrinkage longitudinal	RHODIA-EP	%	1.9	-
Moulding shrinkage transverse	RHODIA-EP	%	1.9	-
Mechanical				
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	3000	1500
Yield stress	ISO 527	MPa	85	60
Elongation at yield	ISO 527	%	3.9	30
Tensile strain at break	ISO 527	%	30	300
Stress at 50% elongation	ISO 527	MPa	-	50
Tensile stress at break	ISO 527	MPa	55	65
Flexural modulus	ISO 178	MPa	2900	1300
Flexural strength	ISO 178	MPa	120	50
Flexural stress at break	ISO 178	MPa	120	50
Charpy notched impact strength	ISO 179/1EA-1993	kJ/m ²	4.5	14
Charpy notched impact strength ISO179/1A	ISO 179-1992	kJ/m ²	4.5	12
Charpy impact strength	ISO 179/1EU-1993	kJ/m ²	NB	NB
Charpy impact strength ISO 179/1D	ISO 179-1992	kJ/m ²	NB	NB
Izod notched impact strength	ISO 180	kJ/m ²	4	12
Thermal				
Melt temperature	ISO 3146 - C	°C	263	-
Temper. of dimensional stability 1,8 MPa	ISO 75-2	°C	75	-
Coef. linear expansion longit. 23°C-85°C	ASTM E 831	E-5 / °C	7	-
Flammability UL94 thickness 0,8mm	ISO 1210/UL 94	-	V2	-
Flammability UL94 thickness 1,6 mm	ISO 1210/UL 94	-	V2	-
Glow wire test thickness 1 mm	IEC 695-2-1	°C	850	-
Glow wire test thickness 1,6 mm	IEC 695-2-1	°C	650	-
Glow wire test thick. 1,6 mm : no flame	IEC 695-2-1	°C	650	-
Electrical				
Relative permittivity 1MHz	IEC 250	-	2.9	3.2
Dissipation factor 1 MHz	IEC 250	-	0.03	0.08
Volume resistivity	IEC 93	E14.Ohm.cm	40	1
Surface resistivity	IEC 93	E14.Ohm	10	0.1
Dielectric strength	IEC 243-1	kV/mm	30	26
Comparative tracking index sol. A	IEC 112	VolI	600	575
Comparative tracking index sol. B	IEC 112	VolI	525	-
Specific				
Limit oxygen index	ISO 4589	%	26.5	-

Identification code >PA66<

The information contained in this document is supplied in good faith. It is based on the extent of our knowledge of the products as listed, and on the tests and experiments carried out in our laboratories. It is to be used only as an indication and shall not be construed in any way as a formal commitment or warranty on our part. Compliance of our products with your conditions of application or use can only be determined pursuant to your own prior appropriate test. The listed values of properties are for natural grade, if not otherwise specified.

ANEXO 3 - MÉTODO DA INJEÇÃO PROGRESSIVA

Este método, também denominado por “*Short shot method*” foi traduzido e adaptado de Barry *et al.* (1995). Com o auxílio deste método é possível o ajuste dos parâmetros de injeção passo a passo (Busato, 2004).

Procedimento inicial:

1. Assuma que a temperatura do molde já foi determinada na máquina;
2. Assuma que a temperatura de injeção do polímero já esta determinada;
3. Os passos devem ser seguidos na ordem como segue abaixo.

Passos:

1. AJUSTANDO O CURSO DE DOSAGEM (volume de material a ser injetado na cavidade):

- a) Ajuste a pressão de recalque igual a “Zero”;
- b) Ajuste o tempo de recalque igual a “Zero”;
- c) Ajuste a velocidade de injeção de MÉDIA para ALTA;
- d) Ajuste o tempo (1º estágio) para um valor maior do que o necessário para preencher o molde;
- e) Ajuste a pressão (1º estágio) para um valor maior do que o necessário para preencher o molde;
- f) Ajuste o valor do curso do fuso (volume de material) para um valor menor do que o necessário para preencher a cavidade do molde;
- g) Injete uma peça – o resultado deve ser uma peça incompleta;
- h) Continue injetando peças, aumentado gradualmente o curso do fuso (volume de material) – quando a peça estiver entre 95-98% preenchida, é sinal que o curso do fuso (volume de material) está OK. (Aviso: O parafuso deve estar no seu fim de curso nesse estágio. Não deve existir COLCHÃO).

2. CHECAGEM DA VELOCIDADE DE INJEÇÃO (volume de material a ser injetado na cavidade):

- a) Injete algumas peças conforme as condições descritas no item “1.h”, e cheque se:
- (i) Se próximo do “ponto de injeção” houver queima ou descoloração do material, ou se a peça ficar muito mole após a extração – então reduza a velocidade de injeção até os problemas desaparecerem.
 - (ii) Se próximo do “ponto de injeção” houver marcas de fluxo (marca fria), então aumente a velocidade de injeção até que o problema desapareça.

3. AJUSTANDO A PRESSÃO DE INJEÇÃO:

- a) Continuando do passo 2.a. ajuste a pressão de injeção (1º estágio) para um valor insuficiente para preencher o molde;
- b) Injete uma peça – o resultado deve ser uma peça incompleta;
- c) Continue injetando peças, AUMENTANDO gradualmente a pressão de injeção – quando a peça estiver entre 95-98% preenchida, se a aparência da peça estiver compatível com a do passo 2.a., então a pressão está OK. (Aviso: O parafuso de injeção deve estar no seu fim de curso. Não deve mais existir material para ser injetado).

4. AJUSTANDO O TEMPO DE INJEÇÃO:

- a) Continuando do passo 3.c. ajuste o tempo de injeção (1º estágio) para um valor insuficiente para preencher o molde;
- b) Injete uma peça – o resultado deve ser uma peça incompleta;
- c) Continue injetando peças, AUMENTANDO gradualmente o tempo de injeção – quando a peça estiver entre 95-98% preenchida, se a aparência da peça estiver compatível com a do passo 3.c. a pressão de injeção (1º estágio) está OK. (Aviso: O parafuso de injeção deve estar no seu fim de curso. Não deve mais existir material para ser injetado).

Obs.: Máquinas CNC fornecem valores reais de tempo de injeção que podem ser visualizadas no passo 3.

5. AJUSTANDO O TEMPO DE RECALQUE:

- a) Continuando do passo 4.c. aumente o CURSO DE DOSAGEM em 5-10%;
- b) Injete uma peça – a peça deveria parecer com a do passo 4.c., mas agora um COLCHÃO está presente;
- c) Ajuste a pressão de recalque (2º estágio) para 50-60% da pressão de injeção (1º estágio). Certifique-se se o tempo de recalque ainda é ZERO.
- d) Injete uma peça – a peça deveria ainda permanecer igual a do passo 5.b.
- e) Continue injetando peças, aumentando gradualmente o tempo de recalque. Pese a peça para cada incremento de tempo, até o peso parar de aumentar significativamente. Quando o peso da peça não mais variar, o tempo de recalque está OK.

ANEXO 4 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO

Justificativa e objetivo

A força de extração, que é diretamente relacionada ao coeficiente de atrito estático, tem sido citada como a principal causa dos colapsos em insertos feitos por estereolitografia (Cedorge *et al.* (1999), Hopkinson & Dickens (2000), Cedorge & Colton (2000)). O conhecimento do coeficiente de atrito permite o cálculo da força de atrito que atua entre as superfícies em contato e que deve ser superada pela força de extração, no caso de insertos utilizados para moldagem por injeção.

Esse experimento foi realizado no Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho em Portugal e tem por objetivo determinar o valor do coeficiente de atrito estático entre contra-corpos de polietileno de alta densidade e amostras de ABS P-400 com e sem recobrimento de níquel-fósforo (Ni-P) por eletroless. Pretende-se verificar se a presença do filme de Ni-P aumenta ou diminui o atrito entre as superfícies.

Materiais e métodos

Foi utilizado o polietileno de alta densidade (HE7013 – Borealis Polímeros) como material do contra-corpo. O experimento foi feito simulando as condições de extração de uma peça injetada nesse material em um inserto de ABS.

Foram construídas duas amostras em ABS com os seguintes parâmetros de construção principais: espessura de camada igual a 0,178mm, espessura do contorno e do raster igual a 0,305mm, gap nulo e bico Tip12. A sua geometria está detalhada na Figura 98. As duas amostras foram submetidas a um acabamento superficial com lixa d'água 3M[®] (até grana #1000) e uma delas foi recoberta por eletroless com níquel-fósforo no Laboratório de Estudos do Efeito Mössbauer do Departamento de Física da UFSC.

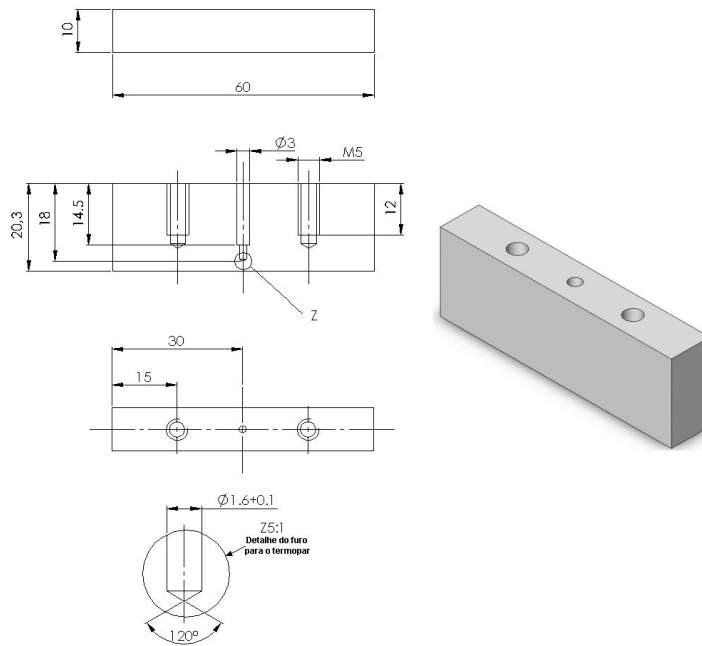


Figura 98 – Detalhamento da amostra utilizada nos ensaios para determinação do coeficiente de atrito estático.

Para realização do experimento foi utilizado um equipamento desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho denominado Mouldfriction. Esse equipamento foi acoplado a uma máquina universal de ensaios mecânicos Instron 4505, conforme é mostrado na Figura 99.



Figura 99 – Equipamento Mouldfriction acoplado sobre uma máquina universal de ensaios mecânicos.

O equipamento foi desenvolvido para simular as condições de extração entre o molde e a peça moldada, nesse caso, substituídos pela amostra e contra-corpo respectivamente. Para execução do experimento foram seguidas as seguintes etapas (Ferreira *et al.*, 2001):

1. Aquecimento da superfície da amostra até a temperatura de trabalho (função do material do contra-corpo);
2. Estabilização da temperatura;
3. Aplicação da pressão de contato por um determinado tempo (normalmente 60s);
4. Refrigeração até a temperatura de extração própria de cada polímero;
5. Estabilização da temperatura (60 s);
6. Aplicação de um deslocamento relativo entre as superfícies em contato com medição da força resistente;

O coeficiente de atrito entre as superfícies pode então ser calculado através da Equação 1:

$$\mu_e = \frac{F_A}{F_N} \quad (1)$$

Onde: μ_e representa o coeficiente de atrito estático, F_A a força de atrito e F_N a força normal de contato.

Além de usar as funcionalidades da máquina universal de tração, o equipamento Moldfriction, esquematizado na Figura 100, possui diversos sistemas funcionais, como: sistema de controle de temperatura, sistema de controle da pressão de contato e sistema de posicionamento e de deslocamento entre a amostra e o contra-corpo (Lencina, 2004). Durante o ensaio foi utilizada uma força normal de contato de 389,5N e uma velocidade de deslocamento de 10mm/min (Ferreira *et al.*, 2001).

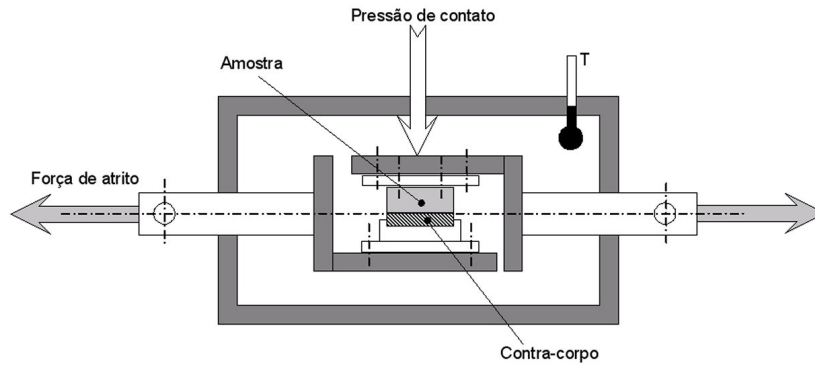


Figura 100 – Representação esquemática do equipamento Mouldfriction.

Resultados e conclusões

O ensaio foi realizado utilizando duas possíveis temperaturas do sistema para a extração de peças em PEAD: 30°C e 60°C. Com os dados obtidos, após cada medição, foi possível plotar os diagramas força-deslocamento e a partir deles determinar a força de atrito como sendo o valor máximo medido pela máquina universal de tração. A Figura 101 mostra os diagramas obtidos para o conjunto de medições realizado a 30°C nas amostras em ABS recobertas.

O coeficiente de atrito foi calculado através da Equação 3, sendo que a força normal (F_N) aplicada foi de 389,5N em todas as medições e a força de atrito (F_A) foi obtida considerando a média dos valores máximos fornecidos pela máquina universal de ensaio. A Tabela 39 apresenta um resumo com os parâmetros de ensaio e os resultados obtidos.

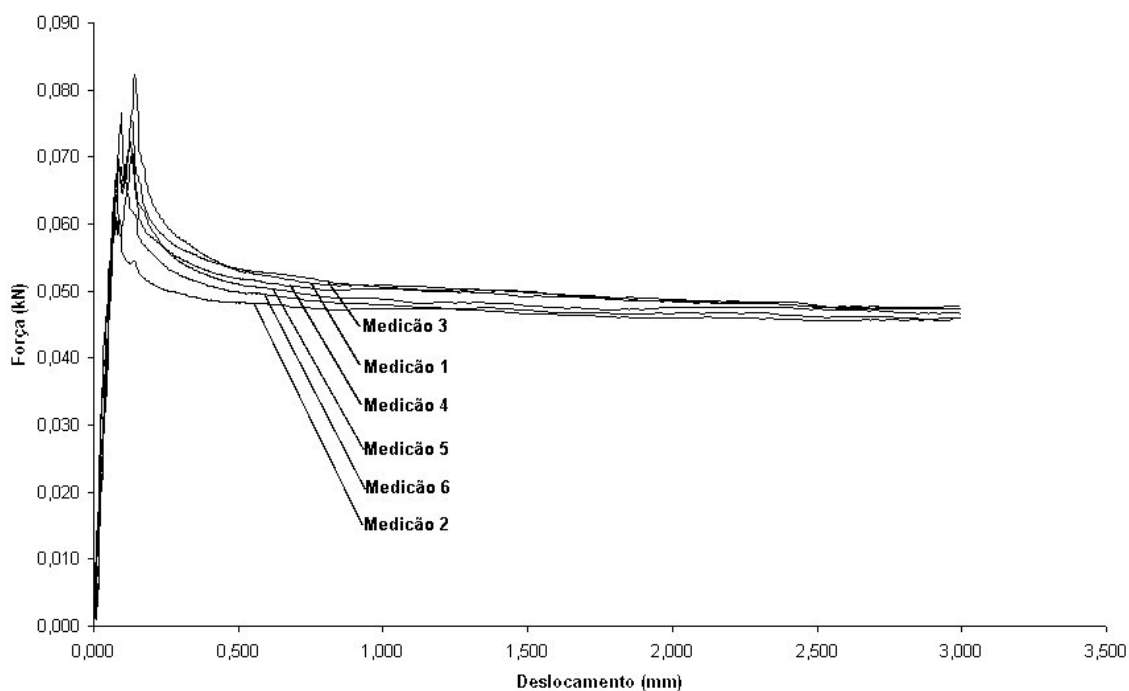


Figura 101 – Diagramas força-deslocamento para o ensaio a 30°C das amostras em ABS recobertas

Tabela 39 - Parâmetros de ensaio e resultados obtidos para o coeficiente de atrito estático entre superfícies de ABS e PEAD.

Amostras	Temp. (°C)	Medições	F_N (kN)	F_A (kN)	μ_e
ABS + NiP (com recobrimento)	30	6	0,3895	0,07223	0,1854
	60	5		0,06965	0,1788
ABS (sem recobrimento)	30	6		0,08888	0,2282
	60	5		0,08760	0,2249

Os resultados obtidos mostraram que a utilização do recobrimento com níquel-fósforo nas amostras em ABS permitiu uma redução de 18 a 20% no coeficiente de atrito. Foi constatado também que houve uma pequena redução dos

coeficientes de atrito com o aumento da temperatura de ensaio para os dois tipos de amostra. Lencina (2004) realizou um experimento semelhante para determinação do coeficiente de atrito estático em amostras feitas por estereolitografia (resina SOMOS 7110) na moldagem por injeção da poliamida 6,6. No entanto os valores para o coeficiente de atrito ficaram na faixa entre 0,308 e 0,447 e os resultados mostraram que o recobrimento de níquel-fósforo aumentou o coeficiente de atrito em até 33% em relação as amostras sem recobrimento. Ainda nesse estudo o aumento da temperatura de ensaio resultou num aumento do coeficiente de atrito.

Pode-se concluir que as diferenças encontradas entre as amostras produzidas por FDM e por estereolitografia estão relacionadas com o fato do ABS ser um material mais apropriado para a metalização devido a presença do butadieno em sua estrutura, que permite melhor ancoragem do paládio produzindo superfícies de melhor qualidade (Schulthess, 1994). Adicionalmente é importante relatar que a rugosidade resultante do acabamento superficial que as amostras em ABS receberam são de difícil reprodução nas cavidades dos insertos.

ANEXO 5 – PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO REFINADOS UTILIZADOS NOS INSERTOS EM ABS

A seguir são listados todos os parâmetros de construção utilizados nas peças construídas em ABS considerando o refinamento para melhora da qualidade dos insertos. As unidades de comprimento são apresentadas em polegada.

- **Parâmetros para fatiamento (arquivo: paramslice.cur)**

Variables in sliceParams

reqSliceBottom	{0.000000} 1.0;
reqSliceTop	{10.000000} 1.0;
sliceAutoClose	{true} 1.0;
sliceFilterTolerance	{0.0004} 1.0;
sliceHeight	{0.00700787401575} 1.0;
sliceOpenTolerance	{0.000102362204724} 1.0;
stlOrientation	{up} 1.0;
stlRotateX	{180.000} 1.0;
stlRotateY	{0.000} 1.0;
stlRotateZ	{0.000} 1.0;
stlScale	{1.0} 1.0;
stlUnits	{mm} 1.0;
useSliceBottom	{false} 1.0;
useSliceTop	{false} 1.0;

- **Parâmetros para suportes (arquivo supportParams.cur)**

Variables in supportParams

alt:baseLevels	{5} 1.0;
alt:baseOversize	{0.0196850393701} 1.0;

alt:support:doubleFace	{false} 1.0;
alt:support:faceOffset	{0.035} 1.0;
alt:support:growAmount	{0.001} 1.0;
alt:support:growLimit	{0.1} 1.0;
alt:support:perforate	{false} 1.0;
alt:support:perforateHeight	{1.0} 1.0;
alt:support:selfSupport	{45.0} 1.0;
alt:support:sparseAge	{5} 1.0;
alt:support:sparseRasterAir	{0.175196850394} 1.0;
alt:support:supportBottom	{false} 1.0;
growSupports	{smallgrow} 1.0;
main:baseLevels	{8} 1.0;
main:baseOversize	{0.050} 1.0;
main:part:prefContourWidth	{0.0120078740157} 1.2;
main:part:rasterAngle	{45.0} 1.0;
main:support:doubleFace	{false} 1.0;
main:support:faceOffset	{0.035} 1.0;
main:support:growAmount	{0.001} 1.0;
main:support:growLimit	{0.1} 1.0;
main:support:perforate	{false} 1.0;
main:support:perforateHeight	{1.0} 1.0;
main:support:selfSupport	{45.0} 1.0;
main:support:sparseAge	{5} 1.0;
main:support:sparseRasterAir	{0.175196850394} 1.0;
main:support:supportBottom	{false} 1.0;
optimizeBase	{true} 1.0;
sliceHeight	{0.00700787401575} 1.0;

supportBaseMode	{supportsAndBase} 1.0;
supportTop	{0.595669} 1.0;
supportType	{sparse} 1.0;
surroundDepth	{0.05} 1.0;
surroundPart	{false} 1.0;
useSupportTop	{false} 1.0;

- **Parâmetros para preenchimento (arquivo toolpathParams)**

Variables in toolpathParams

alignRaster	{false} 1.0;
allowVWC	{false} 1.0;
alt:base:perimeterWidth	{0.0} 1.0;
alt:base:rasterAir	{0.0350393700788} 1.0;
alt:base:sparseAir	{0.0} 1.0;
alt:base:sparsePerimeterWidth	{0.0} 1.0;
alt:base:sparseWidth	{0.013} 1.0;
alt:base:topAir	{-0.00140157480315} 1.0;
alt:base:topWidth	{0.0140157480315} 1.0;
alt:base:width	{0.0140157480315} 1.0;
alt:baseBottomMatl	{alt} 1.0;
alt:baseFastMatl	{alt} 1.0;
alt:firstLayer:width	{0.030} 1.0;
alt:firstLayer:z	{0.014} 1.0;
alt:flow:maxAspect	{8.0} 1.0;
alt:flow:maxBeadArea	{0.00064} 1.0;
alt:flow:maxWidth	{0.040} 1.0;
alt:flow:minAspect	{1.0} 1.0;

alt:flow:minBeadArea	{0.00006} 1.0;
alt:flow:minWidth	{0.012} 1.0;
alt:material:closedExitAngle	{0} 1.0;
alt:material:closedExitDist	{0.1} 1.0;
alt:material:closedExitEdge	{startedge} 1.0;
alt:material:maxBridge	{0.1} 1.0;
alt:material:minAirTravel	{0.05} 1.0;
alt:material:nPartXCap	{1} 1.0;
alt:material:openExitAngle	{180} 1.0;
alt:material:openExitDist	{0.1} 1.0;
alt:material:seamControlOffset	{0.10} 1.0;
alt:material:type	{P400_r} 1.0;
alt:material:xyShrink	{1.007} 1.0;
alt:material:zShrink	{1.0} 1.0;
alt:minPathLength	{0.050} 1.0;
alt:minVertexDistance	{0.0} 1.0;
alt:rasterPen:constantFactor	{0.12} 1.0;
alt:support:prefContourWidth	{0.014} 1.0;
alt:support:selfSupport	{45.0} 1.0;
alt:support:sparsePerimGap	{0.015} 1.0;
alt:support:sparseRasterWidth	{0.0140157480315} 1.0;
alt:support:supPerfPerimGap	{0.003} 1.0;
alt:support:supbotsmallPerimGap	{0.0} 1.0;
alt:support:supbottomPerimGap	{0.0} 1.0;
alt:support:supfaceAir	{-0.00140157480315} 1.0;
alt:support:supfacePerimGap	{0.000} 1.0;
alt:support:supfaceWidth	{0.0140157480315} 1.0;

alt:support:supportAir	{0.0245275590551} 1.0;
alt:support:supportPerimGap	{0.010} 1.0;
alt:support:supportWidth	{0.015} 1.0;
alt:tip:size	{.012} 1.0;
alt:tip:zMax	{.014} 1.0;
alt:tip:zMin	{.005} 1.0;
alt:tipwipe:toggle	{true} 1.0;
autoCenterToolpath	{false} 1.0;
contourDepth	{0.0198818897638} 1.0;
contourWidth	{0.0198818897638} 1.0;
custom:1:CRAirGap	{0.000000} 1.0;
custom:1:alignRaster	{false} 1.0;
custom:1:color	{4} 1.0;
custom:1:contourDepth	{0.0198818897638} 1.0;
custom:1:contourStyle	{perimOnly} 1.0;
custom:1:description	{ } 1.0;
custom:1:doRaster	{true} 1.0;
custom:1:mainOrAlt	{main} 1.0;
custom:1:name	{Group 1} 1.0;
custom:1:number	{1} 1.0;
custom:1:openCurveLocation	{center} 1.0;
custom:1:openCurveWidth	{0.012008} 1.0;
custom:1:perimLocation	{inside} 1.0;
custom:1:prefContourWidth	{0.0198818897638} 1.0;
custom:1:rasterAir	{0.000000} 1.0;
custom:1:rasterAngle	{45.000000} 1.0;
custom:1:rasterAngle2	{90.000000} 1.0;

custom:1:rasterWidth	{0.0198818897638} 1.0;
doRasterFill	{true} 1.0;
main:base:perimeterWidth	{0.0} 1.0;
main:base:rasterAir	{0.0350393700788} 1.0;
main:base:sparseAir	{0.0} 1.0;
main:base:sparsePerimeterWidth	{0.0} 1.0;
main:base:sparseWidth	{0.013} 1.0;
main:base:topAir	{-0.00140157480315} 1.0;
main:base:topWidth	{0.0140157480315} 1.0;
main:base:width	{0.0140157480315} 1.0;
main:baseBottomMatl	{alt} 1.0;
main:baseFastMatl	{alt} 1.0;
main:firstLayer:width	{0.030} 1.0;
main:firstLayer:z	{0.014} 1.0;
main:flow:maxAspect	{8.0} 1.0;
main:flow:maxBeadArea	{0.00064} 1.0;
main:flow:maxWidth	{0.040} 1.0;
main:flow:minAspect	{1.0} 1.0;
main:flow:minBeadArea	{0.00006} 1.0;
main:flow:minWidth	{0.012} 1.0;
main:material:closedExitAngle	{0} 1.0;
main:material:closedExitDist	{0.1} 1.0;
main:material:closedExitEdge	{startedge} 1.0;
main:material:maxBridge	{0.1} 1.0;
main:material:minAirTravel	{0.05} 1.0;
main:material:nPartXCap	{1} 1.0;
main:material:openExitAngle	{180} 1.0;

main:material:openExitDist	{0.1} 1.0;
main:material:seamControlOffset	{0.10} 1.0;
main:material:type	{P400} 1.0;
main:material:xyShrink	{1.007} 1.0;
main:material:zShrink	{1.0} 1.0;
main:minPathLength	{0.050} 1.0;
main:minVertexDistance	{0.0} 1.0;
main:part:CRAirGap	{0.000} 1.0;
main:part:contourDepth	{0.0240157480314} 1.2;
main:part:interiorRasterWidth	{0.013} 1.0;
main:part:rasterAngle2	{90.0} 1.0;
main:part:rasterWidth	{0.0120078740157} 1.0;
main:part:rasterWidthForSolid	{0.0140157480315} 1.0;
main:part:rasterWidthForSparse	{0.014} 1.0;
main:part:sparseAirGap	{0.10} 1.0;
main:part:sparseRasterDelta	{90.0} 1.0;
main:part:sparseRasterWidth	{0.014} 1.0;
main:rasterPen:constantFactor	{0.12} 1.0;
main:rasterPen:useAngle	{true} 1.0;
main:rasterPen:useLength	{true} 1.0;
main:support:prefContourWidth	{0.014} 1.0;
main:support:selfSupport	{45.0} 1.0;
main:support:sparsePerimGap	{0.015} 1.0;
main:support:sparseRasterWidth	{0.0140157480315} 1.0;
main:support:supPerfPerimGap	{0.003} 1.0;
main:support:supbotsmallPerimGap	{0.0} 1.0;
main:support:supbottomPerimGap	{0.0} 1.0;

main:support:supfaceAir	{-0.00140157480315} 1.0;
main:support:supfacePerimGap	{0.000} 1.0;
main:support:supfaceWidth	{0.0140157480315} 1.0;
main:support:supportAir	{0.0245275590551} 1.0;
main:support:supportPerimGap	{0.010} 1.0;
main:support:supportWidth	{0.015} 1.0;
main:tip:size	{.012} 1.0;
main:tip:zMax	{.014} 1.0;
main:tip:zMin	{.005} 1.0;
main:tipwipe:toggle	{true} 1.0;
modelMaterial	{P400} 1.0;
modelTip	{T12} 1.0;
modelerType	{fdm2000} 2.0;
oldToolpathMethod	{false} 1.0;
openCurveLocation	{center} 1.0;
openCurveWidth	{0.012008} 1.0;
partFillStyle	{rasters} 1.0;
partInteriorDepth	{0.0240157480314} 1.2;
partInteriorStyle	{solid} 1.0;
perimLocation	{inside} 1.0;
rasterAngle	{45.000000} 1.0;
rasterAngle2	{90.000000} 1.0;
rasterWidth	{0.0198818897638} 1.0;
sliceFilterTolerance	{0.0004} 1.0;
sliceHeight	{0.00700787401575} 1.0;
supportMaterial	{P400_r} 1.0;
supportTip	{T12} 1.0;