

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS

*Análises de Parâmetros Físicos e Operacionais
no Fenômeno da Cura Localizada do Processo
Termolitográfico da Prototipagem Rápida*

AUTOR: RODRIGO ALVARENGA REZENDE
ORIENTADOR: Prof. Dr. RUBENS MACIEL FILHO
CO-ORIENTADOR: Dr. ANDRÉ LUIZ JARDINI MUNHOZ

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas - São Paulo

Abril de 2006

UNIDADE BC
Nº CHAMADA: _____
T/UNICAMP R 339a
V. _____ EX. _____
TOMBO BCCL 74083
PROC 16.145.07
C _____ D X
PREÇO 11,00
DATA 04/09/07
BIB-ID _____

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R339a **Rezende, Rodrigo Alvarenga**
Análise de parâmetros físicos e operacionais no fenômeno da cura localizada do processo termolitográfico da prototipagem rápida / Rodrigo Alvarenga Rezende.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientadores: Rubens Maciel Filho
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Prototipagem rápida. 2. Simulação (Computadores). 3. ANSYS (Software). 4. Sistema CAD/CAM. 5. Feixes de laser. 6. Fontes de infravermelho. 7. Resinas epóxi. 8. Sistema de fabricação integrada por computador. I. Maciel Filho, Rubens. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Titulo em Inglês: Operational and Physical Analysis for Localized Curing Phenomenon on Rapid Prototyping Thermolithography Process.

Palavras-chave em Inglês: Rapid prototyping, Thermolithography, Infrared laser, ANSYS Simulation, Thermosensitive resin

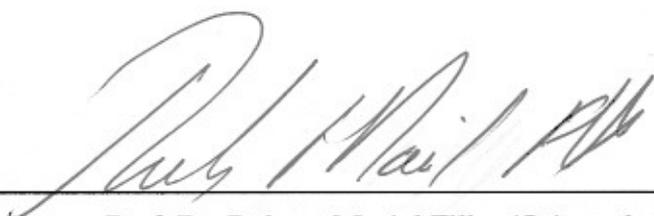
Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Paulo Jorge da Silva Bártolo e Marco Antonio Fiori Scarparo

Data da defesa: 07/04/2006

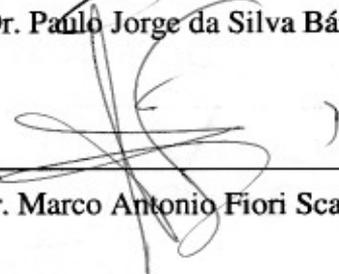
Dissertação de Mestrado defendida por Rodrigo Alvarenga Rezende e aprovada em 07 de abril de 2006 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Rubens Maciel Filho (Orientador)



Prof. Dr. Paulo Jorge da Silva Bártolo (Titular)



Prof. Dr. Marco Antonio Fiori Scarparo (Titular)

Dra. Suzimara Rossilho de Andrade Ducatti (Suplente)

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.

Prof. Dr. Rubens Maciel Filho (Orientador)

À minha querida esposa Mylene.

Agradecimentos

Acima de tudo a Deus por me encorajar nos momentos de desânimo, por me iluminar nos momentos de dúvida e por continuar presente comigo sempre.

Agradeço especialmente à Mylene, minha esposa, a quem devo grande parte deste sucesso e quem me surpreende cada vez mais com sua compreensão, com seu companheirismo e com sua sempre terna maneira de amar.

Aos meus heróis, meus pais, Antonio e Ana Maria, porque me deram a vida e me proporcionaram um sentido para ela, orientando-me e ajudando-me a trilhar bons caminhos. Aos meus irmãos, Luciana e Fabiano, de quem tenho muito orgulho e com quem pude contar até hoje e hei de contar sempre. Estarei sempre pronto para ajudá-los quando precisarem.

Ao meu sogro, José Ferreira, e especialmente à minha sogra Elaine quem, em uma tarde chuvosa de verão em meio a uma conversa, incentivou-me a encarar esta fase que agora se encerra.

Aos meus cunhados Cristian, Ellen, Márcia, Wendel e Josiane por acreditarem em mim e pela amizade.

A todos os meus tios e tias, primos e primas e a Vó Luci.

Agradeço ao Orientador e Amigo, Professor Rubens Maciel Filho, pela feliz oportunidade que me proporcionou, pelo estímulo constante no decorrer do trabalho e pelos ensinamentos transmitidos.

Ao meu Amigo e Co-orientador, André Jardini que durante todo este percurso, esteve comigo e jamais deixou de me atender, ensinar e ouvir meus desabafos de quem anseia concluir e realizar tudo como planejado. À sua esposa Renata e à Maryah, mascotinha da equipe.

À colega e amiga Suzi, pela importantíssima colaboração a mim oferecida, por participar das valiosas discussões envolvendo o desenvolvimento do trabalho, e pela imensurável boa vontade que teve em todas as vezes que dela precisei.

Ao Professor Marco Antonio Scarparo, pelo entusiasmo demonstrado nas vezes que conversamos e por ser o idealizador do modelo teórico utilizado nesta tese.

Ao Professor Paulo Bártolo, pela recepção que tivemos em seu país, por proporcionar uma ferramenta de estudo também utilizada no decorrer do Mestrado, e pela oportunidade que estará me proporcionando nos próximos meses. Além, obviamente, de participar da minha Banca de Defesa.

Ao Jorge Vicente, por ter me recebido no Cenpra e pelo material que não hesitou em me emprestar.

Aos colegas do Lopca, Vanessa, Caliane, Delba e Eduardo, Cristiane, Natascha, Miria, Edvaldo, Félix, Agremis, Sebastião, Urso, Igor, Leonardo, Patrícia, Maria Cristina, Ana Paula, Aline, Júlio, Paulo, Newton, Sarita, Alex, Elis Regina, Mário, Elenise, Nádson, Érica, Érica Y., Alessandra, Marcela, Elmer, Betânia, Lamia, Carol e demais colegas que freqüentaram o laboratório, agradeço pela amizade e peço desculpas por muitas vezes ter deixado de participar das conversas, dos cafezinhos e por ter parecido, às vezes, estar desinteressado pelo que ocorria ao meu redor nos últimos meses. Prometo estar mais presente.

Ao Cristiano e ao Elton, e à Silvana (Sec-DPQ) pelo apoio indispensável no Lopca.

À Professora Maria Regina, pelo apoio e incentivos freqüentes.

Aos amigos Jânio e Roniane, Ricardo e Luciana Maudonnet, Dr. Oscar e Dona Bia, Isa e Marco, Rodenei e Christiane, Daniel e Eliane, e aos amigos da comunidade gaúcha. Aos amigos, Cassius, Maurício e Marcelo, grandes amigos que tive o prazer de conhecer. Ao Misse, à Cristiane, e ao Mateus e Rodrigo Andriazzi e famílias.

À CAPES e FAPESP, imensamente, pelos suportes concedidos para que este trabalho pudesse ser planejado, executado e finalizado.

Meu mais sincero obrigado a cada um de vocês. Serei sempre grato.

“O Homem pode voar”

*(Alberto Santos Dumont,
O Pai da Aviação)*

*(Frase dita a seus amigos durante
sua infância no século XIX)*

Resumo

REZENDE, Rodrigo Alvarenga, *Análises de Parâmetros Físicos e Operacionais no Fenômeno da Cura Localizada do Processo Termolitográfico da Prototipagem Rápida*: Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas-SP, 2006.

A Prototipagem Rápida consiste na reprodução física de objetos tridimensionais de geometria livre, a partir de um projeto inicial (*design*), modelado por auxílio de computador. A Prototipagem Rápida é uma tecnologia moderna que une métodos e equipamentos adequados a fim de oferecer, como principais atrativos, alta qualidade e redução de custos de produtos manufaturados. São diversos os métodos existentes e os materiais aplicáveis. Este trabalho apresenta um novo método de fabricação de protótipos, a Termolitografia. Baseada na irradiação de *laser* de CO₂ na região espectral do infravermelho sobre resinas termosensíveis, a Termolitografia oferece importantes vantagens quando comparada a outros processos, principalmente no que se refere ao estado físico da amostra logo após a irradiação do *laser*. Este processo apresenta duas grandes vantagens que são a não-contração da amostra após ser curada e a ausência de tratamento pós-cura. A cura localizada é o fenômeno de confinamento da energia transmitida pelo *laser* realizando a cura do material somente em uma região desejada. O controle da cura localizada é a chave para o sucesso e para a garantia de protótipos de alta qualidade. Para ajustá-la e otimizá-la, é necessário o domínio de parâmetros físicos do material empregado e de parâmetros operacionais do *laser* de CO₂. O estudo da combinação dos efeitos, por exemplo, da variação da proporção dos componentes da amostra, da sua temperatura de cura, além de fatores operacionais como a velocidade de varredura, o diâmetro e a potência do feixe *laser*, é o alvo principal deste trabalho. As simulações facilitam a compreensão de como cada variável pode interferir na construção do protótipo, e determinam faixas de valores para os parâmetros as quais implicam em melhores resultados no final do processo. O trabalho de seleção destes valores é importante para a futura continuidade de estudo experimental do processo termolitográfico.

Palavras-Chave: Prototipagem Rápida, Termolitografia, *Laser* infravermelho, Ansys, Simulação, Resina Termossensível, Epóxi.

Abstract

REZENDE, Rodrigo Alvarenga, *Operational and Physical Parameters Analysis for Localized Curing Phenomenon of Rapid Prototyping Thermolithography Process*: Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas-SP, 2006.

Rapid Prototyping consists on a physical replication of three-dimensional objects with free geometry, from an initial design, modeled by computer assistance. Rapid Prototyping is a modern technology that unifies methods and suited equipments in order to offer as main attractive high quality and cost-reduction of manufactured products. There are many techniques and raw materials applicable. This work presents a new method of prototypes fabrication, the Thermolithography. Based on CO₂ laser irradiation at the infrared spectral region onto thermosensitive resins, Thermolithography offers important advantages if compared with other processes, mainly those ones respected to the non-contraction effect of the sample after being cured and the absence of a post cure treatment. The localized cure is the phenomenon of confinement of energy transmitted by laser beam performing the curing only on a desired region at the sample. The control of the localized cure is the key for the success and for the guarantee of high quality prototypes. In order to fit and optimize it, it is necessary the domain of physical properties of the applied material and the domain of the CO₂ laser operational parameters. The study of combination of the involved effects, for instance, the variation of amount of the components in the sample, the cure temperature, beside operational parameters as scanning velocity, the laser beam diameter and power, are the main target of this work. Simulations become easier the comprehension of how each variable can affect during the building of prototype and to determine the best range of values which implicate in better final result of the process. The selection of these values is very important to the continuity of this work.

Key-Words: Rapid Prototyping, Thermolithography, Infrared Laser, Ansys, Simulation, Thermosensitive Resin, Epoxy.

Sumário

Lista de Figuras	xviii
Lista de Tabelas	xxiv
Abreviaturas	xxv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivos.....	6
1.2 – Organização do Trabalho.....	7
CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA E DA ESTEREOLITOGRAFIA.....	9
2.1 – A Prototipagem Rápida	9
2.1.1 – Definição	9
2.1.2 – Breve Histórico.....	12
2.1.2 – O Cenário Atual.....	13
2.1.3 – A Prototipagem Rápida no Mundo dos Negócios	16
2.1.4 – Métodos de Prototipagem Rápida.....	17
2.1.5 – Principais Processos	18
2.1.5.1 – Estereolitografia (SL)	18
2.1.5.2 – Sinterização Seletiva a <i>Laser</i> (SLS)	20
2.1.5.3 – Modelagem por Deposição de Materiais Fundido (FDM)	21
2.1.5.4 – Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM)	23
2.1.5.5 – Cura Sólida na Base (SGC)	23
2.1.5.6 – Impressão Tridimensional (3DP).....	24
2.1.5.7 – Conformação Próxima ao Formato Final Via <i>Laser</i> (LENS).....	25
2.1.5.8 – Termolitografia por <i>Laser</i> Infravermelho (IRTL).....	26
2.1.6 – Prototipagem Rápida Assistida por Computador	27
2.1.7 – Benefícios da Prototipagem Rápida	29
2.1.8 – Setores de Aplicação	30
2.2 – A Estereolitografia.....	33
2.2.1 – Fases do Processo de Estereolitografia.....	34
2.2.1.1 – Pré-Processamento	35
2.2.1.2 – Processamento	37
2.2.1.3 – Pós-Processamento	37
2.2.2 – Tratamento de dados no formato STL.....	38
2.2.3 – A Microestereolitografia.....	42
2.3 – Técnicas Complementares da Prototipagem Rápida	43
2.3.1 – A Engenharia Reversa (<i>Reverse Engineering</i>)	43
2.3.1.1 – Seqüência Convencional da Prototipagem Rápida.....	45
2.3.1.2 – Seqüência Não-Convencional da Prototipagem Rápida.....	45
2.3.2 – O Ferramental Rápido (<i>Rapid Tooling</i>).....	47
2.4 – Conclusões.....	50
CAPÍTULO 3 – O SISTEMA ELI	51
3.1 – O Sistema ELI	51
3.2 – Descrição dos Módulos do Sistema ELI	53
3.2.1 – <i>Laser</i> de CO ₂	53
3.2.2 – Microcomputador com Software de Controle do Sistema.....	55
3.2.3 – Cabeçotes Galvanométricos	56
3.2.4 – Tanque Depositor de Resina.....	57
3.2.5 – Plataforma Elevadora	57

3.2.6 – <i>Chiller</i>	58
3.2.7 – Planificador de Material	59
3.2.8 – Fonte de Tensão.....	59
3.3 – Interação <i>Software-Hardware</i> do Sistema ELI	59
3.4 – Funcionamento do Sistema ELI	60
3.5 – A Composição da Amostra.....	62
3.6 – Principais Vantagens do Sistema ELI	67
3.7 – Conclusões.....	68
CAPÍTULO 4 – O Modelo Numérico ANSYS.....	69
4.1 – O ANSYS	69
4.2 – A Modelagem Matemática	72
4.3 – Elaboração de Modelos pelo ANSYS	77
4.4 – A Construção e Configuração do Modelo Numérico no ANSYS.....	81
4.5 – Conclusões.....	83
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DO MODELO NUMÉRICO ANSYS.....	84
5.1 – O Cenário Geral do Modelo – Geometria e Condições de Contorno.....	85
5.2 – Preparação dos Cenários.....	88
5.3 – Apresentação e Discussão dos Resultados	93
5.3.1 – Estudo do Efeito da Variação do Diâmetro do Feixe <i>Laser</i>	93
5.3.2 – Estudo do Efeito da Variação da Velocidade de Varredura do Feixe <i>Laser</i>	100
5.4 – Conclusões.....	123
CAPÍTULO 6 – O MODELO CINÉTICO STLG – FEM	124
6.1 – A Cinética de Cura	124
6.1.1 – As Reações de Cura Termo-Iniciadas	126
6.1.2 – Efeitos da Temperatura de Cura (T_{cura})	126
6.2 – Apresentação do Modelo	130
6.2.1 – Elemento Mestre.....	133
6.2.2 – Formulação Isoparamétrica	134
6.2.3 – Integração Numérica	137
6.3 – Processamento Computacional do Modelo – O Programa.....	137
6.3.1 – Sub-rotinas.....	138
6.3.2 – Variáveis.....	141
6.4 – Conclusões.....	143
CAPÍTULO 7 – RESULTADOS DO MODELO CINÉTICO STLG – FEM.....	144
7.1 – O Efeito da Variação das Temperaturas de Cura (T_{cura}).....	144
7.2 – Resultados Experimentais	146
7.2.1 – A Fração de Conversão Experimental.....	146
7.2.2 – A Taxa de Reação de Cura Experimental.....	149
7.2.3 – Fração de Conversão x Taxa de Reação de Cura Experimental.....	151
7.3 – Resultados Obtidos por Simulações no Modelo Cinético STLG-FEM.....	152
7.3.1 – Fração de Conversão por Simulação	153
7.3.2 – Simulação da Taxa de Reação de Cura	154
7.3.3 – Fração de Conversão x Taxa de Reação de Cura (Simulação).....	157
7.3.4 – Taxa de Reação de Cura Máxima x Temperaturas de Cura (Simulação).....	157
7.3.5 – Tempo Mínimo de Cura (T_p) x Temperaturas de Cura	158
7.4 – Validação do Modelo Cinético.....	159
7.4.1 – Fração de Conversão	160
7.4.2 – Taxa de Reação de Cura	163
7.5 – O Efeito de Difusão na Amostra	167

7.5.1 – Fração de Conversão: Efeito da Difusão	170
7.5.2 – Taxa de Reação de Cura	171
7.6 – Conclusões.....	173
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	174
8.1 – Conclusões.....	174
8.2 – Trabalhos Futuros.....	176
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	178
APÊNDICE A – O <i>Laser</i> de CO ₂	188
APÊNDICE B – Construção de Peças Tridimensionais.....	190
APÊNDICE C – Caracterização Térmica do Processo IRTL.....	193
APÊNDICE D – Caracterização Óptica do Processo IRTL.....	203
APÊNDICE E – Método dos Elementos Finitos.....	207
APÊNDICE F – O Programa STLG-FEM.....	211

Lista de Figuras

Figura 1. 1 – Esquema geral do processo completo da Prototipagem Rápida.....	1
Figura 1. 2 – Sistema SL comercializado pela empresa 3D Systems.....	4
Figura 1. 3 – Peças tridimensionais iniciais obtidas com a Estereolitografia com <i>laser</i> no Infravermelho.	6
Figura 2. 1 – Patentes da Prototipagem Rápida depositadas entre 1979 e 1992 (BEAMAN, 2006).....	13
Figura 2. 2 – Unidades de Máquinas de Prototipagem Rápida vendidas por ano (WOHLERS, 2004).	14
Figura 2. 3 – Milhões de Modelos produzidos por ano (WOHLERS, 2004).	15
Figura 2. 4 – Domínio da Prototipagem Rápida por países e regiões (WOHLERS, 2004).	15
Figura 2. 5 – Domínio da Prototipagem Rápida por setores (WOHLERS, 2004).	16
Figura 2. 6 – Vista em corte do processo SL.....	19
Figura 2. 7 – Protótipos em Construção.	19
Figura 2. 8 – Exterior de uma Máquina SL.	20
Figura 2. 9 – Máquina SLS em corte (LIMA, 2003).	21
Figura 2. 10 – Exterior de uma Máquina SLS (MSOE, 2006).	21
Figura 2. 11 – Esquema do Processo FDM.	22
Figura 2. 12 – Exterior de uma Máquina FDM (ARTIS, 2006).	22
Figura 2. 13 – Esquema do Processo LOM (LIMA, 2003).	23
Figura 2. 14 – Esquema do Processo SGC (LIMA, 2003).	24
Figura 2. 15 – Esquema do Processo 3DP.....	25
Figura 2. 16 – Exterior de uma Máquina 3DP (SEACAM, 2005).	25
Figura 2. 17 – Esquema do Processo LENS.....	26
Figura 2. 18 – Esquema do Processo IRTL.....	27
Figura 2. 19 - Ciclo do desenvolvimento de produtos com a Prototipagem Rápida assistida por computador.....	28
Figura 2. 20 – Integração da Prototipagem Rápida entre as diferentes áreas da ciência.....	30
Figura 2. 21 – Aeronáutica: Monitoramento aéreo (BÁRTOLO, 2005).	31
Figura 2. 22 – Automotiva: Motores.	31
Figura 2. 23 – Medicina: Próteses Ósseas, membros artificiais, ferramentas e instrumentos (ARTIS, 2006).	32
Figura 2. 24 – Paleontologia: reconstituição de ossadas.	32
Figura 2. 25 – Mecânica: Bloco de Motor.....	32
Figura 2. 26 – Odontologia: Próteses para reconstituição de mandíbula (ARTIS, 2006). ...	32
Figura 2. 27 – Eletrônica e Microeletrônica: MEMS (USACEHR, 2006).	32
Figura 2. 28 – Telecomunicações: carcaças de aparelhos celulares.	32
Figura 2. 29 – Informática: resfriadores (coolers) para processador (ARTIS, 2006).	32
Figura 2. 30 – Biomedicina: materiais bio-adaptativos – <i>scaffolds</i> (BÁRTOLO, 2004)	32
Figura 2. 31 – Arquitetura: maquetes (ARTIS, 2006).	33
Figura 2. 32 – Brinquedos (ARTIS, 2006).	33
Figura 2. 33 – Ferramentas em geral (ARTIS, 2006).	33
Figura 2. 34 – Indústria de moldes: calçados (SEACAM, 2005).	33
Figura 2. 35 – O Design do sólido.....	34
Figura 2. 36 – Triangularização.....	34
Figura 2. 37 - Planos triangularizados.	34

Figura 2. 38 - Fatiamento das camadas.....	34
Figura 2. 39 – Representação tridimensional de um modelo sólido CAD e de sua triangularização no formato STL.....	36
Figura 2. 40 – Corte do Modelo STL em finas camadas.....	36
Figura 2. 41 – Representação da precisão em função do número de camadas.....	37
Figura 2. 42 – Vantagens e desvantagens dos diferentes formatos de arquivos na Estereolitografia.....	38
Figura 2. 43 – Representação interna de um arquivo STL (CHUA e LEONG, 1997).....	39
Figura 2. 44 – Triangulação correta.....	40
Figura 2. 45 – Arquivos STL gerados com erros.	41
Figura 2. 46 – Diagrama das Seqüências Convencional e Não-Convencional.	46
Figura 2. 47 – O <i>Rapid Tooling</i> no contexto da Prototipagem Rápida.	49
Figura 3. 1 – Sistema ELI piloto desenvolvido no Instituto de Física da UNICAMP (JARDINI, 2001).	52
Figura 3. 2 – Sistema ELI implantado na FEQ em 2005.....	52
Figura 3. 3 – <i>Laser</i> de CO ₂ de 50W.	53
Figura 3. 4 – Tubo de <i>laser</i> com parede externa de 2,5 mm (RANGE LASER, 2006).	55
Figura 3. 5 – Interface do Software do <i>Laser</i> de CO ₂ e Scanner Óptico.	55
Figura 3. 6 – Esboço dos Cabeçotes Galvanométricos (X e Y) e da lente convergente.....	56
Figura 3. 7 – Exterior do Cabeçote Galvanométrico.	57
Figura 3. 8 – O Chiller empregado no Sistema ELI (RANGE LASER, 2006).	58
Figura 3. 9 – Interação <i>Software-Hardware</i> no Sistema ELI.	60
Figura 3. 10 – Fórmula estrutural da Resina Epóxi.....	65
Figura 3. 11 – Fórmula estrutural do Dietilenotriamina.....	65
Figura 3. 12 – Representação de uma partícula de Sílica.....	66
Figura 4. 1 - <i>Interface</i> do <i>software</i> ANSYS.....	70
Figura 4. 2 – Esquema representativo da transferência de calor ocorrendo por convecção (a) e por condução (b).	75
Figura 4. 3 – Esboço do modelo físico teórico.	77
Figura 4. 4 – Fluxograma de Pré-processamento.....	78
Figura 4. 5 – Fluxograma de Pós-processamento.....	80
Figura 5. 1 – Malha de elementos com camada de ar.....	85
Figura 5. 2 – Representação do sistema <i>laser/</i> resina.....	86
Figura 5. 3 – Representação esquemática da circunferência descrita pelo <i>laser</i>	87
Figura 5. 4 – Caso 1A-I ($d=0,6\text{mm}$).....	94
Figura 5. 5 – Perfil Espacial da Temperatura 1A-I.....	94
Figura 5. 6 – Caso 2A-I ($d=0,8\text{ mm}$).....	94
Figura 5. 7 – Perfil Espacial da Temperatura 2A-I.....	94
Figura 5. 8 – Caso 3A-I ($d=1,0\text{mm}$).....	95
Figura 5. 9 – Perfil Espacial da Temperatura 3A-I.....	95
Figura 5. 10 – Caso 4A-I ($d=1,2\text{ mm}$).....	95
Figura 5. 11 – Perfil Espacial da Temperatura 4A-I.....	95
Figura 5. 12 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 1A-I, 2A-I, 3A-I e 4A-I.....	96
Figura 5. 13 – Caso 1B-I ($d=0,6\text{ mm}$).....	97
Figura 5. 14 – Perfil Espacial da Temperatura 1B-I.....	97
Figura 5. 15 – Caso 2B-I ($d=0,8\text{mm}$).....	97

Figura 5. 16 – Perfil Espacial da Temperatura 2B-I.....	97
Figura 5. 17 – Caso 3B-I ($d=1,0$ mm)	98
Figura 5. 18 – Perfil Espacial da Temperatura 3B-I.....	98
Figura 5. 19 – Caso 4B-I ($d=1,2$ mm)).....	98
Figura 5. 20 – Perfil Espacial da Temperatura 4B-I.....	98
Figura 5. 21 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 1B-I, 2B-I, 3B-I e 4B-I.	99
Figura 5. 22 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 1A-I e 1B-I.....	101
Figura 5. 23 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 2A-I e 2B-I.....	102
Figura 5. 24 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 3A-I e 3B-I.....	103
Figura 5. 25 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 4A-I e 4B-I.....	104
Figura 5. 26 – Caso 2A-II (P=10W).....	106
Figura 5. 27 – Perfil Espacial da Temperatura 2A-II	106
Figura 5. 28 – Caso 2A-III (P = 30W).....	106
Figura 5. 29 – Perfil Espacial da Temperatura 2A-III.....	106
Figura 5. 30 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 2A-I, 2A-II e 2A-III.....	107
Figura 5. 31 – Caso 2B-II (P = 10W).....	108
Figura 5. 32 – Perfil Espacial da Temperatura 2B-II	108
Figura 5. 33 – Caso 2B-III (P = 30W).....	108
Figura 5. 34 – Perfil Espacial da Temperatura 2B-III	108
Figura 5. 35 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 2B-I, 2B-II e 2B-III.....	109
Figura 5. 36 – Caso 3A-II (P = 10W).....	110
Figura 5. 37 – Perfil Espacial da Temperatura 3A-II	110
Figura 5. 38 – Caso 3A-III (P = 30W).....	110
Figura 5. 39 – Perfil Espacial da Temperatura 3A-III.....	110
Figura 5. 40 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 3A-I, 3A-II e 3A-III.....	111
Figura 5. 41 – Caso S0	112
Figura 5. 42 – Perfil Espacial da Temperatura S0.....	112
Figura 5. 43 – Caso S12	112
Figura 5. 44 – Perfil Espacial da Temperatura S12.....	112
Figura 5. 45 – Caso S35	113
Figura 5. 46 – Perfil Espacial da Temperatura S35.....	113
Figura 5. 47 – Caso S54	113
Figura 5. 48 – Perfil Espacial da Temperatura S54.....	113
Figura 5. 49 – Caso S70	113
Figura 5. 50 – Perfil Espacial da Temperatura S70.....	113
Figura 5. 51 – Caso S90	114
Figura 5. 52 – Perfil Espacial da Temperatura S90.....	114
Figura 5. 53 – Caso S110	114
Figura 5. 54 – Perfil Espacial da Temperatura S110.....	114
Figura 5. 55 – Caso S125	114
Figura 5. 56 – Perfil Espacial da Temperatura S125.....	114
Figura 5. 57 – Caso S140	115
Figura 5. 58 – Perfil Espacial da Temperatura S140.....	115
Figura 5. 59 – Temperaturas de Centro para todas as variações da Quantidade de Sílica ..	116
Figura 5. 60 – Temperaturas de Borda para todas as variações da Quantidade de Sílica ..	116
Figura 5. 61 – Caso 1A-I ($d = 0,6$ mm).....	117
Figura 5. 62 – Caso 2A-I ($d = 0,8$ mm).....	117
Figura 5. 63 – Caso 3A-I ($d = 1$ mm).....	117
Figura 5. 64 – Caso 4A-I ($d = 1,2$ mm).....	117

Figura 5. 65 – Resfriamento de Centro e Borda dos casos 1A-I, 2A-I, 3A-I e 4A-I.....	118
Figura 5. 66 – Caso 2B-I ($v = 2,39\text{m/s}$).....	118
Figura 5. 67 – Resfriamento de Centro e Borda dos casos 2A-I e 2B-I.....	119
Figura 5. 68 – Caso 2A-II (P=10W).....	120
Figura 5. 69 – Caso 2A-III (P=30W).....	120
Figura 5. 70 – Resfriamento de Centro e Borda dos casos 2A-I, 2A-II e 2A-III	120
Figura 5. 71 – Caso S0	121
Figura 5. 72 – Caso S35	121
Figura 5. 73 – Caso S70	121
Figura 5. 74 – Caso S110	122
Figura 5. 75 – Caso S140	122
Figura 5. 76 – Resfriamento de Centro e Borda dos casos S0, S35, S70, S110 e S140.....	122
Figura 6. 1 – Exemplo de uma malha de 15x5 elementos.....	131
Figura 6. 2 – Elemento mestre quadrilateral (quatro nós).....	133
Figura 6. 3 – Geração da malha de elementos finitos através do elemento mestre.....	135
Figura 6. 4 – Fluxograma do código FEM (unidade de pré processamento e processamento)	140
Figura 6. 5 – Fluxograma do código FEM (unidade de processamento e pós processamento)	141
Figura 7. 1 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	147
Figura 7. 2 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	147
Figura 7. 3 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	147
Figura 7. 4 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=110^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	147
Figura 7. 5 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	147
Figura 7. 6 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	147
Figura 7. 7 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas – Experimental.....	148
Figura 7. 8 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	149
Figura 7. 9 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	149
Figura 7. 10 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	149
Figura 7. 11 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=110^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	149
Figura 7. 12 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	150
Figura 7. 13 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}\text{C}$ – Experimental.....	150
Figura 7. 14 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas – Experimental.....	151

Figura 7. 15 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Fração de Conversão para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas – Experimental.	151
Figura 7. 16 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	153
Figura 7. 17 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	153
Figura 7. 18 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	153
Figura 7. 19 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=110^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	153
Figura 7. 20 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	154
Figura 7. 21 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	154
Figura 7. 22 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulado.	154
Figura 7. 23 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	155
Figura 7. 24 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	155
Figura 7. 25 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	155
Figura 7. 26 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=110^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	155
Figura 7. 27 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	155
Figura 7. 28 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.	155
Figura 7. 29 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulado.	156
Figura 7. 30 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Fração de Conversão para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulação.	157
Figura 7. 31 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Temperatura de Cura para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulação.	157
Figura 7. 32 – Tempo requerido para a Cura (T_p) x Temperatura de Cura para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulado.	158
Figura 7. 33 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.	160
Figura 7. 34 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.	160
Figura 7. 35 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.	161
Figura 7. 36 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=110^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.	161
Figura 7. 37 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.	162
Figura 7. 38 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.	162

Figura 7. 39 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}C$ – Experimental vs Simulado sem difusão.....	163
Figura 7. 40 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}C$ – Experimental vs Simulado sem difusão.....	163
Figura 7. 41 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}C$ – Experimental vs Simulado sem difusão.....	164
Figura 7. 42 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para T_{cura} $=110^{\circ}C$ – Experimental vs Simulado sem difusão.....	164
Figura 7. 43 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}C$ – Experimental vs Simulado sem difusão.....	165
Figura 7. 44 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}C$ – Experimental vs Simulado sem difusão.....	165
Figura 7. 45 – Taxas de Reação de Cura Máxima x Temperaturas Isotérmicas de Cura para os casos Experimental e Simulado.....	166
Figura 7. 46 – Tempos para Cura Máxima x Temperaturas Isotérmicas de Cura para os casos Experimental e Simulado.....	167
Figura 7. 47 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $80^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	170
Figura 7. 48 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $90^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	170
Figura 7. 49 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $100^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	170
Figura 7. 50 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $110^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	170
Figura 7. 51 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $120^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	171
Figura 7. 52 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $130^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	171
Figura 7. 53 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $80^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	171
Figura 7. 54 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $90^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	171
Figura 7. 55 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $100^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	172
Figura 7. 56 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $110^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	172
Figura 7. 57 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $120^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	172
Figura 7. 58 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de $130^{\circ}C$, Sem e Com Difusão – Simulado.....	172

Lista de Tabelas

Tabela 3. 1 – Características do <i>laser</i> disponível na FEQ (RANGE <i>LASER</i> , 2006).....	54
Tabela 3. 2 – Modelo do <i>Chiller</i> presente na FEQ/UNICAMP.	58
Tabela 3. 3 – Características da Fonte de Tensão.....	59
Tabela 3. 4 – Materiais da Amostra e respectivas proporções.	63
Tabela 3. 5 – Propriedades da amostra (resina epóxi + sílica).	65
Tabela 5. 1 – Propriedades físicas padrão utilizadas nas simulações dos Grupos 1, 2 e 3... 88	88
Tabela 5. 2 – Valores para os parâmetros do Grupo 1	89
Tabela 5. 3 – Valores para os parâmetros do Grupo 2	90
Tabela 5. 4 – Valores para os parâmetros do Grupo 3	91
Tabela 5. 5 – Valores para os parâmetros (S0, S12, S35, S54, S70) do Grupo 4.....	92
Tabela 5. 6 – Valores para os parâmetros (S90, S110, S125, S140) do Grupo 4.....	92
Tabela 5. 7 – Propriedades físicas dos materiais utilizadas nas simulações do Grupo 4.	93
Tabela 5. 8 – Temperaturas finais para os casos 1A-I, 2A-I, 3A-I, 4A-I.....	95
Tabela 5. 9 – Temperaturas finais para os casos 1B-I, 2B-I, 3B-I, 4B-I.....	98
Tabela 5. 10 – Temperaturas finais para os casos 1A-I e 1B-I.....	100
Tabela 5. 11 – Temperaturas finais para os casos 2A-I e 2B-I.....	102
Tabela 5. 12 – Temperaturas finais para os casos 3A-I e 3B-I.....	103
Tabela 5. 13 – Temperaturas finais para os casos 4A-I e 4B-I.....	104
Tabela 5. 14 – Temperaturas finais para os casos 2A-I, 2A-II e 2A-III.....	106
Tabela 5. 15 – Temperaturas finais para os casos 2B-I, 2B-II e 2B-III.....	109
Tabela 5. 16 – Temperaturas finais para os casos 3A-I, 3A-II e 3A-III.....	111
Tabela 5. 17 - Temperaturas finais para todos os casos de variação da quantidade de Sílica.	115
Tabela 5. 18 – Resfriamento após 3 segundos para os casos 1A-I, 2A-I e 3A-I.....	117
Tabela 5. 19 – Resfriamento após 3 segundos para os casos 2A-I e 2B-I.....	119
Tabela 5. 20 – Resfriamento após 3 segundos para os casos 2A-I, 2A-II e 2A-III.....	120
Tabela 5. 21 – Resfriamento após 3 segundos para os casos S0, S35, S70, S110 e S140..	122
Tabela 6. 1 – Valores para os pontos e fatores de Gauss.	137
Tabela 6. 2 – Sub-rotinas da Fase de Pré-processamento do STLG-FEM.....	138
Tabela 6. 3 – Sub-rotinas da Fase de Processamento do STLG-FEM.	139
Tabela 6. 4 – Subrotinas da Fase de Pós-Processamento do STLG-FEM.....	139
Tabela 6. 5 – Principais variáveis do STLG-FEM.	142
Tabela 7. 1 – Propriedades Termofísicas utilizadas nos experimentos e nas simulações (Amostras Sem Sílica).....	146
Tabela 7. 2 – Temperaturas de Cura utilizadas nos experimentos e nas simulações.	146
Tabela 7. 3 – Sumário dos valores máximos das taxas de cura.....	152
Tabela 7. 4 – Condições das Simulações.....	152
Tabela 7. 5 – Sumário dos valores máximos simulados das Taxas de Reação de Cura e de T_p	156
Tabela 7. 6 – Valores máximos das taxas de cura.....	166

Abreviaturas

2D	2 dimensões ou bidimensional
3D	3 dimensões ou tridimensional
3DP	Impressão Tridimensional (<i>3D Printing</i>)
APDL	Linguagem de Desenho Paramétrica ANSYS (<i>ANSYS Parametric Design Language</i>)
CAD	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CAE	Engenharia Assistida por Computador (<i>Computer Aided Engineering</i>)
CAM	Manufatura Assistida por Computador (<i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CW	Comprimento-de-onda contínuo (Continuous Wavelength) para o <i>laser</i>
DC	Tensão Contínua (Direct Current)
DSC	Calorímetro por Escaneamento Diferencial (<i>Differential Scanning Calorimetry</i>)
FDM	Modelagem por Deposição de Materiais Fundido (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
IR	Infravermelho (<i>Infrared</i>)
IRTL	Termolitografia por <i>Laser</i> Infravermelho (<i>Infrared Laser ThermoStereolithography</i>)
LASER	Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação (<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>)
LENS	Conformação Próxima ao Formato Final Via <i>Laser</i> (<i>Laser Engineering Net Shaping</i>)
LOM	Manufatura de Objetos em Lâminas (<i>Laminated Object Manufacturing</i>)
MEF	Método dos Elementos Finitos (<i>Finite Elements Analysis-FEA</i>)
MEMS	Sistema Micro-eleto-mecânico (<i>Micro-Electro-Mechanical-System</i>)
RM	Manufatura Rápida (<i>Rapid Manufacturing</i>)
RP	Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)

RT	Ferramental Rápido (<i>Rapid Tooling</i>)
SGC	Cura Sólida na Base (<i>Solid Ground Curing</i>)
SL	Estereolitografia (Processo)
SLA	Estereolitografia (Equipamento) (<i>StereoLithography Apparatus</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a <i>Laser</i> (<i>Selective Laser Sintering</i>)
STL	Formato padrão de arquivos para a Estereolitografia (<i>Stereolithography Format</i>)
STLG-FEM	Programa Fortran “Processos Termoestereolitográfico através de MEF (<i>Stereo-Thermal and LithoGraphic Processes through the Finite Element Method</i>)
UV	Ultra-violeta (<i>Ultraviolet</i>)

Nomenclatura

a	raio da trajetória circular
c_p	calor específico
[D]	matriz condutibilidade
E	energia de ativação
E	quantidade de energia depositada
h	coeficiente de transferência de calor por convecção (constante de Planck)
I_T/I_0	transmitância da amostra
k_o	fator pré-exponencial ou de frequência
k_c	taxa constante da velocidade da reação na temperatura
$K_c(t)$	constante da taxa quimicamente controlada ou constante cinética da reação
k_e	taxa constante global
k_d	taxa constante por difusão controlada
k_q	taxa constante quimicamente controlada
m	constante correspondente à ordem da reação
n	constante correspondente à ordem da reação
P	potência do <i>laser</i>
\vec{q}	vetor fluxo de calor
\dot{q}	taxa de geração de calor
R	constante dos gases
R	refletância do cristal KBr
t	tempo
T_{cura}	temperatura de cura
t_d	tempo de interação ou <i>dwel time</i>
T_g	temperatura transiente de vitrificação
T	temperatura
V	volume irradiado
\vec{V}	vetor velocidade de transporte de calor que pode ser escrito da forma $\{V_x, V_y, V_z\}$
x_C	espessura do cristal
x_s	espessura da amostra

Letras Gregas:

α	fração de conversão
δ	profundidade de absorção óptica da amostra
λ	comprimento de onda
$\Delta + T$	temperatura absoluta
ρ	densidade de massa
v	velocidade de varredura do <i>laser</i>
ω	raio do feixe <i>laser</i>
2ω	diâmetro do feixe <i>laser</i>
α_c	coeficiente de absorção óptica do cristal
ϕ	taxa de aquecimento

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A Prototipagem Rápida consiste na utilização de um conjunto de processos tecnológicos e de tecnologias da informação que permitem fabricar modelos físicos tridimensionais diretamente a partir de um projeto inicial (desenho) em CAD (Desenho Assistido por Computador). Esta tecnologia é capaz de transformar qualquer tipo de objeto, originalmente num estágio virtual, para um estágio real.

Um Sistema de Prototipagem Rápida consiste da integração dos quesitos “Técnica” e “Material”. Um Processo de Prototipagem Rápida refere-se mais especificamente à técnica empregada. O processo geral de Prototipagem Rápida inicia-se através da projeção do desenho do objeto (modelo) a ser reproduzido, com o auxílio de um software de modelamento e design (CAD). A Figura 1.1 apresenta o diagrama de um processo geral e completo de Prototipagem Rápida. Os termos presentes neste diagrama serão discutidos no decorrer deste trabalho.

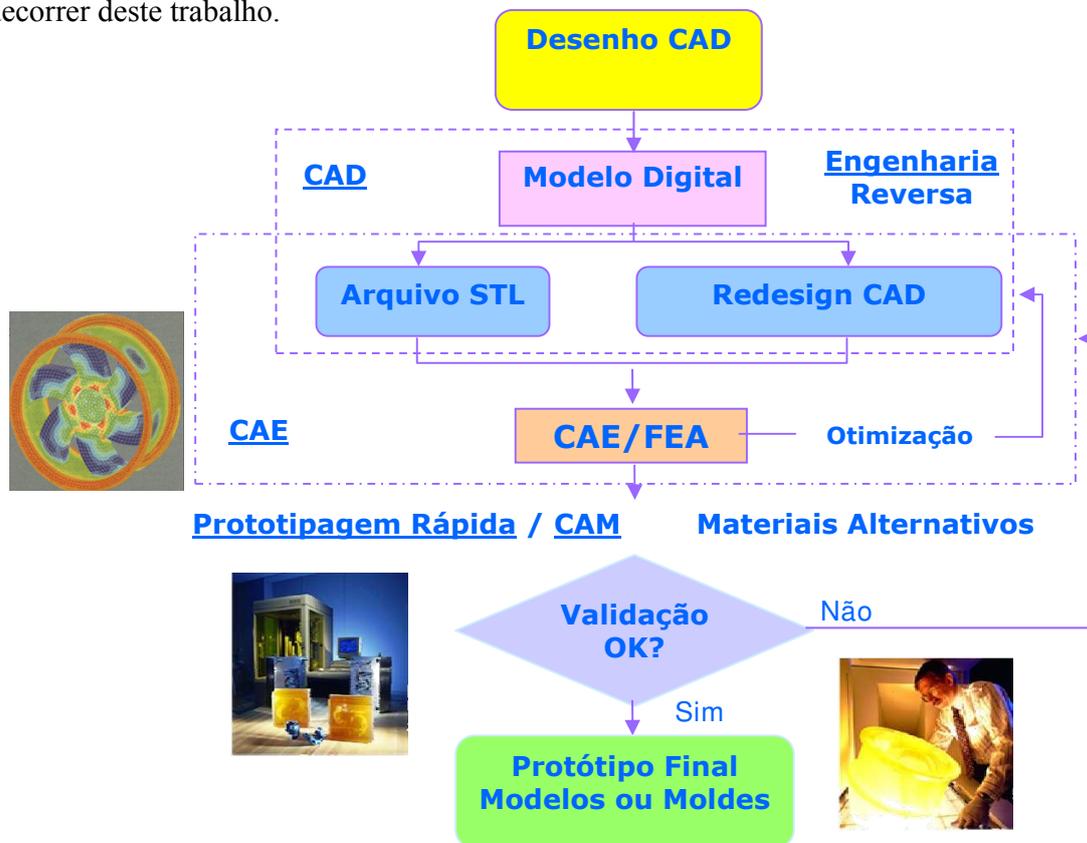


Figura 1. 1 – Esquema geral do processo completo da Prototipagem Rápida.

Atualmente, a Prototipagem Rápida vem conquistando cada vez mais adeptos, tanto em função da sua praticidade quanto principalmente da redução sensível de custos em pré-projetos e em fases intermediárias do processo. Atualmente, existem diversos processos de Prototipagem Rápida conhecidos na indústria e no meio acadêmico.

Os sistemas de Prototipagem Rápida visam despertar o interesse pelo desenvolvimento de novos produtos. Em um primeiro momento, estes sistemas são utilizados para testes de novos *design*, evitando a produção real do objeto antes da conclusão definitiva do projeto, e para a avaliação da capacidade de funcionamento real do protótipo. Os protótipos podem servir como objeto em funcionamento real e podem servir também como moldes.

Em caso de haver a necessidade de produções unitárias ou em pequena e média escala de peças para reposição ou moldes, a Prototipagem Rápida pode ser em muitos casos, um instrumento alternativo devido à sua viabilidade, praticidade, baixo custo e rapidez.

A Prototipagem Rápida apresenta uma gama muito diversificada de possibilidades de aplicação, a ponto de prover soluções em vários setores da indústria e de prestação de serviços. Por exemplo, é possível a utilização da Prototipagem Rápida em áreas como medicina (próteses biomédicas, engenharia de tecidos); odontologia (reconstituição facial e maxilar); arquitetura (construções de maquetes); mecânica (produção de moldes e peças para maquinário em geral); aeronáutica (produção de peças para construção de aviões e espaçonaves, por exemplo, da NASA); arqueologia (reconstituição e manutenção de objetos antigos); engenharia elétrica (produção de componentes microeletrônicos); dentre outras.

De todos os processos de Prototipagem Rápida atualmente disponíveis no mercado, a estereolitografia é o processo mais antigo que garante a maior precisão dimensional e física de peças de pequeno porte.

Um fator de grande impacto em resultados com esta tecnologia pode ser o material utilizado no processo. Várias são as matérias-primas aplicadas na Prototipagem Rápida.

Existem sistemas que trabalham com pó, com resinas poliméricas, com metais, plásticos, cerâmica etc. O futuro da Prototipagem Rápida está diretamente ligado à descoberta de novos materiais e processos

A intensa investigação que é feita internacionalmente neste domínio permite esperar que num futuro relativamente próximo, haja possibilidade de executar modelos de boa qualidade num leque amplo de materiais quer polimérico, quer metálico, quer cerâmico. Tal fato ampliará ainda mais o campo de aplicação das tecnologias de Prototipagem Rápida.

A utilização da Prototipagem Rápida pode reduzir em até 85% o tempo necessário para a confecção de moldes e modelos físicos. Além da redução de tempo e do ciclo de desenvolvimento, os usuários da técnica estarão aptos a realizar rapidamente alterações de projeto do modelo. As técnicas de Prototipagem Rápida produzem peças tridimensionais com bastante rapidez, de forma a tornarem possíveis produções em série, e com a vantagem de permitir a visualização das peças antes de suas execuções nas linhas de produção, e possibilitando, inclusive, a correção de eventuais erros dimensionais e outros que, porventura, possam estar presentes no desenho inicial e que tenham passado despercebidos.

Tradicionalmente a Estereolitografia, mais antiga técnica de Prototipagem Rápida e comercializada pela empresa 3D Systems, é realizada com o *laser* com fonte de luz ultravioleta, sendo aplicado em resinas fotossensíveis especiais. A Figura 1.2 mostra este processo, conhecido como SL *Stereolithography Apparatus*.



Figura 1.2 – Sistema SL comercializado pela empresa 3D Systems.

Os SL são aparelhos comerciais de modelos variados que, embora de custo muito elevado, são capazes de produzir peças tridimensionais de grande porte, cuja relação custo \times benefício, em função dos problemas técnicos que apresentam, é discutível.

Ressalta-se que, embora a técnica tradicional esteja amplamente desenvolvida no mundo, ainda depara-se com dificuldades encontradas na confecção dos modelos devido ao problema de contração sofrida pela peça-protótipo e ao tratamento adicional de pós-cura com luz ultravioleta, além de tratar-se de um processo que envolve custo elevado, tanto do equipamento quanto da resina empregada.

O maior problema que ocorre com o processo tradicional é a necessidade de um ajuste muito cauteloso para que as dimensões da peça não saiam das especificações, uma vez que, as resinas tratadas à luz ultravioleta se contraem na cura ou no processo de cura, além de, não curarem completamente com o *laser* aplicado, havendo a necessidade de um tratamento adicional pós-cura que requer de 10 a 15% do tempo total de processo.

Devido a este motivo, e com o intuito de resolver e solucionar as dificuldades apresentadas, o processo de aplicação do *laser* no infravermelho, proposto neste projeto, foi idealizado e desenvolvido por SCARPARO *et al.* (1992) e colaboradores, na Faculdade de

Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), inicialmente para confecção de pequenas peças tridimensionais, sem contração da peça e eliminando o tratamento adicional de pós-cura.

Desta forma, a obtenção de peças tridimensionais em resinas termossensíveis aplicando o *laser* no infravermelho, resulta em significantes vantagens, na sua utilização e solução de problemas técnicos dos processos convencionais de estereolitografia que utilizam *laser* no ultravioleta e resinas fotossensíveis. Dentre as quais podem ser citadas:

- Solução de problema crônico relacionados com a contração da resina fotossensível quando exposta por luz ultravioleta. Os processos tradicionais dispõem de custos extras para solucionar este problema. No sistema proposto, o processo não envolve contração da resina termossensível, minimizando o custo e tempo de obtenção das peças.
- Eliminação do tratamento de pós-cura da resina fotossensível. Enquanto no processo tradicional há necessidade de cura adicional e operacional, envolvendo tempo e gasto, no processo proposto neste projeto, a cura é imediata, localizada e completa.
- Investimento bem menor do que outros processos de Prototipagem Rápida, pois o *laser* de CO₂ utilizado no sistema proposto é de baixo custo em relação ao de UV.
- Utilização de resinas termossensíveis comuns, tipo epóxi e poliéster insaturado, de baixo custo, comparadas com as resinas fotossensíveis, geralmente utilizadas no processo tradicional.
- A composição da amostra é um avanço científico e de inovação tecnológica, com combinação de um agente de cura e, fundamentalmente, a sílica em pó, que permite o controle do calor na região espacial, em 3 dimensões, a ser curada para ser possível a construção do protótipo com precisão.
- O protótipo obtido neste processo, assim como os tradicionais, apresenta também boa rigidez mecânica com uma boa resolução espacial, como mostra a Figura 1.3:

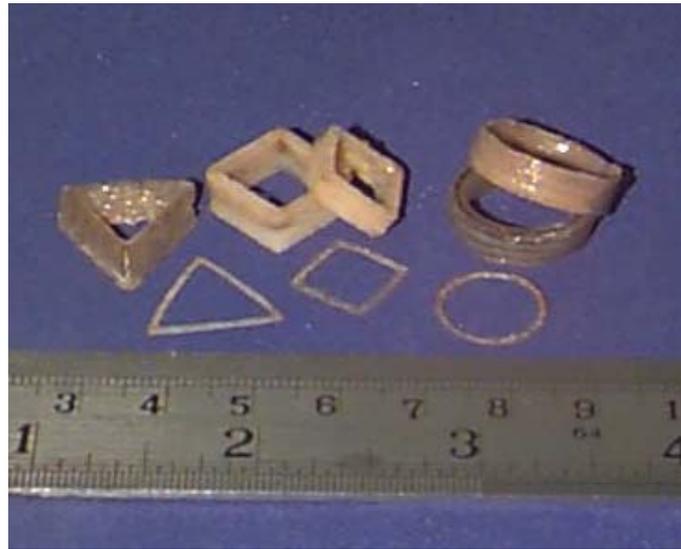


Figura 1. 3 – Peças tridimensionais iniciais obtidas com a Estereolitografia com *laser* no Infravermelho.

1.1 – Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é representar o ambiente de funcionamento do processo de Estereolitografia com *laser* Infravermelho, simulando o comportamento de diversos parâmetros do sistema a partir da variação dos mesmos, interpretando os resultados gerados, a fim de se obter um maior domínio de como as variáveis podem interferir na confecção do protótipo final.

Dois modelos são utilizados no trabalho. O primeiro é o Modelo Cinético STLGFEM desenvolvido pelo pesquisador BÁRTOLO (2001), que visa a análise do comportamento de parâmetros como a temperatura de cura da amostra, através de resultados da fração de conversão da composição sob exposição ao *laser* infravermelho e a taxa de reação de cura. O segundo, o Modelo Numérico, aplicado ao *software* comercial ANSYS, representa o processo sob a plataforma de engenharia assistida por computador, cujas análises cerceiam parâmetros operacionais do próprio *laser*, tais como a potência do *laser*, o diâmetro do feixe, a velocidade de varredura etc. Ambos os modelos baseiam-se no Método dos Elementos Finitos (MEF), vide APÊNDICE E.

A idealização do processo de Estereolitografia por *laser* Infravermelho e sua afirmação, que já são uma realidade, necessitam de contínuas investigações com o propósito de aperfeiçoar e consolidar cada vez mais esta nova tecnologia de Prototipagem Rápida. E isto é o que se busca na realização aqui apresentada.

1.2 – Organização do Trabalho

O Capítulo 2, “Estado da Arte da Prototipagem Rápida e da Estereolitografia”, apresenta a definição de Prototipagem Rápida, um breve histórico, seus métodos e processos, além da Estereolitografia, seu conceito e tecnologias correlatas com a Prototipagem Rápida, incluindo tecnologias assistidas por computador, como a Engenharia Reversa e, também, a Microestereolitografia.

O Capítulo 3, “O Sistema ELI”, apresenta o sistema estudado na tese, o qual compreende o processo da Estereolitografia com *laser* de CO₂ infravermelho, para resinas termossensíveis, e descreve a máquina piloto do processo.

O Capítulo 4, “O Modelo Numérico ANSYS”, oferece um detalhamento sobre o modelo real adaptado para o ANSYS, com suas equações e variáveis, os modos de transferência de calor e a elaboração de modelos com o *software*.

O Capítulo 5, “Resultados do Modelo Numérico ANSYS”, são apresentadas as simulações realizadas, os valores adotados para todas as propriedades termo-físicas e parâmetros do *laser*, além de discussões e comentários sobre os resultados obtidos.

O Capítulo 6, “O Modelo Cinético STLG-FEM”, tece maiores detalhes a respeito da cinética de cura e das reações de cura termo-iniciadas que são caso de estudo do presente trabalho.

O Capítulo 7, “Resultados do Modelo Cinético STLG-FEM”, aponta os resultados gerados nas simulações, disponibilizando e comparando os dados em gráficos de Fração de Conversão e Taxa de Cura *versus* Tempo de Aquecimento.

O Capítulo 8, “Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros”, encerra o trabalho com as conclusões gerais e faz alusão a propostas de novos desenvolvimentos na continuidade deste trabalho.

Os apêndices trazem um material complementar e resumido sobre temas envolvidos no decorrer da dissertação.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA E DA ESTEREOLITOGRAFIA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a Prototipagem Rápida, sua definição, sua evolução, situação atual, seus métodos e processos, as áreas de aplicação e os benefícios e tecnologias envolvidas.

2.1 – A Prototipagem Rápida

2.1.1 – Definição

A Prototipagem Rápida, do inglês, *Rapid Prototyping* (RP), consiste basicamente na concepção física de um modelo tridimensional virtual (cujo *design* é projetado com auxílio de computador) em um modelo real.

Segundo WOHLERS (2004), a Prototipagem Rápida refere-se ao modelamento físico de um desenho, usando digitalmente processos aditivos. Sistemas de Prototipagem Rápida produzem rapidamente modelos e partes de protótipos de dados oriundos de programas de auxílio por computador (CAD), *scanners* ou sistemas digitalizadores em 3D. Assumindo-se uma abordagem aditiva, os sistemas de Prototipagem Rápida agregam materiais líquidos, em forma de pó ou gel para constituírem objetos físicos. Diversos são os materiais aplicáveis na Prototipagem Rápida. Camada a camada, máquinas de Prototipagem Rápida podem processar plásticos, papéis, cerâmica, metais e materiais compósitos, através de camadas horizontais de seções muito finas.

A palavra “Rápida” é relativa, ou seja, a construção de um modelo com máquinas contemporâneas gasta tipicamente de 3 a 72 horas, dependendo do tipo da máquina e do tamanho e nível de detalhes do modelo.

Universidades e empresas voltadas ao desenho e à manufatura utilizam-se da Prototipagem Rápida para fabricarem modelos, partes e moldes para produtos de consumo nos mercados industrial, médico e militar. De uma longa lista desses produtos, alguns

exemplos são: fotocopiadoras, câmeras, jogos eletrônicos, telefones celulares, peças para automóveis, suprimentos para aviões e equipamentos médicos.

A grande vantagem da tecnologia de Prototipagem Rápida é a habilidade de se construir protótipos de qualquer natureza de complexidade geométrica (ou seja, a geometria das peças é livre).

Outras vantagens que podem ser mencionadas são relacionadas com redução considerável de tempo e custo, não-necessidade de grandes ferramentais, aplicação de materiais heterogêneos, produtos sob encomenda e descentralização da produção.

Devido ao curtíssimo ciclo de vida dos produtos, as empresas vêm sentindo a necessidade de adaptar novas técnicas e formas de produção. A cada momento, novas soluções são requeridas e, caso a empresa não esteja preparada para colocar em prática tal solução já existente, pode não haver tempo suficiente para todo um processo de análise, testes e produção final. Para não serem surpreendidas e perderem mercado, as empresas têm revisto suas estratégias e metodologias técnicas e comerciais e seus planejamentos no que tangem à linha de produção.

Uma grande dificuldade encontrada pelos fabricantes é a centralização de informações e a falta de acesso a elas. As empresas conhecem muito bem o seu funcionamento, suas políticas, suas possibilidades, a capacidade e perfil dos recursos humanos, ou seja, o seu “mundo interior”. Por muitas vezes, no entanto, precisarão buscar no “mundo exterior” recursos e novos conhecimentos que não possuem. Esta busca pode esbarrar na concorrência, o que dificultará ou tornará caro o processo. E, provavelmente, evidenciará o gargalo maior – um tempo disponível reduzido para se obter e se colocar em prática todas estas novas informações e ferramentas.

A Prototipagem Rápida é uma tecnologia que tornou possível a fabricação de muitas peças que, até então, não eram viáveis, tanto em termos de custo de produção quanto em termos de sua manufatura devido às suas formas de difícil construção. Esta técnica causou, portanto, um profundo impacto na maneira como as indústrias produziam seus modelos, partes de protótipos e ferramentais. Em um cenário mais recente, as empresas passaram a

explorar a Prototipagem Rápida para a confecção de produtos finais, processo denominado como Manufatura Rápida (*Rapid Manufacturing*, RM) ou modelo funcional. Esta prática elevou consideravelmente a Prototipagem Rápida e os mercados de Ferramental Rápido, do inglês, *Rapid Tooling* (RT).

A qualidade mínima requerida dos protótipos finais só é garantida com uma análise prévia bem realizada em termos de suas dimensões e nível de detalhamento geométrico. O planejamento do produto final precisa ser bem minucioso e conciso, e isto demanda altos custos e tempo. Do contrário, a execução passa a se basear no método da “tentativa-e-erro”. Neste sentido, o ambiente virtual incorporado à Prototipagem Rápida vem ao encontro às necessidades de pré-produção, oferecendo um auxílio nos quesitos projeto, planejamento e predição.

Conforme afirmado por BERNARD *et al.* (2003), a Prototipagem Virtual (*Virtual Prototyping*, VP) recorre aos programas de assistência por computador, os quais, além da assistência na modelagem da peça (*design*), também oferecem simulações para o modelo antes do início de sua concepção física. Estas simulações facilitam testar e avaliar os efeitos dos parâmetros e suas características em busca dos requisitos de qualidade exigidos, otimizando o processo e o produto final. CHOI e SAMAVEDAM (2001) afirmam que a Prototipagem Virtual, sobretudo, pode ajudar a reduzir o número de iterações da prototipagem física. Os esforços da Prototipagem Virtual para as simulações dos processos de manufatura têm sido focados na visualização do produto final sob as condições específicas de operação.

Um projeto de Prototipagem Rápida bem fundamentado deve prever uma série de variantes que influenciarão o resultado final do processo. Não apenas os cuidados nos tratamentos das multicamadas “curadas” devem ser considerados pontos cruciais. Sob um panorama geral, outros critérios devem ter o mesmo grau de importância tais como o custo, a qualidade, o atraso na resposta do sistema em funcionamento, a diversidade de materiais e suas aplicações, cores, etc.

A integração entre os ambientes virtual e real favorece o processo como um todo, possibilitando ao *designer* analisar a influência dos parâmetros do processo e visualizar o

produto final. A fase do *design* sendo bem executada é um forte indício de sucesso ao final da fase de produção. De fato, a exemplo do que ocorre em outras áreas de conhecimento, como projeto de processos químicos, a etapa de projeto conceitual é fundamental para a concepção de processos com alto grau de otimização.

É necessário definir os objetivos finais através das especificações intermediárias, para se deduzir a melhor solução.

2.1.2 – Breve Histórico

O pesquisador japonês Hideo Kodama, do Instituto de Pesquisa Industrial Municipal de Nagoya, foi o primeiro a publicar relatos sobre um sistema de Prototipagem Rápida fotopolimérico funcional, em 1981 (KODAMA, 1981). Em seu método, um modelo sólido foi fabricado pela construção de uma peça em camadas, onde as áreas expostas correspondiam a uma seção cruzada no modelo.

Sistemas de Prototipagem rápida surgiram inicialmente em 1987 com o processo de estereolitografia (*StereoLithography* - SL) da empresa americana 3D *Systems*, processo que solidifica camadas de resina foto-sensível por meio de *laser* (CARVALHO, 2006).

Após a empresa 3D *Systems* iniciar a comercialização de máquinas SL nos EUA, as empresas japonesas NTT Data e Sony/D-MEC passaram a comercializar suas versões de máquinas de estereolitografia em 1988 e 1989, respectivamente. Em seguida, em 1990, a empresa *Eletro Optical Systems* - EOS na Alemanha, passou a comercializar o sistema conhecido como *Stereos*.

Logo após vieram as tecnologias conhecidas como *Fused Deposition Modeling* (FDM) da empresa americana *Stratasys*, *Solid Ground Curing* (SGC) da israelense *Cubital e Laminated Object Manufacturing* (LOM), todas em 1991.

Sistemas de sinterização (*Selective Laser Sintering* - SLS) da empresa americana DTM e o sistema Soliform de estereolitografia da japonesa Teijin Seiki tornaram-se disponíveis em 1992. Usando calor gerado pelo *laser*, o SLS funde pós-metálicos e pode ser utilizado para obtenção direta de matrizes de injeção.

A Figura 2.1 mostra as patentes da Prototipagem Rápida depositadas no período de 1979 a 1992.

Proprietário	Título da Patente	Depositada	País
Housholder	Molding process	December 1979	U. S.
Murutani	Optical molding method	May 1984	Japan
Masters	Computer automated manufacturing process and system	July 1984	U. S.
André et al.	Apparatus for making a model of an industrial part	July 1984	France
Hull	Apparatus for making three-dimensional objects by stereolithography	August 1984	U. S.
Pomerantz et al.	Three-dimensional mapping and modelling apparatus	June 1986	Israel
Feygin	Apparatus and method for forming an integral object from laminations	June 1986	U. S.
Deckard	Method and apparatus for producing parts by selective sintering	October 1986	U. S.
Fudim	Method and apparatus for producing three-dimensional objects by photosolidification; radiating an uncured photopolymer	February 1987	U. S.
Arcella et al.	Casting shapes	March 1987	U. S.
Crump	Apparatus and method for creating three-dimensional objects	October 1989	U. S.
Helinski	Method and means for constructing three-dimensional articles by particle deposition	November 1989	U. S.
Marcus	Gas phase selective beam deposition: three-dimensional, computer-controlled	December 1989	U. S.
Sachs et al.	Three-dimensional printing	December 1989	U. S.
Levent et al.	Method and apparatus for fabricating three-dimensional articles by thermal spray deposition	December 1990	U. S.
Penn	System, method, and process for making three-dimensional objects	June 1992	U. S.

Figura 2. 1 – Patentes da Prototipagem Rápida depositadas entre 1979 e 1992 (BEAMAN, 2006).

Em 1993, os pesquisadores SCARPARO *et al.* (1992) e BARROS (1993) iniciaram o desenvolvimento do Processo de Termolitografia por *Laser* Infravermelho, na Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. JARDINI (2001) ofereceu novas contribuições e o desenvolvimento do sistema, incluindo os equipamentos, o qual foi patenteado em 2001, com a denominação ELI.

2.1.2 – O Cenário Atual

A partir de 2003, a indústria da Prototipagem Rápida inverteu a sua tendência de retração e voltou a crescer. A venda de máquinas cresceu de forma significativa, principalmente as impressoras 3D (3DP), que se tornaram as preferidas do mercado. Com o

aumento das vendas e instalações destas máquinas, por consequência, o número de moldes produzidos também aumentou.

Embora uma razoável fatia do mercado da Prototipagem Rápida venha atravessando um bom momento, alguns setores necessitam de uma completa transformação se pretendem continuar ativos no mercado por um período maior.

As principais empresas da Prototipagem Rápida, como a Stratasys, Z Corp, 3D Systems e algumas outras, venderam uma quantidade de máquinas estimada em 1032 unidades. Pela primeira vez em um ano, a casa dos três dígitos foi quebrada em números de unidades vendidas.

A Figura 2.2 proporciona uma idéia do crescimento da indústria da Prototipagem Rápida em 2003 em relação aos anos anteriores em função da produção de moldes e de protótipos.

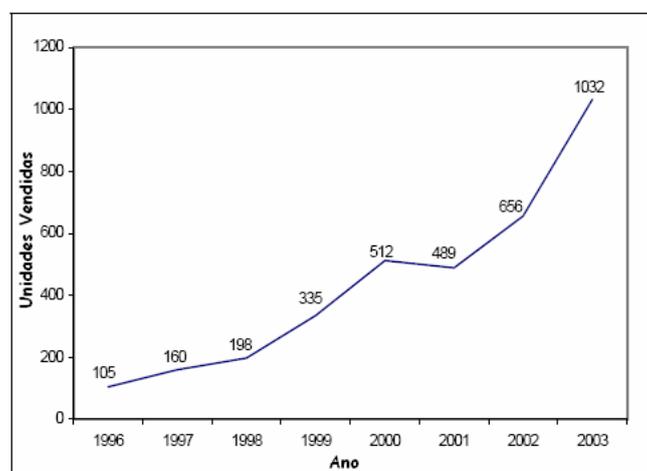


Figura 2. 2 – Unidades de Máquinas de Prototipagem Rápida vendidas por ano (WOHLERS, 2004).

De acordo com WOHLERS (2004), foi produzida uma média aproximada de duas cópias de um único modelo em 2003, o que significa cerca de 2,34 milhões de partes distintas confeccionadas, o que pode ser constatado na Figura 2.3.

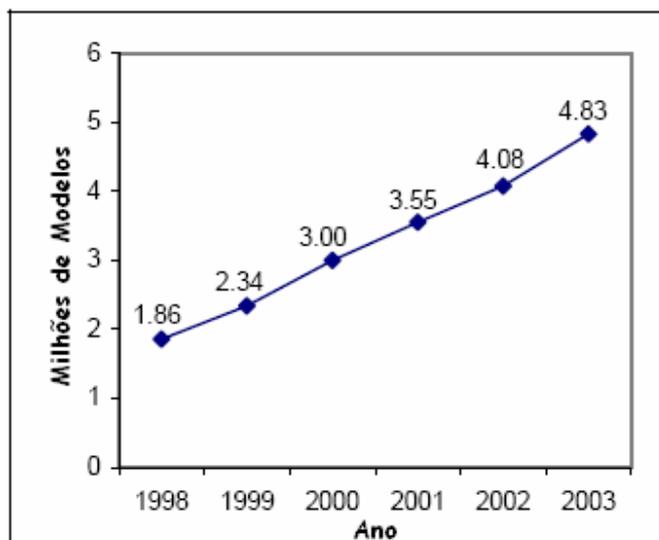


Figura 2. 3 – Milhões de Modelos produzidos por ano (WOHLERS, 2004).

A Figura 2.4 apresenta a situação mundial dos países que já haviam adotado a Prototipagem Rápida até 2003, em termos de produção e venda destes sistemas. Os EUA lideram com bastante vantagem este *ranking* com uma fatia equivalente a 76,2% do total. Os países que mais ameaçam são: o Japão (que experimentou um declínio) e a China que elevou sua taxa de crescimento neste setor de 2,7% em 2002 para 3,5% em 2003.

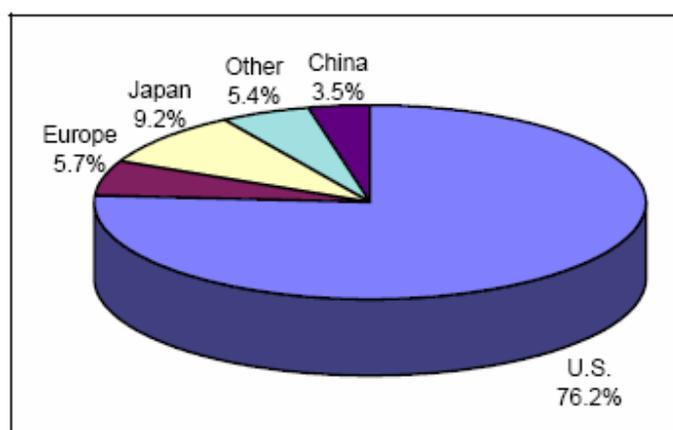


Figura 2. 4 – Domínio da Prototipagem Rápida por países e regiões (WOHLERS, 2004).

Atualmente, grande parte das indústrias de manufatura utiliza a Prototipagem Rápida, sendo que, as indústrias automobilísticas e de produtos de consumo, como embalagens, por exemplo, vêm dominando o mercado com uma fatia equivalente a 48,3%

do total. Alguns setores da indústria que também exploram a Prototipagem Rápida são a aeronáutica, a medicina, a odontologia, a eletrônica, a arquitetura, o ramo bélico, arqueologia, dentre outros.

Devido ao alto grau de flexibilidade, sensibilidade e adaptabilidade várias das técnicas da Prototipagem Rápida requerem o uso de robôs ou mecanismos equivalentes.

A Figura 2.5 apresenta a divisão global dos principais setores utilizadores da Prototipagem Rápida no ano de 2003:

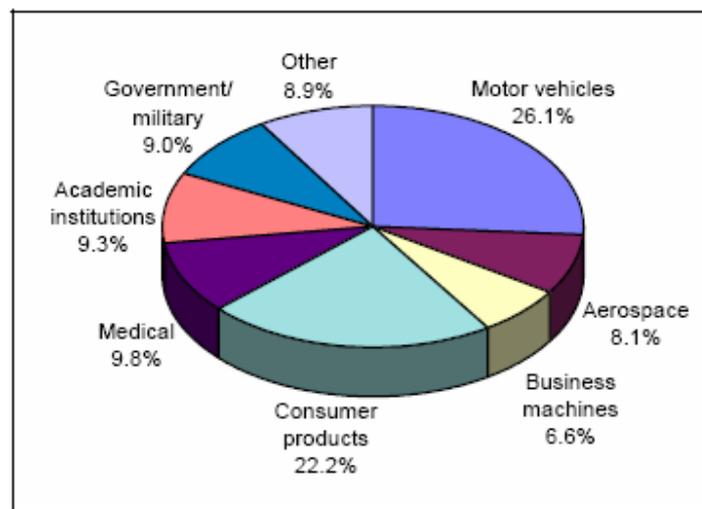


Figura 2.5 – Domínio da Prototipagem Rápida por setores (WOHLERS, 2004).

2.1.3 – A Prototipagem Rápida no Mundo dos Negócios

A Prototipagem Rápida, por ser uma tecnologia inovadora, está revolucionando a indústria da manufatura e, por conseguinte, mudando o conceito dos negócios nesta área. Algumas conseqüências e vantagens desta revolução são descritas a seguir:

- Economia de dinheiro – Devido ao encurtamento da fase de *design*, enxugamento na produção, custos de ferramental e re-trabalho.
- Economia de tempo – O processo de produção, da primeira à última fase, que antes durava dias, passa a requerer horas, mesmo com eventuais ajustes e correções de *design* e análise do produto final; sem comprometer prazos com o mercado.

- Teste de Produto – A utilização de moldes e modelos para se comparar e avaliar peças já produzidas e, em certos casos, tomar providências cabíveis acerca do processo.
- Prevenção de Erros – A descoberta de erros em fase anterior à produção, diminuindo custos de re-trabalho.
- Aperfeiçoamento de Design – A eficiência e viabilidade de custo possibilitam a adaptação de um objeto já criado através de alterações de forma, tamanho, etc.
- Venda do Produto – A apresentação de um protótipo real, ou mesmo, virtual ao cliente, no fechamento de uma negociação, pode ser um grande diferencial pelo impacto e pela boa impressão que se causa.
- Manufatura Rápida – A garantia de um processo rápido de desenvolvimento e produção é uma necessidade do cliente e uma grande motivação para sua aceitação.

2.1.4 – Métodos de Prototipagem Rápida

Os métodos de Prototipagem Rápida existentes podem ser classificados em três categorias:

- *Método Aditivo*

Neste método, a máquina lê os dados de entrada a partir de um sistema CAD e constrói finíssimas camadas com materiais como plástico líquido, resina, ou algum outro material da engenharia aplicável à Prototipagem Rápida. As camadas são coladas ou fundidas uma a uma. A primeira grande vantagem do método aditivo é a habilidade oferecida em se construir formas de qualquer tipo de geometria.

- *Método Subtrativo*

É o método mais antigo e que apresenta pouca eficiência. A ideia aqui se compara com o trabalho de um escultor que entalha um bloco maciço de madeira ou mármore,

desgastando-o até que a forma final seja definida. As desvantagens aqui são a lentidão para a concepção do produto, a limitação nas formas obtidas e o material desperdiçado.

- *Método de Conformação*

Quando existe um molde (fôrma) ao qual se pode inserir ou injetar material para a composição do objeto.

2.1.5 – Principais Processos

Diversos são os processos de Prototipagem Rápida existentes no cenário atual. Os principais são: *Estereolitografia (SL)*, *Sinterização Seletiva a Laser (SLS)*, *Modelamento por Deposição de Material Fundido (FDM)*, *Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM)*, *Cura Sólida na Base (SGC)*, *Impressão Tridimensional (3DP)*, *Conformação Próxima ao Formato Final Via Laser (LENS)* (GIBSON *et al.*, 2002). Além desses, a *Termolitografia por Laser IR (IRTL)* tem enfoque especial por ser o processo-base de estudo deste trabalho.

A Estereolitografia é o processo mais utilizado na tecnologia da Prototipagem Rápida e consiste basicamente da foto ou termopolimerização de materiais poliméricos inicialmente em estado líquido ou com alta viscosidade, respectivamente, sob radiações ultravioleta ou infravermelho (ROSOCHOWSKI e MATUSZAK, 2000).

2.1.5.1 – Estereolitografia (SL)

Do idioma inglês, *Stereolithography Apparatus*, é baseado no conceito da manufatura por camada, na qual o modelo polimérico tridimensional é formado de acordo com o modelo gerado pelo sistema CAD, utilizando-se emissão de radiação ultravioleta para a cura de uma resina fotossensível para a construção do modelo físico. É um dos sistemas mais comumente utilizados. O protótipo final possui alta precisão e boa resolução na sua superfície. Um feixe de *laser* Ultra-Violeta é incidido na superfície do material, um foto-polímero líquido, construindo a peça camada a camada, como mostra a Figura 2.6. O foto-polímero é solidificado, portanto, pelo feixe de *laser*. Assim que uma camada é solidificada, uma próxima camada do líquido sobrepõe a anterior, sofrendo o mesmo processo. Ao final de todas as camadas, o objeto está tridimensional finalizado.

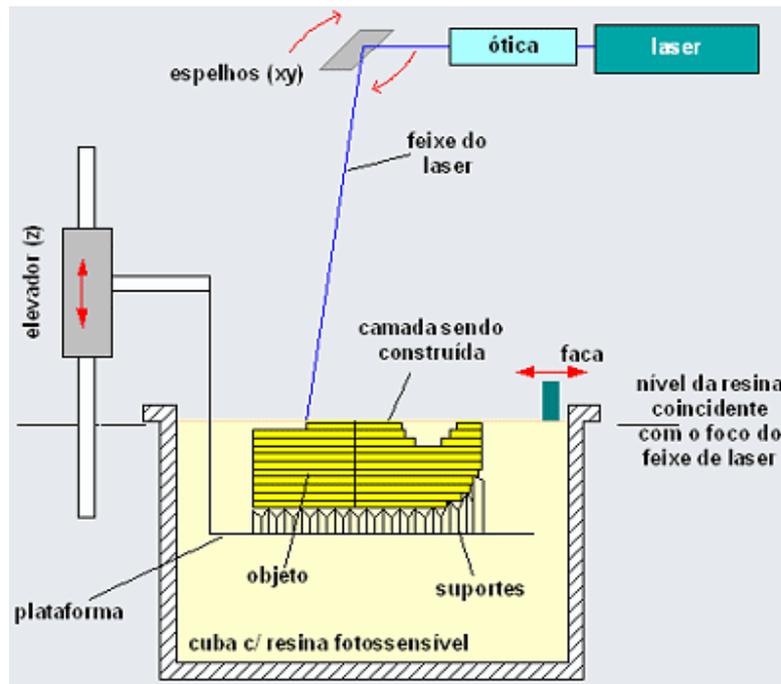


Figura 2. 6 – Vista em corte do processo SL

As Figuras 2.7 e 2.8 mostram, respectivamente, o processo em execução em que os protótipos são irradiados por *laser* UV, e uma máquina do processo SL.

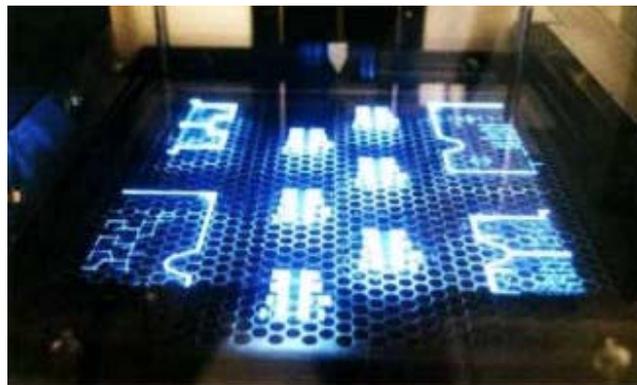


Figura 2. 7 – Protótipos em Construção.



Figura 2. 8 – Exterior de uma Máquina SL.

2.1.5.2 – Sinterização Seletiva a *Laser* (SLS)

Do idioma inglês, *Selective Laser Sintering*. Neste processo, aditivo, uma fina camada de pó é depositada sobre uma plataforma para a construção do modelo físico e um *laser* de Dióxido de Carbono (CO₂) de alta potência sinteriza (funde) pequenas partículas de plástico, metal ou pós-cerâmicos e gera o sólido final, como pode ser visto nas Figuras 2.9 e 2.10. O pó não sinterizado é removido ao final da construção do objeto. Este processo SLS é bastante rico em opções de materiais comercialmente disponíveis. Os mais usados são polímeros (nylon, poliestireno) e metais (aço, titânio). No caso de metais e pós-cerâmicos, estes necessitam de uma pós-sinterização para ganhar rigidez. O processo físico pode ser “fundição total”, “fundição parcial” ou “sinterização de fase líquida”. Um processo similar ao SLS foi desenvolvido em 1979, mas não comercializado. O SLS propriamente foi criado e patenteado na metade dos anos 80. A aparelhagem e matérias-primas para o SLS são caras.

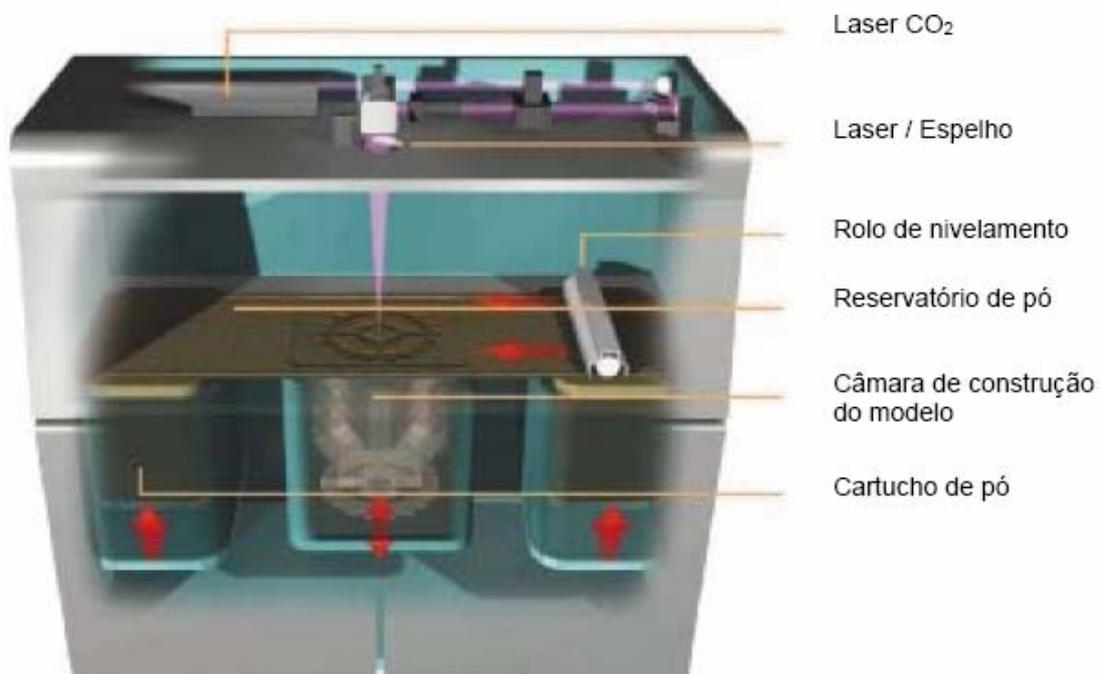


Figura 2. 9 – Máquina SLS em corte (LIMA, 2003).



Figura 2. 10 – Exterior de uma Máquina SLS (MSOE, 2006).

2.1.5.3 – Modelagem por Deposição de Materiais Fundido (FDM)

Do idioma inglês, *Fused Deposition Modeling*, esta tecnologia foi desenvolvida em 1980, porém foi comercializada apenas nos anos 90, exclusivamente, pela companhia *Stratasys*. Neste processo, aditivo, os materiais que são filamentos termoplásticos ou fios de metal, desenrolados de uma bobina, são fundidos por aquecimento e guiados horizontalmente e verticalmente por uma espécie de braço robótico com um bico extrusor

(extrusora), que pode ligar ou desligar o fluxo, controlado numericamente por um computador com pacote de software CAD, como esquematizado nas Figuras 2.11 e 2.12. Materiais como polímeros ABS podem ser também utilizados por serem leves e fortes, porém quebradiços, o que, por outro lado, pode não ser viável ou eficiente dependendo da aplicação, já que o material pode sofrer desgastes e estragos, alterando sua forma inicial.

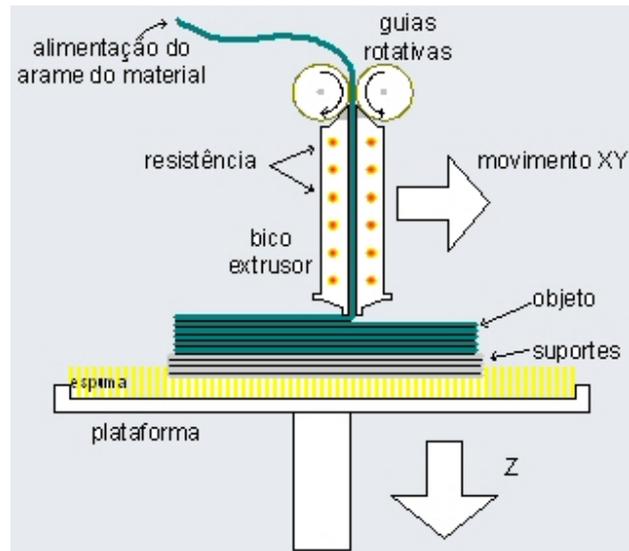


Figura 2. 11 – Esquema do Processo FDM.

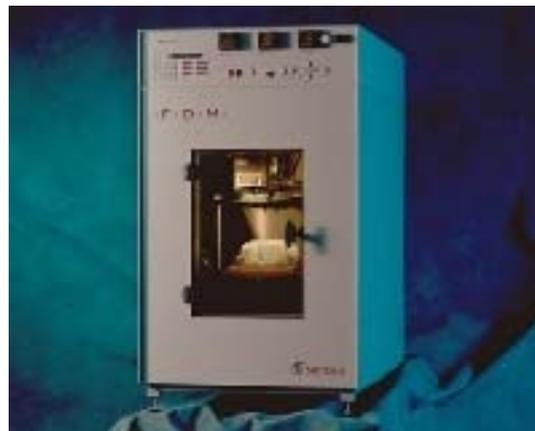


Figura 2. 12 – Exterior de uma Máquina FDM (ARTIS, 2006).

2.1.5.4 – Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM)

Do idioma inglês, *Laminated Object Manufacturing*, este processo constrói modelos tridimensionais por acúmulo de finas camadas de material (usualmente papel revestido em um lado por polietileno que atua como adesivo sensível ao calor), cujo contorno da primeira camada sobre o papel é cortado de acordo com o formato desejado, usando-se feixe *laser* de CO₂ que opera conjuntamente com uma *plotter xy*. Usando um rolo aquecido, a camada é unida à anterior e o processo continua até que a peça seja finalizada, como pode ser visto na Figura 2.13. Este processo compreende os dois métodos de RP, aditivo (adição das camadas de material) e subtrativo (corte, camada a camada, do material em excesso).

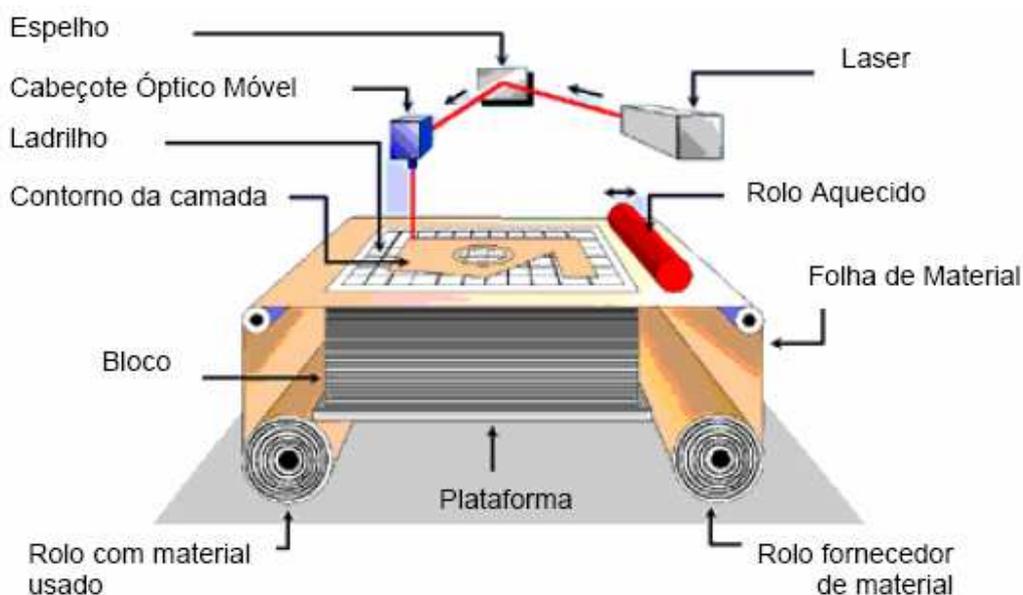


Figura 2. 13 – Esquema do Processo LOM (LIMA, 2003).

2.1.5.5 – Cura Sólida na Base (SGC)

Do idioma inglês, *Solid Ground Curing*. Segundo GORNI (2006), este processo é bastante similar a estereolitografia por UV, pois ambos usam radiação ultravioleta para endurecer, de forma seletiva, polímeros fotossensíveis. Contudo, este processo cura uma camada inteira de uma vez, como mostrado na Figura 2.14. A resina fotossensível é borrifada sobre a plataforma de construção. Em seguida, a máquina gera uma foto-máscara correspondente à camada a ser gerada. Esta foto-máscara é impressa sobre uma placa de

vidro. A seguir a máscara é exposta à radiação ultravioleta, a qual passa apenas através das porções transparentes da máscara, endurecendo seletivamente as porções desejadas de polímero correspondentes à camada atual. Após a cura da camada, a máquina succiona por vácuo o excesso da resina líquida, e borrifa cera em seu lugar para dar suporte ao modelo durante sua construção. O processo SGC produz modelos precisos e com bom acabamento superficial. O processo não precisa de suportes para se construir o protótipo. Em contrapartida, a máquina e os materiais têm custos elevados.

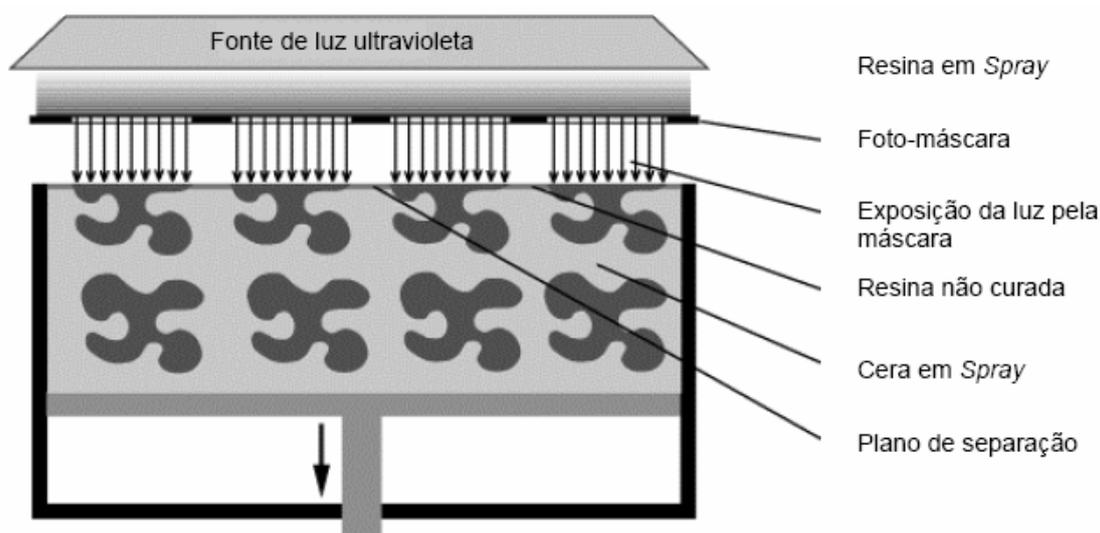


Figura 2. 14 – Esquema do Processo SGC (LIMA, 2003).

2.1.5.6 – Impressão Tridimensional (3DP)

Do idioma inglês, *3D Printing*. Trabalha como uma impressora comum, no entanto, com uma dimensão a mais, a profundidade. À medida que cada camada é formada, um rolo planificador distribui o gesso (um dos principais materiais deste processo) e o planifica uniformemente sobre uma base, como pode ser visualizado nas Figuras 2.15 e 2.16. As principais vantagens deste processo são a redução de custo no desenvolvimento de ferramental – evitando retrabalho para correção dos moldes – e a rapidez de lançamento de novos produtos acelerando o ciclo do *design*. Os materiais utilizados são gesso, amido perdido (análogo ao processo de fundição por cera perdida), amido de batata com elastômero (características de borracha quanto à flexibilidade), e materiais específicos com características de plástico com relação a encaixes e cliques e outros usados para impressão de moldes para vazar metal não ferroso. A impressão em gesso se destaca por este material

ser maleável, versátil, barato e rápido, além de permitir lixar, pintar, cromar e metalizar, possibilitando um trabalho de arte final com boa qualidade.

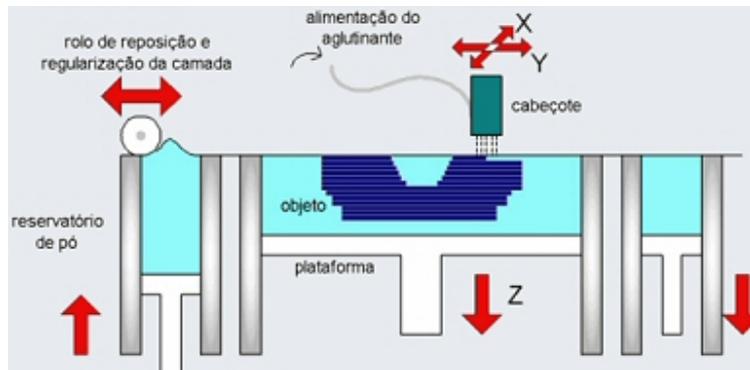


Figura 2. 15 – Esquema do Processo 3DP.



Figura 2. 16 – Exterior de uma Máquina 3DP (SEACAM, 2005).

2.1.5.7 – Conformação Próxima ao Formato Final Via *Laser* (LENS)

Laser Engineering Net Shaping, de acordo com GORNI (2006), é um processo que produz protótipos de metal plenamente densos, com boas propriedades metalúrgicas e sob velocidades razoáveis de construção. Um gerador de raio *laser* de alta potência é usado para fundir pó metálico fornecido coaxialmente ao foco do raio *laser*, através de um cabeçote de deposição. O raio *laser* passa através do centro do cabeçote e é focado para um pequeno ponto através de uma lente ou conjunto de lentes. Uma mesa com grau de liberdade X-Y é movida por varredura de forma a gerar cada camada do objeto. O raio *laser* pode ser conduzido até a área de trabalho através de espelhos galvanométricos, ou

mesmo, fibra ótica. Vários metais como aço inoxidável, cobre, alumínio e titânio podem ser submetidos ao processo. Um ponto favorável do LENS é o fato de ele produzir protótipos de metais 100% densos sem um pós-tratamento de sinterização. Um ponto desfavorável é a baixa qualidade do acabamento superficial se comparado a outros processos. A Figura 2.17 mostra um esquema representativo do processo LENS.

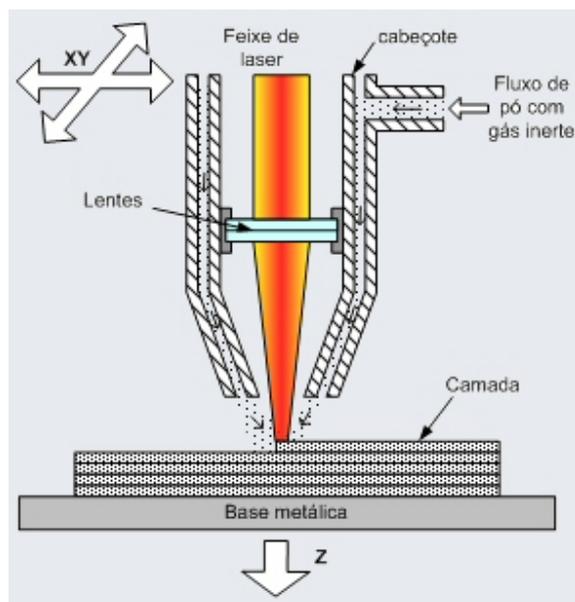


Figura 2. 17 – Esquema do Processo LENS.

2.1.5.8 – Termolitografia por *Laser* Infravermelho (IRTL)

Em inglês, *Infrared Laser Thermolithography*, embora seja muito importante ressaltar que se trata de um desenvolvimento de vanguarda brasileiro. O processo, tema deste trabalho, foi desenvolvido por SCARPARO *et al.* (1992) e BARROS (1993), como já mencionado anteriormente.

A Figura 2.18 mostra o processo IRTL que consiste na utilização da Estereolitografia, porém com a aplicação de *laser* de CO₂ na região espectral do Infravermelho, cujo comprimento de onda λ é de 10,6 μm . Os materiais aplicados sofrem reação por estímulo da variação de temperatura, ou seja, são termossensíveis, diferentemente do SL (fotossensíveis).

A estereolitografia proporciona uma redução drástica de 50% a 80% da duração do ciclo de desenvolvimento de um produto (ROBTEC, 2006). E ainda mais o IRTL devido à eliminação do tratamento pós-cura.

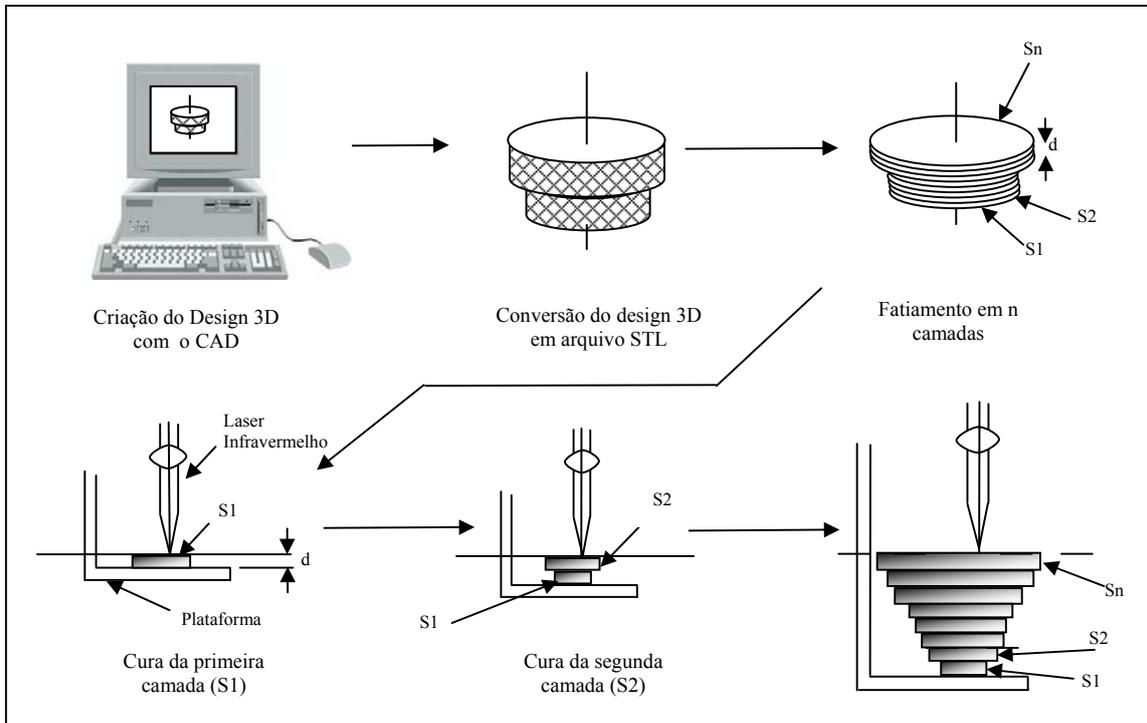


Figura 2. 18 – Esquema do Processo IRTL.

2.1.6 – Prototipagem Rápida Assistida por Computador

Os sistemas CAE (Engenharia Assistida por Computador) e CAM (Manufatura Assistida por Computador) são ferramentas complementares ao CAD. O CAE propicia simulações numéricas voltadas a análises físicas do modelo em termos de sua engenharia, isto é, contempla simulações voltadas para os aspectos de ordens mecânica e térmica, por exemplo. O CAM proporciona análises voltadas à fase de manufatura que abrange o controle do sistema, incluindo tomadas de decisão durante a execução. Em síntese, permite gerar as trajetórias de maquinagem.

As tecnologias CAD/CAM têm a finalidade de modelar e produzir peças enquanto que a Prototipagem Virtual (CAE) tem sido utilizada com o objetivo de simular o comportamento físico destas peças (BRANCO, 1990; BEAMAN *et al.*, 1997). Nesta fase

do projeto, não se pretende simular o comportamento físico do produto final, mas sim a reação do material polimérico (resina e reagentes) durante o processo de cura a *laser*.

Nos últimos anos, ferramentas computacionais CAE têm sido desenvolvidas para o apoio de resolução de problemas de várias áreas da engenharia através da aplicação de métodos numéricos. Empresas e grupos de pesquisa têm se utilizado destas ferramentas obtendo benefícios em termos de tempo, custo e qualidade (AHRENS et al, 2002).

Segundo FERREIRA *et al.* (2001), em um sistema em que exista a associatividade de dados (base única de dados) a informação do projeto poderá ser compartilhada entre as diversas aplicações tais como o projeto, desenho (projeções ortogonais), CAE e CAM sem que cada aplicação tenha de interpretar ou transferir dados, como apresenta o diagrama da Figura 2.19.

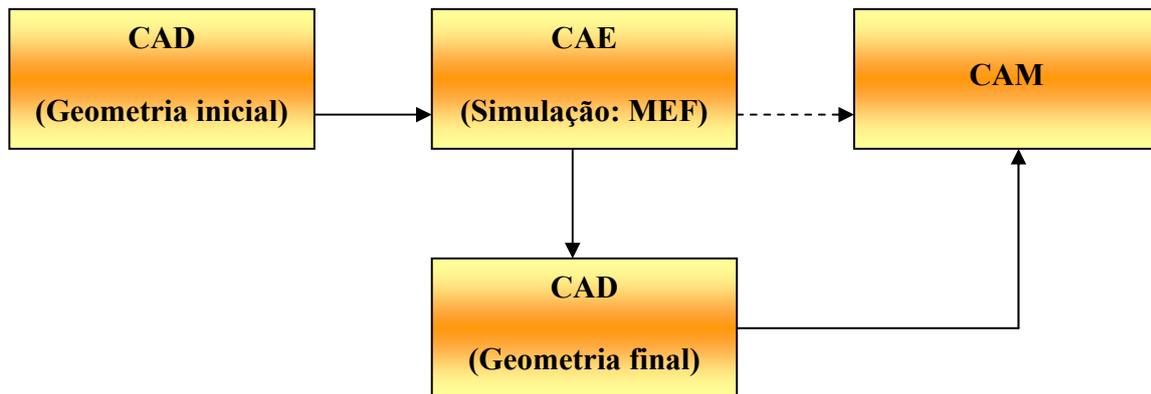


Figura 2. 19 - Ciclo do desenvolvimento de produtos com a Prototipagem Rápida assistida por computador.

Um planejamento computacional através de uma base de dados ou, como proposto por BERNARD *et al.* (2003), memorização, pertinentes a vários processos completos e testados com as combinações de vários parâmetros, tem tornado possível atender melhor e mais rapidamente o mercado, além de conseguir um custo mais reduzido. Com esta base, tem-se a noção exata de tempo e custo para o processo solicitado e, o melhor, sem surpreender o fabricante. Afinal, desenvolver um processo específico, isoladamente, às pressas, tornaria o valor final do produto muito elevado e inviável.

O fator de maior impacto na Prototipagem Rápida é a economia obtida durante o processo de desenvolvimento do produto. É possível se economizar custos extras de até 70% do processo total e, em termos de tempo, uma economia de até 90%, segundo WATERMAN e DICKENS (1994).

2.1.7 – Benefícios da Prototipagem Rápida

A Prototipagem Rápida, uma tecnologia cada vez mais crescente ao redor do mundo, seja na esfera científica, seja na esfera industrial, apresenta uma gama de vantagens e benefícios:

- ✓ Visualização, integração e otimização dos conceitos do projeto;
- ✓ Desenvolvimento rápido de produtos;
- ✓ Precisão dimensional;
- ✓ Liberdade de forma;
- ✓ Diminuição de incertezas e riscos;
- ✓ Agregação de valor;
- ✓ Redução de custos;
- ✓ Avaliação e análises prévias ajudando a evitar despesas extras com remodelagem;
- ✓ Protótipos físicos servindo como modelos para manufaturas;
- ✓ Boa qualidade do produto final (alguns processos e materiais são mais adequados para uma ou outra aplicação);
- ✓ Visualização do produto final antes mesmo de sua confecção;

- ✓ Baixo desperdício de materiais;
- ✓ Protótipos que auxiliam o próprio cliente a decidir o produto de que necessita.

2.1.8 – Setores de Aplicação

São deveras variados os setores de aplicação da Prototipagem Rápida que vão desde a Odontologia à Aeronáutica, da Arquitetura à Microeletrônica. A Figura 2.20 apresenta a interdisciplinaridade entre diferentes áreas da ciência.

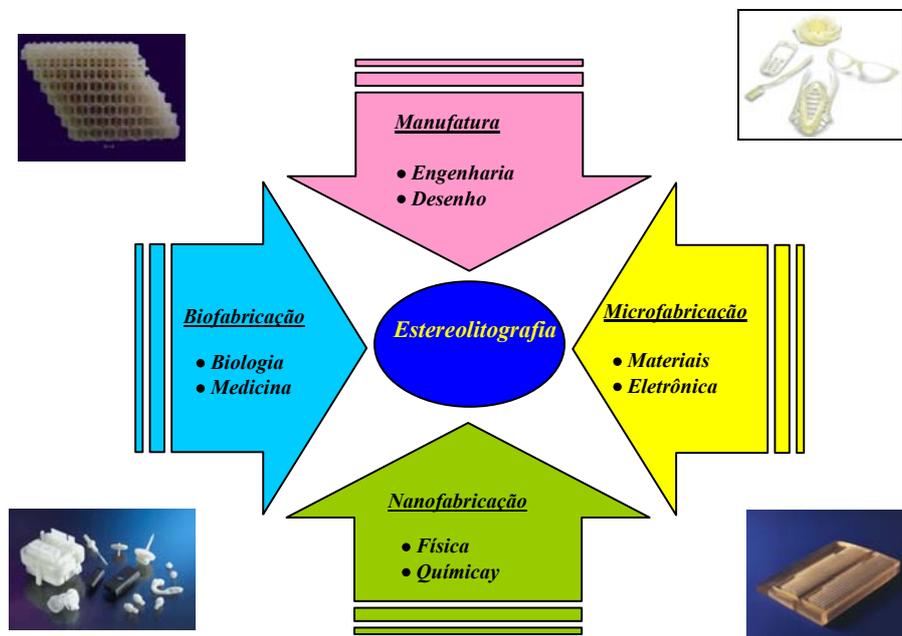


Figura 2. 20 – Integração da Prototipagem Rápida entre as diferentes áreas da ciência.

Cada área pode implementar os mesmos princípios de operação e os mesmos princípios tecnológicos – da Prototipagem Rápida – a fim de permitir o desenvolvimento e criação de outros tipos de tecnologias

Na microfabricação, por exemplo, uma gama de objetos distintos pode ser construída por miniaturização (escala milimétrica), incluindo circuitos integrados, micromaquinagem e, cientificamente, habilidades para desenhar e controlar experimentos

em escala micrométrica, o que tem despertado a atenção da engenharia de materiais para novas descobertas e evoluções.

A nanofabricação engloba todos os processos de manufatura em nanoescala, ou seja, na escala de 10^{-9} a 10^{-6} m, como estruturas uni, bi ou tridimensionais, aparelhagem funcional e sistemas adaptáveis para aplicação, além, da interação com objetos de escalas maiores.

Na Física, o ramo da microeletrônica é um do setor de aplicação da Prototipagem Rápida. Centenas de milhares ou, até mesmo, milhões de transistores podem ser fabricados em escalas micro ou nanométricas.

Na Química, o aperfeiçoamento de sistemas complexos tem contribuído com novos catalisadores, membranas, sensores e tecnologias de recobrimento apoiados na habilidade de manipulação de estruturas em níveis moleculares e atômicos (CHRYSSOLOURIS *et al.*, 2003).

A Biofabricação compreende as Biologias molecular e celular, Engenharia de Tecidos, Ciência dos Materiais e a Engenharia de Biomateriais e Objetos Biomédicos (YAN *et al.*, 2003). A manufatura utiliza a Estereolitografia e novas tecnologias associadas com as Engenharias Simultânea e Reversa para produzir modelos, partes e modelos para produtos que podem beneficiar diferentes níveis de organizações ao redor do mundo (ALVES *et al.*, 2002).

As Figuras 2.21 a 2.34 apresentam soluções em diversas áreas com uso da tecnologia da Prototipagem Rápida.



Figura 2. 21 – Aeronáutica: Monitoramento aéreo (NOVO, 2005).



Figura 2. 22 – Automotiva: Motores.



Figura 2. 23 – Medicina: Próteses Ósseas, membros artificiais, ferramentas e instrumentos (ARTIS, 2006).

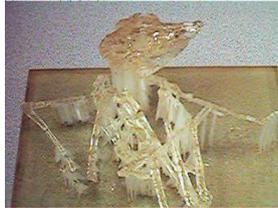


Figura 2. 24 – Paleontologia: reconstituição de ossadas.



Figura 2. 25 – Mecânica: Bloco de Motor.



Figura 2. 26 – Odontologia: Próteses para reconstituição de mandíbula (ARTIS, 2006).

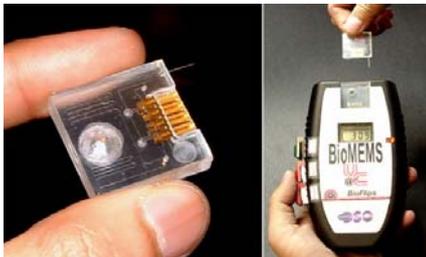


Figura 2. 27 – Eletrônica e Microeletrônica: MEMS (USACEHR, 2006).



Figura 2. 28 – Telecomunicações: carcaças de aparelhos celulares.



Figura 2. 29 – Informática: resfriadores (coolers) para processador (ARTIS, 2006).

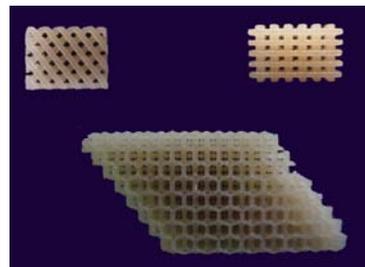


Figura 2. 30 – Biomedicina: materiais bio-adaptativos – *scaffolds* (BÁRTOLO, 2004)

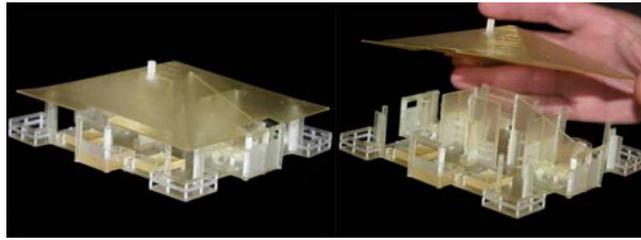


Figura 2. 31 – Arquitetura: maquetes (ARTIS, 2006).



Figura 2. 32 – Brinquedos (ARTIS, 2006).



Figura 2. 33 – Ferramentas em geral (ARTIS, 2006).



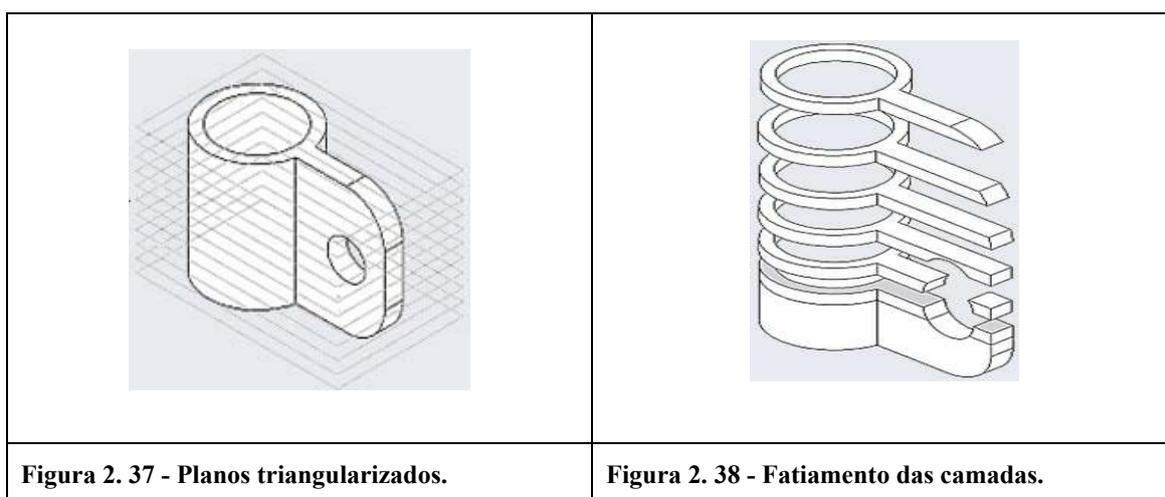
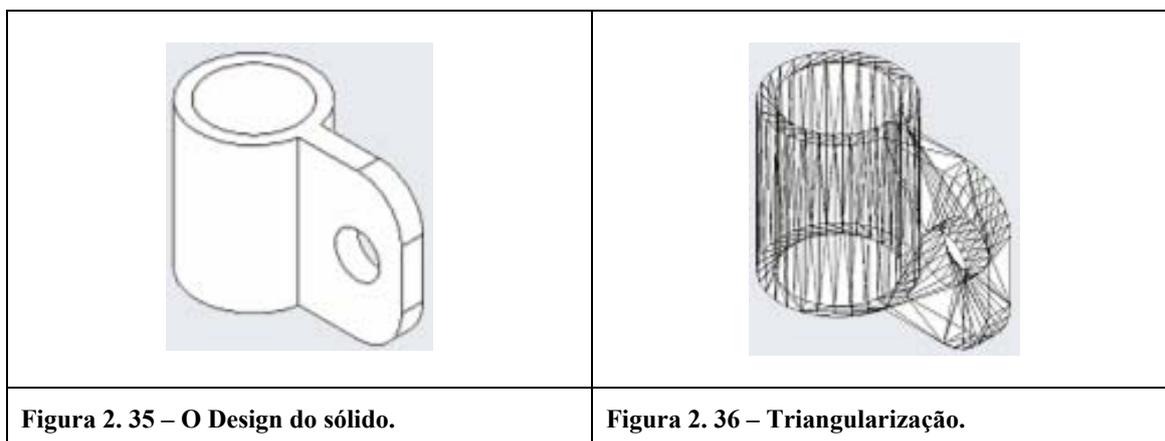
Figura 2. 34 – Indústria de moldes: calçados (SEACAM, 2005).

2.2 – A Estereolitografia

A Estereolitografia convencional é um processo de manufatura que utiliza *laser* UV para criar sucessivas seções cruzadas de um objeto 3D dentro de um líquido fotopolimérico. O conceito básico da Estereolitografia é a manufatura de camadas nas quais estruturas tridimensionais são compostas pelo método Aditivo de material, camada a camada, em 2D

(superfícies fatiadas), obtidas da triangularização e fatiamento de um objeto volumétrico criado em sistema CAD.

As Figuras 2.35 a 2.38 mostram a passagem de um objeto sólido para um objeto fatiado com camadas triangularizadas, conforme a Estereolitografia convencional.



2.2.1 – Fases do Processo de Estereolitografia

O processo da Estereolitografia divide-se em três fases principais:

- Pré-processamento
- Processamento
- Pós-processamento

2.2.1.1 – Pré-Processamento

A fase de Pré-processamento corresponde à fase de modelamento do objeto a ser reproduzido, ou seja, prevê a construção e fatiamento do modelo além de análises das características do material e do *laser*. Esta fase é muito importante e precisa ser bem elaborada e executada para garantir bons resultados, economia de tempo e dinheiro e desperdício de materiais. O suporte do tripé computacional CAD/CAE/CAM torna possível e viável a realização de um bom projeto de Prototipagem Rápida.

O CAD fornece um arquivo em formato conhecido como STL (*Structure Triangularization Language*), cuja característica é ser formado por uma malha de triângulos.

Representações digitais oferecem benefícios além daqueles do modelo físico. É notório que os modelos físicos são, em sua maioria, freqüentemente usados como ferramentas para comunicarem aparência visual de um conceito de *design*. Uma distinção pode ser conjecturada entre tais modelos de visualização e os modelos de construção digital (DAY, 1997). Um modelo de visualização é uma representação do que pode se parecer, enquanto que um modelo de construção é a descrição da construção, seus componentes e sua montagem.

Dados associados com um modelo digital podem ser usados para direcionar a manufatura do modelo, permitindo aos modelos a serem produzidos, por exemplo, que a cor de um componente represente seu estado estrutural.

O CAE é responsável por análises de estrutura, revisão e otimização dos futuros protótipos. O CAE é capacitado a estudar, por exemplo, resistência, durabilidade, rigidez, estabilidade do material e simulá-los sob condições a que a amostra será exposta. (REZENDE *et al.*, 2005).

Um produto simulado em Prototipagem Virtual pode ser facilmente modificado, sendo possível testar vários cenários diferentes de desenho e condições de contorno do

processo visando otimização do processo e das propriedades do produto (SCARPARO *et al.*, 1994).

A Figura 2.39 representa o modelo virtual gerado pelo CAD (à esquerda) e o seu respectivo formato triangularizado (à direita).

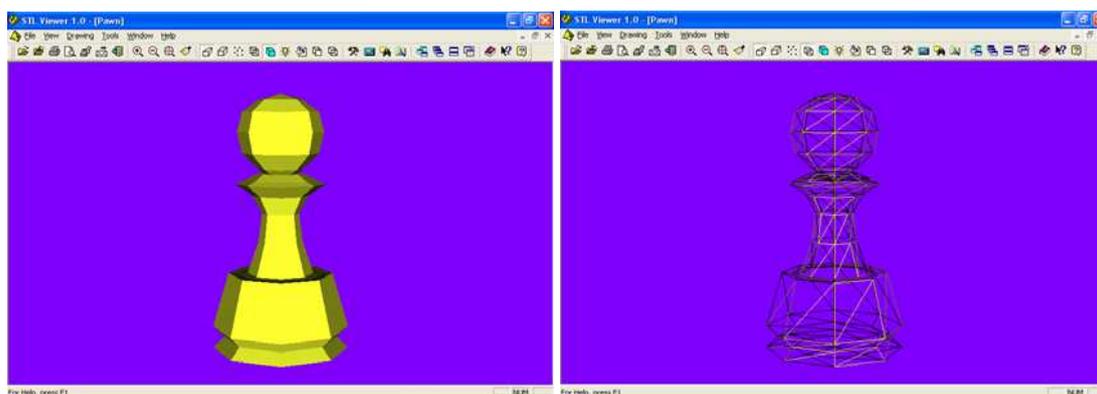


Figura 2. 39 – Representação tridimensional de um modelo sólido CAD e de sua triangularização no formato STL.

Os sistemas Estereolitográficos dispõem de algoritmos que efetuam o “fatiamento” matemático em finas camadas transversais do modelo STL, gerando arquivos SLI (do inglês Slice), como indicado na Figura 2.40. A informação obtida neste arquivo vai posteriormente possibilitar a construção do modelo final. O tempo de criação dos arquivos SLI corresponde a cerca de 60% do tempo de preparação do modelo para construção num sistema de Estereolitografia.

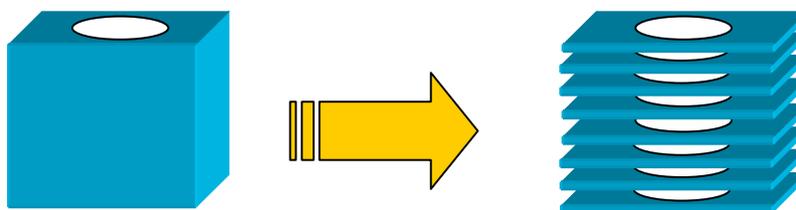


Figura 2. 40 – Corte do Modelo STL em finas camadas.

A velocidade com que o modelo é seccionado depende, para além da sua forma geométrica, do número de triângulos utilizados na sua representação (arquivo formato STL) e no número de camadas considerado. Quanto menor for a espessura de cada camada, maior será a precisão obtida, como mostra a Figura 2.41.

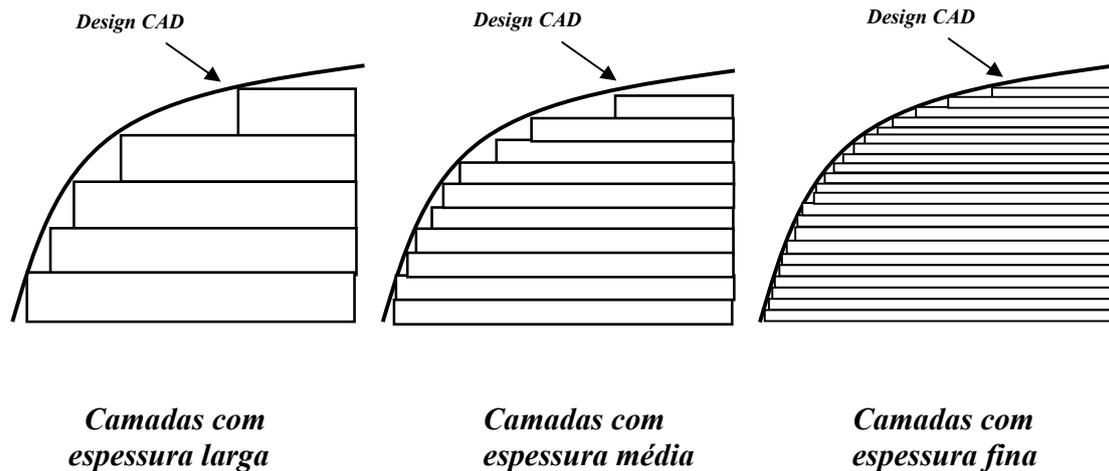


Figura 2. 41 – Representação da precisão em função do número de camadas.

2.2.1.2 – Processamento

Nesta fase, o protótipo é construído fisicamente através da incidência do feixe *laser* sobre a resina realizando a cura do material por irradiação. Esta cura ou solidificação é um processo exotérmico na resina.

O tempo despendido nesta operação é dependente de alguns fatores como:

- O número de camadas a serem curadas;
- A definição de cada camada e o nivelamento da resina;
- A velocidade de processamento do *laser* de acordo com a potência aplicada.

2.2.1.3 – Pós-Processamento

Esta fase abrange as seguintes operações:

- Remoção dos protótipos do tanque;
- Eliminação de suportes de auxílio e limpeza do protótipo;
- Arte-final

2.2.2 – Tratamento de dados no formato STL

O formato mais utilizado no processo de Estereolitografia é o STL (*Structure Triangularization Language*). Outros tipos de arquivos também podem ser adotados e trabalhados como o IGES, DWG/DXF, STEP, CATIA, UG, PRO/E, SAT, PARA, IDEAS, HEAL, CIF. A Figura 2.42 apresenta vantagens e desvantagens de alguns destes formatos de arquivos.

	INTERFACES PADRÃO					INTERFACES DIRETAS		
	ACIS	STEP	DXF	IGES	VDA	CATIA	DWG	PRO/E
Consistência em 2D	Só trabalha com modelos em 3D.	Maioria dos conversores só lê a parte 3D dos modelos.	Boa, alguns problemas de tangência, pois trabalha em simples precisão.	Excelente.	Só trabalha com <i>splines</i> e curvas.	Excelente	Excelente.	Excelente
Consistência em 3D	Boa, alguns problemas com superfícies de ordem elevada.	Excelente como padrão. Suporta sólido e superfícies e ainda dados tecnológicos	Não suporta superfícies, apenas malhas.	Boa, alguns problemas nas aparas de superfícies. Não suporta modelos sólidos	Boa consistência nas superfícies e não suporta sólidos	Excelente	Maioria dos sistemas não lê superfícies do DWG.	Excelente
Capacidade de leitura	Sistema baseados em ACIS	Poucos	Todos	Todos	Poucos	Poucos	Muitos	Raro

Figura 2. 42 – Vantagens e desvantagens dos diferentes formatos de arquivos na Estereolitografia.

O desenho sólido do CAD em arquivo STL é composto por uma representação triangular em todo o volume do sólido. O sólido é, então, fatiado em muitos e suficientes camadas 2D. A Figura 2.43 descreve a camada como uma superfície constituída por uma malha de triângulos, os quais possuem três pontos (vértices) e um vetor perpendicular e de comprimento unitário. Como a normal e cada vértice são definidos por três coordenadas, então para cada face de um triângulo são relacionados doze valores.

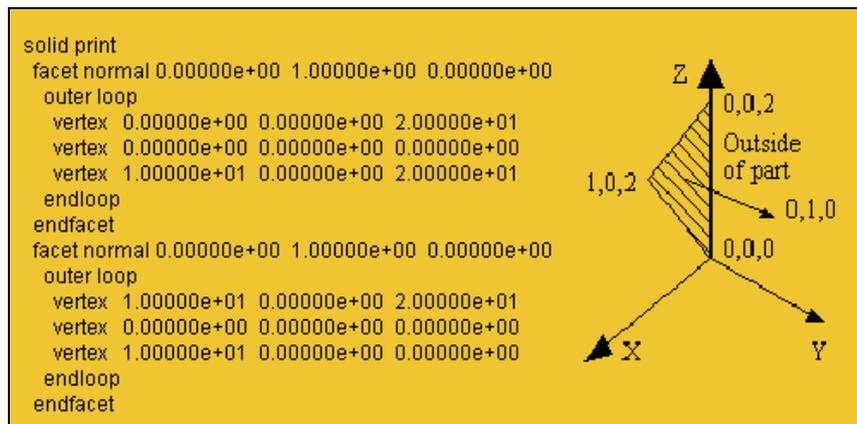


Figura 2. 43 – Representação interna de um arquivo STL (CHUA e LEONG, 1997).

Cada face corresponde ao limite entre a parte interior e a parte exterior do sólido. A orientação das faces, ou seja, o que está dentro e o que está fora são especificados redundantemente de duas maneiras as quais devem ser bastante consistentes. A princípio, o sentido da normal aponta para fora. Já os vértices, estes são adotados como tendo sentido-horário quando o objeto for visualizado de fora – “Regra-da-mão-direita” (WAH, 1999).

Existem duas formas distintas de armazenamento para um arquivo STL: ASCII e Binário. Os arquivos ASCII são inteligíveis por humanos e podem ser modificados por um editor de texto se necessário, no entanto, exigem uma maior quantidade de memória para seu armazenamento e processamento (normalmente, mais de 10Mb). Esta forma é bastante utilizada quando se faz necessário “abrir” o arquivo para se corrigir ou alterar seu conteúdo interno, ou também, se for preciso a transferências destes arquivos em canais superiores a 7-bits.

Apesar das camadas triangularizadas oferecerem maior flexibilidade e eficiência em várias aplicações e visualizações, elas podem apresentar erros durante a execução de fatiamento do sólido. Buracos e fendas e má formação de triângulos podem ocorrer. Muitos dos pacotes para triangularização não geram com 100% de precisão malhas de triângulos topologicamente corretas. Buracos e múltiplas faces resultam em arestas incorretas as quais não podem ser manufaturadas como camadas, até mesmo, muitas vezes, pela sua alta

complexidade. Estes fatos podem gerar sérios problemas durante a produção do protótipo e à sua qualidade final (SZILVÁSI-NAGY e MÁTYÁSI, 2003).

Modelos poligonais com milhões de triângulos normalmente requisitam mais que a capacidade de armazenamento e um longo período de processamento. Uma solução seria reduzir-se a complexidade das superfícies das camadas.

Muitos algoritmos têm sido desenvolvidos para auxiliar a criação de formas mais simples com o menor número de triângulos.

Devido à dificuldade que alguns sistemas CAD apresentam em gerar arquivos STL corretos, estes devem ser verificados e corrigidos de modo automático. Tal dificuldade passa pela necessária utilização de rotinas de cálculos de difícil elaboração devido à perda de informação ocorrida na conversão de arquivos IGES ou STEP em arquivos STL.

No arquivo STL correto, existe uma continuidade entre triângulos sendo-lhes apenas permitida a intercessão nos lados e vértices comuns, como pode ser visto na Figura 2.44.

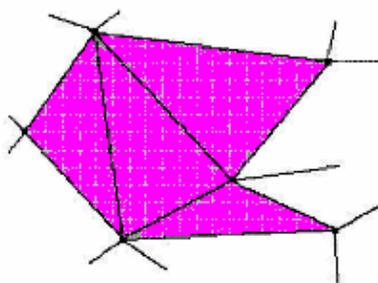


Figura 2. 44 – Triangulação correta.

Alguns dos tipos de defeitos (deformações) mais comuns encontrados nos arquivos STL são mostrados na Figura 2.45.

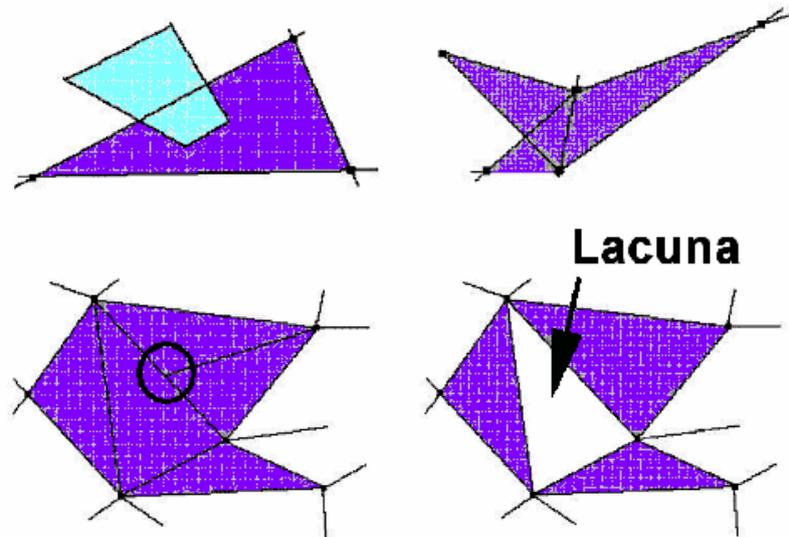


Figura 2. 45 – Arquivos STL gerados com erros.

A frequência com que os arquivos STL são incorretamente gerados pode ser elevada sendo igualmente numerosos os erros possíveis de ocorrer.

Um dos grandes problemas associados aos arquivos STL reside na sua dimensão. A definição de cada triângulo corresponde a cerca de 50 Bytes pelo que a dimensão de um arquivo STL será igual ao número de triângulo vezes 50, o que no caso de 10000 triângulos corresponderá a cerca de 500000 Bytes. Deste modo em regra os arquivos STL são de 1,5 a 3 vezes maiores que os arquivos CAD correspondentes.

Nota-se que quanto maior for o número de triângulos utilizado na definição do modelo, mais precisa será a sua definição e maior será o tempo de construção, exigindo, portanto, maior capacidade de processamento do sistema de supervisão, gerenciamento e controle.

Os pesquisadores e construtores de sistemas de Prototipagem Rápida têm investido na solução e no desenvolvimento de formatos alternativos.

- Formato **CFL** (*Cubital Facet List*) desenvolvido pela empresa Cubital.
- Formato **SLC** (*Stereolithographic Contour*) desenvolvido pela 3D Systems.

2.2.3 – A Microestereolitografia

A Microestereolitografia é uma tecnologia que limita os domínios da Microengenharia e a Prototipagem Rápida. Originada da técnica da Estereolitografia, é baseada também na manufatura por empilhamento de camadas por indução de luz. No entanto, a resolução da Microestereolitografia está muito além de qualquer uma das tecnologias da Prototipagem Rápida devido à sua alta resolução.

A Prototipagem Rápida, com todo o seu grau de liberdade na construção de geometrias livres, possibilita a confecção de mini e micro objetos (a nanofabricação já é também uma realidade) com altas resoluções, com detalhes intrínsecos, pequenas aberturas e superfícies suaves. A Prototipagem Rápida permite a construção de protótipos com dimensões de alguns poucos centímetros a 1 metro com resoluções na faixa de 100 a 200 micrometros. A microfabricação é uma técnica com magnitude de resoluções de 5micrometros. Segundo BERTSCH *et al.* (2000), a miniaturização é a maior tendência em manufatura e comercialização da produção industrial. VASCO *et al.* (2005) afirma que, nas duas últimas décadas, micro-aplicações têm aumentado devido à vasta evolução das técnicas de micro-fabricação.

A microfabricação pode ser dividida em duas categorias:

- Processo Vetor-a-vetor

É o processo de macrofabricação convencional em que o feixe *laser* varre toda a superfície do líquido (amostra) realizando a cura. Para uma melhor qualidade de cura, o feixe *laser* não é incidido e refletido através de espelhos galvanométricos. O feixe é focado precisamente sobre o líquido. O tempo gasto neste processo é proporcional ao número de vetores em cada superfície (camada). Portanto, se há um número grande de vetores, a execução é tanto mais lenta (NAKAMOTO *et al.*, 1996).

- Processo Integral

Este processo consiste da polimerização da superfície como um todo (inteira). Evitam-se, desta forma, problemas de cura por efeitos térmicos e é um

processo rápido em função da radiação ser completa enquanto que no processo Vetor-a-Vetor o feixe *laser* precisa se mover por toda a área a ser atingida, demorando mais a completar a fabricação de uma mesma peça (BELUZE *et al.*, 1999).

2.3 – Técnicas Complementares da Prototipagem Rápida

2.3.1 – A Engenharia Reversa (*Reverse Engineering*)

A Engenharia Reversa ou Inversa consiste da execução do processo inverso da Prototipagem Rápida podendo, inclusive, servir de *input* para o mesmo. É um importante método para o desenvolvimento de produtos rapidamente através de um modelo (ALVES *et al.*, 2002). O objetivo principal é reproduzir um objeto exatamente como ele é ou, pelo menos, usá-lo como modelo de comparação. O tempo gasto no processo pode ser amplamente reduzido uma vez que várias fases podem ser concentradas em uma apenas. A máquina escaneadora deve obrigatoriamente ser flexível e adaptável aos materiais que serão copiados.

Segundo FERREIRA *et al.* (2001), a Engenharia Inversa permite a geração de modelos de superfícies a partir de nuvens de pontos obtidas por digitalização de formas tridimensionais (*3D scanning*), conseguindo-se obter peças ou ferramentas num menor tempo de desenvolvimento rápido de produtos, recorrendo a metodologias de engenharia inversa, para a reconstrução de modelos geométricos usando CAD, auxiliadas por técnicas de RP, na obtenção de produtos e ferramentas protótipo, para a validação das otimizações CAE.

Para GUANGCHUN *et al.* (2004), Engenharia Inversa é um importante método de desenvolver novos produtos rapidamente através de um modelo (amostra). O intuito é reproduzir um novo objeto exatamente igual ou, pelo menos, usá-lo como modelo comparativo. O tempo despendido no processo pode ser amplamente reduzido uma vez que as fases do processo normal podem ser concentradas em uma única fase. A máquina escaneadora deve ser flexível e adaptável aos materiais que serão copiados.

Atualmente, é possível se obter, em curto espaço de tempo, boa qualidade e ferramentas e partes da Prototipagem Rápida mais acessíveis e mais baratas. Isto se deve, além dos vários tipos de tecnologia disponíveis como a digitalização 3D e o processo reverso, à gama de diferentes materiais existentes e aplicáveis, conforme afirma BERNARD *et al.* (2003).

A Engenharia Reversa é uma tecnologia moderna que vem sendo bastante utilizada nos meios acadêmicos e industriais pela sua praticidade e baixo custo. Diversas áreas são beneficiadas como a medicina, a odontologia, as artes, a educação dentre outras.

A construção de objetos e peças – protótipos – muitas vezes se torna inviável. O protótipo que se deseja produzir pode ser tão minucioso que o seu design torna-se impraticável, pois o objeto pode não representar na íntegra o que realmente deveria representar. Por exemplo, a produção de um osso humano ou de uma mandíbula para ser implantada em um ser humano com este tipo de problema, exige a máxima qualidade e precisão das dimensões que, neste caso, variam de pessoa para pessoa.

Com a Engenharia Reversa é possível se obter as dimensões reais e um resultado muito satisfatório, já que se pode escanear parte da mandíbula que será substituída, trabalhar a imagem em um software apropriado (CAD/CAE/CAM) e, após análises do design e das propriedades físicas e mecânicas da nova mandíbula, produzi-la com a Prototipagem Rápida e aplicá-la ao paciente. Este tipo de processo tem se tornado muito comum na medicina e tem sido bem-sucedido.

Pacotes de sistemas com computadores auxiliando o desenho (CAD) permitem que os engenheiros projetem objetos para computadores auxiliando a manufatura (CAM).

Adequações e aperfeiçoamentos do modelo podem ser feitos com relativa facilidade, porque mesmo uma peça complexa, pode ser imaginada como um conjunto de partes geométricas simples, como planos, esferas, cilindros, cones, etc. Muitos tipos de protótipos físicos são produzidos e então modificados diretamente ou o design inicial

consiste em um objeto físico para cópia. Em alguns casos um processo de Engenharia Reversa é necessário para que se possa criar a representação digital do modelo.

Com um scanner 3D é possível se obter o formato de um objeto em três dimensões com rapidez e ótima resolução. O scanner com *laser* cria uma nuvem de pontos que são, então, processados pelo software de tratamento de imagens.

2.3.1.1 – Seqüência Convencional da Prototipagem Rápida

Consiste no desenvolvimento de produtos com utilização do tripé CAD/CAE/CAM para o modelamento geométrico do objeto para a sua produção final. O sistema CAD gera um arquivo específico padrão, podendo ser STL, IGES, VDA, STEP, etc., o qual é transferido ao CAE para as respectivas simulações numéricas e, posteriormente, ao CAM onde ocorrerá o processamento final. Nas transferências mencionadas, pode haver perda de dados, ocasionando erros de bits intrínsecos em seus arquivos e, por sua vez, gerando efeitos indesejáveis no produto final (ALVES *et al.*, 2002).

2.3.1.2 – Seqüência Não-Convencional da Prototipagem Rápida

É um processo que ocorre na contramão do processo convencional. No caso presente, o que se pretende é a reprodução de algum objeto ou modelo já existente fisicamente, sem que haja um projeto gráfico inicial, ou seja, sem que haja o *design* em CAD.

Nestas circunstâncias, entra em ação a técnica da Engenharia Inversa. O objetivo, então, passa a ser o de capturar as dimensões e formato do modelo material e transmitir estas informações para o computador, processo que recebe o nome de “escaneamento” ou “digitalização tridimensional”. Desta forma, é possível, em seguida, iniciar-se a concepção de novas peças, semelhantes àquela que foi escaneada.

Um fato importante a ser observado é que o objeto digitalizado pode não representar fidedignamente o formato original em razão dos desgastes em seu uso. Neste caso, deve ser feito um trabalho de correção dos pontos que conseqüentemente não puderam ser capturados na nuvem. Este trabalho é realizado com o software CAD.

A Figura 2.46 mostra como as Seqüências Convencional e Não-Convencional estão inseridas no contexto da Prototipagem Rápida.

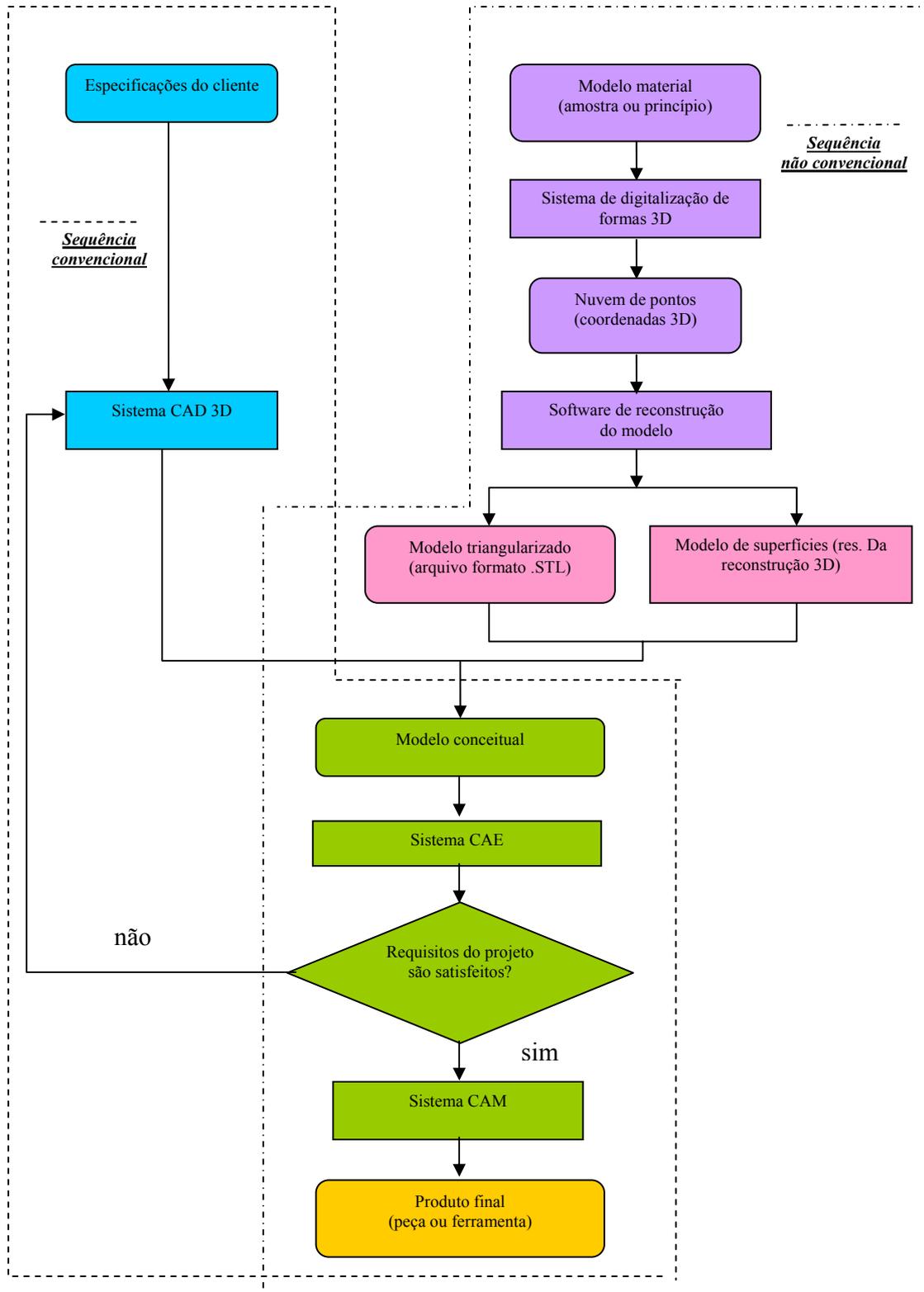


Figura 2. 46 – Diagrama das Seqüências Convencional e Não-Convencional.

2.3.2 – O Ferramental Rápido (*Rapid Tooling*)

Em muito pouco tempo, as tecnologias de Prototipagem Rápida (RP) e o *Rapid Tooling* (RT) têm sido altamente implementadas nas indústrias principalmente na área de desenvolvimento de novos produtos, afirma GUANGCHUN *et al.* (2004).

O *Rapid Tooling* é um processo extensivo à Prototipagem Rápida. Trata-se de um processo de produção com auxílio de moldes pré-fabricados que são utilizados como fôrmas para injeção da matéria-prima. Inicialmente um protótipo-mestre (objeto que será replicado) é mergulhado em banho de um material específico como silicone, por exemplo.

Talvez o ponto mais importante no CAD a respeito do RT e da RP seja a economia de custos graças ao fato de as análises serem realizadas em um ambiente virtual. O CAD ajuda na criação e edição do *design* sem se preocupar com características físicas da estrutura do modelo. O CAE é responsável por análises de estrutura, revisão e otimização dos futuros protótipos (REZENDE *et al.*, 2005).

O processo de *Rapid Tooling*, com silicone como material, é integrado pelas seguintes etapas:

- Preparação do protótipo-mestre, ou seja, o objeto a ser copiado;
- Locação e fixação do protótipo-mestre em uma armação;
- Despejamento do silicone na armação;
- Cura em certa temperatura;
- Corte do silicone para a extração do protótipo-mestre

O fator mais relevante é a economia de custo e tempo atribuída a este processo de desenvolvimento do produto. Outros fatores importantes que podem afetar a qualidade final

dos moldes produzidos pelo *Rapid Tooling* são o tempo de cura e temperatura e o processo de corte do molde.

Essas duas tecnologias compõem dois diferentes caminhos de execução. Uma é a Engenharia reversa que faz uso de um objeto real (molde) que é uma referência física. O *Rapid Tooling* pode reduzir o número de iterações e aumentar a eficiência, a definição e a confiabilidade do design do produto. A outra, a Prototipagem Rápida, cuja referência é virtual por meio de CAD, aplicação de *laser*, tecnologias de precisão em transmissão de dados e pela utilização de novos materiais. Uma grande vantagem da Prototipagem Rápida é a possível visualização virtual do projeto com a qual é possível avaliar a aparência, a robustez, a resistência, antes do manufaturamento final, o que permite ajustes e correções sem maiores gastos.

As grandes vantagens do RP e RT são:

- ✓ Redução no número de iterações - conseqüente redução do tempo de produção, de custos e rápido e satisfatório atendimento ao cliente,
- ✓ Redução de custos - evita erros e desperdício de material
- ✓ Melhoria da qualidade

A Figura 2.47 apresenta o diagrama que agrega o *Rapid Tooling* ao processo geral de manufatura por Prototipagem Rápida.

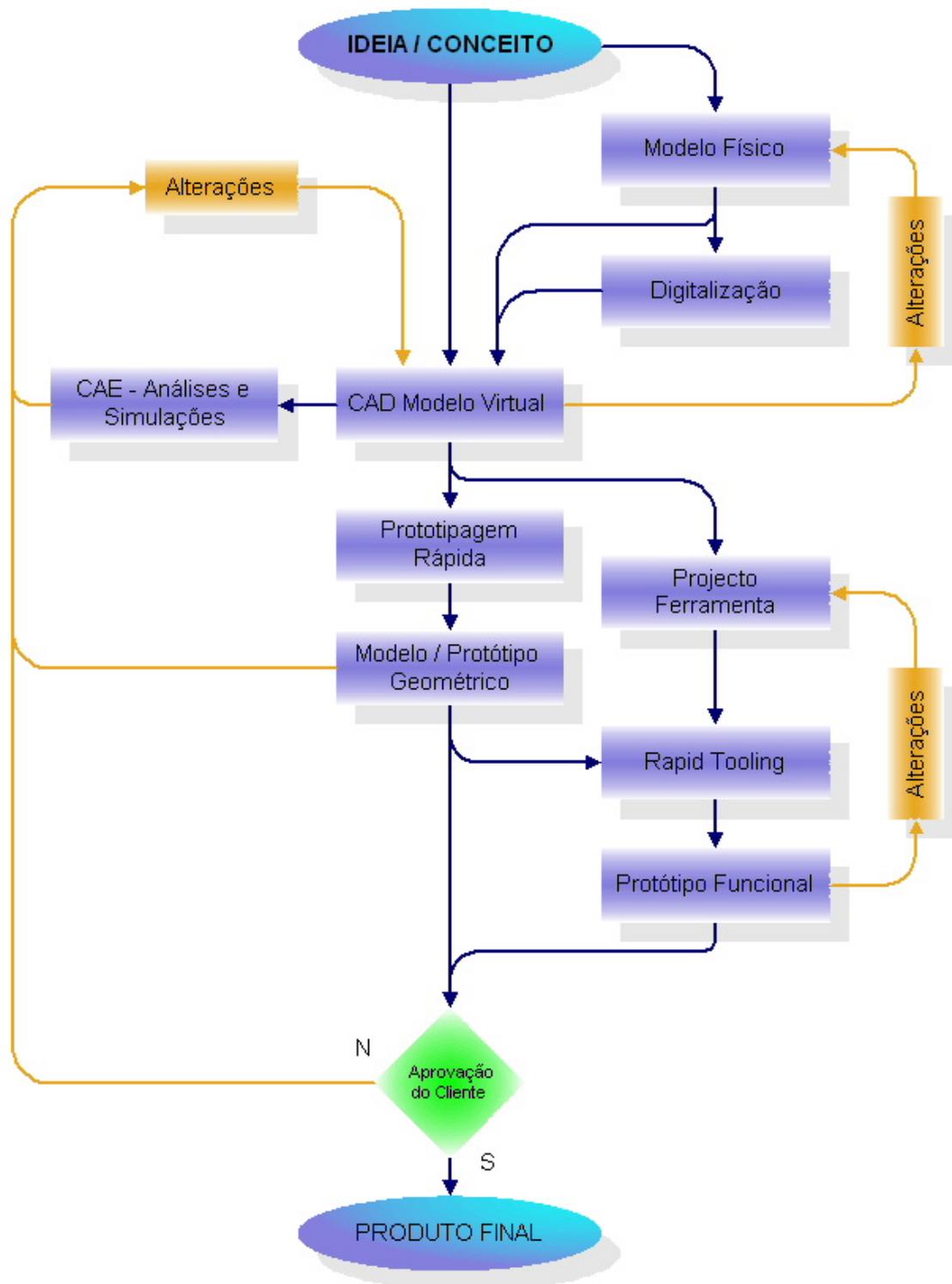


Figura 2. 47 – O *Rapid Tooling* no contexto da Prototipagem Rápida.

2.4 – Conclusões

Neste capítulo foi realizada uma abordagem sobre o estado da arte da Prototipagem Rápida. Esta tecnologia, que é cada vez mais crescente no mundo industrial e acadêmico, causou profundo impacto no modo de planejamento e produção das indústrias. Além da redução do tempo e da economia gerada durante o processo de fabricação, a Prototipagem Rápida garante boa qualidade de seus produtos finais. Os países de primeiro mundo são os maiores utilizadores da tecnologia. Existem diversos processos com diferentes métodos e materiais. Neste trabalho, a Termolitografia (IRTL) é o processo estudado. Foram apresentados também os diversos setores de aplicação da Prototipagem Rápida. Alguns deles são as indústrias Aeronáutica, Automotiva, Eletrônica e de Telecomunicações, a Odontologia e a Medicina, na área da saúde.

A Estereolitografia, técnica pioneira, consiste da construção de objetos tridimensionais camada a camada, através da sua triangularização e fatiamento. A Microestereolitografia compreende aplicações em nível micrométrico.

A Engenharia Reversa é uma técnica bastante útil que serve para “alimentar” a seqüência convencional da Prototipagem Rápida, já que é capaz de capturar formas tridimensionais de objetos cujo *design* é de difícil obtenção em função das características de sua geometria.

CAPÍTULO 3 – O SISTEMA ELI

O Capítulo 3 apresenta com maiores detalhes o Sistema ELI e os respectivos equipamentos que o compõem, a composição da amostra utilizada e os valores de suas propriedades físicas.

3.1 – O Sistema ELI

Como já descrito nos capítulos anteriores, o processo de Estereolitografia por *laser* Infravermelho foi desenvolvido no início dos anos 90 na Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp por SCARPARO *et al.* (1992) e BARROS (1993), que realizaram um estudo acerca do desenvolvimento e construção de peças plásticas tridimensionais através de Litografia térmica com aplicação de *laser* de CO₂. Foi, portanto, o primeiro estudo de Estereolitografia com *laser* de CO₂ na região espectral do infravermelho.

O Processo IRTL, diferentemente do processo de Estereolitografia por UV, trabalha com resina termossensível. Os protótipos apresentam boa resolução espacial, não necessitam de tratamento pós-cura, não apresentam fenômeno de contração, favorecendo a cura localizada e a forma final projetada do protótipo, e possuem boa rigidez mecânica. O *laser* empregado é de CO₂ na região espectral do infravermelho (comprimento de onda $\lambda = 10,6\mu\text{m}$).

Em continuidade ao estudo do Processo IRTL, JARDINI (2001) desenvolveu o Sistema ELI (Estereolitografia por *laser* Infravermelho). A Figura 3.1 mostra os componentes da máquina piloto estereolitográfica desenvolvida e empregada na produção de protótipos físicos tridimensionais.



Figura 3. 1 – Sistema ELI piloto desenvolvido no Instituto de Física da UNICAMP (JARDINI, 2001).

A Figura 3.2 mostra a nova máquina piloto recentemente instalada no Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado (LOPCA) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da UNICAMP.



Figura 3. 2 – Sistema ELI implantado no LOPCA/FEQ em 2005.

O conjunto de equipamentos do Sistema ELI é composto pelos seguintes módulos:

- *Laser* de CO₂ ;
- Microcomputador com Software de controle do sistema;
- Cabeçotes Galvanométricos;
- Tanque depositador de resina ;
- Plataforma elevadora;
- *Chiller*
- Planificador do material.

3.2 – Descrição dos Módulos do Sistema ELI

3.2.1 – *Laser* de CO₂

Os tubos de *laser*, durante sua fabricação, passam por um rígido controle de qualidade e possuem duração média de 15 mil horas, sendo que podem ser recarregados e reutilizados por várias vezes (RANGE *LASER*, 2006). Os tubos são selados, e excitados por descarga DC, na potência de 50W CW (Continuous Wavelength, Comprimento-de-onda contínuo). A Figura 3.3 apresenta o tubo de *laser* de CO₂.



Figura 3. 3 – *Laser* de CO₂ de 50W.

A Tabela 3.1 mostra as características do modelo LR50 do *laser* situado na FEQ/UNICAMP, o LR50.

Tabela 3. 1 – Características do *laser* disponível na FEQ (RANGE *LASER*, 2006).

MODELO <i>LASER</i>	LR50
Comp. onda (nanômetros)	10640
Refrigeração	6 l/min @ 18°C
Tensão de entrada	110 VAC
Estabilidade Pot.	2%
Diâmetro do raio	4 mm
M2 Qualidade do raio	1,1
Divergência	2 mrad 1/2 angle
Controle de Pot.	0-5 VDC
Corrente no tubo	30 mA
Voltagem de disparo	30 kV
Frequência máxima	4000 Hz
Tempo mínimo de pulso	0,1 ms
Dimensões (cm) (CxLxA)	100x18x15

O *laser* é protegido de duas maneiras: a primeira, por um sensor de fluxo de água (na falta de água ou falha da bomba) que desliga imediatamente o laser o segundo, por um dielétrico na saída da água do *laser*, que no caso de sobretemperatura também desliga o *laser*.

O tubo de *laser*, que pode ser observado na Figura 3.4, é construído em vidro de borossilicato e voltado para *lasers* DC selados excitados por descargas de DC, refrigerados a água. Um tubo externo com parede de 2,5 mm protege o seu interior.



Figura 3. 4 – Tubo de *laser* com parede externa de 2,5 mm (RANGE LASER, 2006).

Outros detalhes sobre *laser* de CO₂ e outros tipos de *laser* podem ser consultados no APÊNDICE A.

3.2.2 – Microcomputador com Software de Controle do Sistema

O microcomputador do sistema possui instalado um *software* de propriedade da empresa “Range Laser” que executa todo o controle e sincronização do processo. O *software* controla e processa o funcionamento dos espelhos galvanométricos e lente, o tanque de resina e plataforma, o próprio *laser*, além de oferecer a *interface* com o usuário permitindo a este configurar os dados de entrada do sistema de acordo com suas necessidades. A Figura 3.5 ilustra a *interface* do *software* do *laser*.

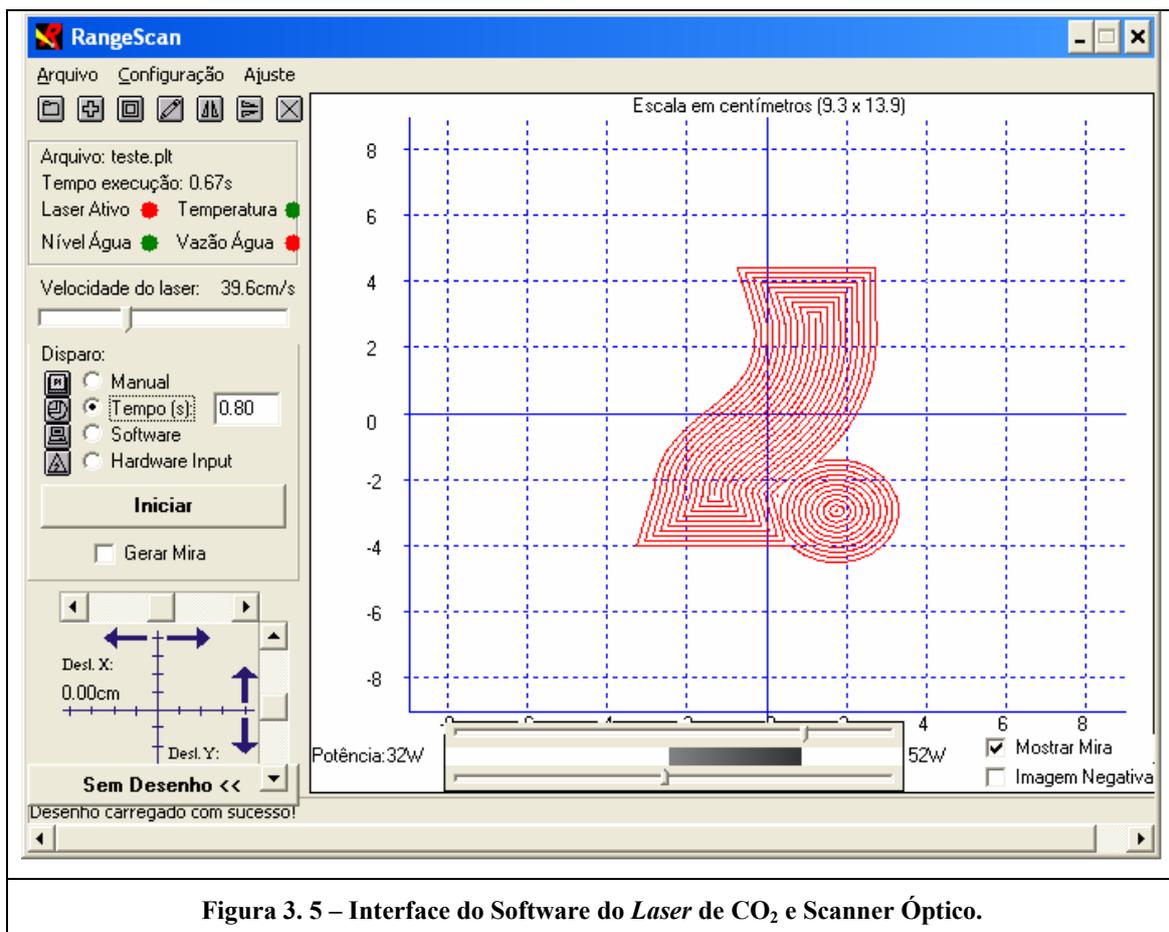


Figura 3. 5 – Interface do Software do *Laser* de CO₂ e Scanner Óptico.

3.2.3 – Cabeçotes Galvanométricos

O cabeçote galvanométrico possibilita altíssimas velocidades de varredura pela sua baixa inércia e altíssima resolução. Possibilita, também, a atuação do sistema com o *laser* focado sobre uma superfície a velocidades de até 2000 mm por segundo, com uma precisão de +/- 0,05 mm. Este sistema é normalmente utilizado para pequenas áreas de trabalho de corte (até 200 x 200 mm). A Figura 3.6 mostra um esboço dos cabeçotes galvanométricos, incluindo a lente que ajusta o foco de incidência do *laser*.

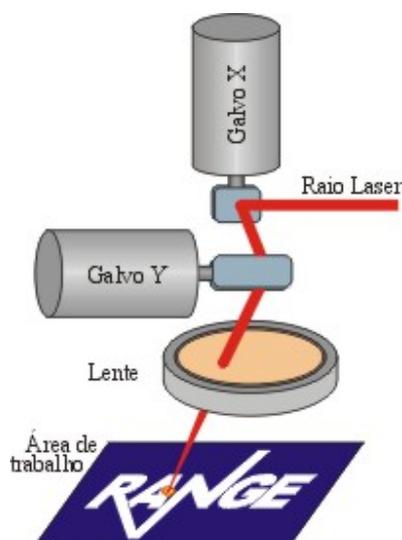


Figura 3. 6 – Esboço dos Cabeçotes Galvanométricos (X e Y) e da lente convergente.

O software “RangeScan for Windows”, controla os galvanômetros e o *laser*, permitindo uma série de ajustes à velocidade, potência e configurações de trabalho do *laser*. Além disto, o RangeScan permite trabalhar *On the Fly*, ou seja, a irradiação do feixe pode ser realizado com a peça em movimento (RANGE LASER, 2006). A Figura 3.7 exhibe o módulo galvanométrico exteriormente.



Figura 3. 7 – Exterior do Cabeçote Galvanométrico.

O cabeçote galvanométrico é especialmente desenvolvido para permitir o seu uso em ambientes industriais 24 horas por dia sem qualquer necessidade de manutenção. Com exclusivo sistema de troca de lentes, o compartimento é totalmente vedado, evitando a entrada de resíduos ou impurezas que possam vir a contaminar os espelhos ou a lente. O cabeçote pode ser montado em qualquer orientação ou ângulo, em função da aplicação.

Os suportes do espelho e da lente parcial de saída são fabricados em AISI, com vedações de alto vácuo. A lente parcial é também protegida por uma janela, garantindo a vedação do vácuo e evitando riscos e/ou degradação da lente.

O deslocamento do material em um eixo enquanto o laser imprime no outro eixo, aumenta significativamente a área de trabalho do laser.

3.2.4 – Tanque Depositor de Resina

O Tanque de Resina é um reservatório onde o material polimérico (viscoso) é depositado. À medida que as camadas são construídas, a plataforma elevadora abaixa-se permitindo que a resina cubra uma nova camada milimétrica. Este equipamento encontra-se ainda em fase adaptação ao novo sistema.

3.2.5 – Plataforma Elevadora

A Plataforma Elevadora é um conjunto eletro-mecânico de precisão, com deslocamento no eixo z (axial), acoplada a um motor de controle de passo de deslocamento de 10 μ m, com a finalidade de determinar a construção das camadas do protótipo. Acoplado

ao conjunto eletro-mecânico foi construída uma plataforma utilizada para fixação do substrato (teflon) para a deposição da resina a ser modulada. É um elevador com um plano que, ao mesmo tempo em que recebe as camadas de resina, suporta a peça em construção e, além disto, desce ao longo do processo, à medida que cada camada é construída.

3.2.6 – Chiller

O *Chiller* é dispositivo refrigerador do tubo de *laser* por água. Funciona como um radiador de automóvel refrescando o *laser* que se aquece a elevadas temperaturas durante seu funcionamento. Sua operação é bastante simples, bastando apenas que as conexões estejam ligadas, o tanque com água destilada esteja completo e esteja ligado à rede elétrica. A Figura 3.8 mostra o *Chiller*, o qual possui sensores e alarmes de temperatura e de fluxo de nível de água. A capacidade de refrigeração é sobredimensionada de modo que seu funcionamento seja em regime de baixo esforço deste equipamento, garantindo uma vida longa e um fornecimento constante de água gelada até 14°C.



Figura 3. 8 – O Chiller empregado no Sistema ELI (RANGE LASER, 2006).

No *display* encontra-se a temperatura da água e todos os parâmetros de refrigeração. A temperatura pode ser controlada com uma variação de +/- 0,4° C. Os *chillers* vêm também com saída a relê de termostato para sobretemperatura (com valor ajustável pelo usuário) e saída a relê de nível de água.

A Tabela 3.2 apresenta as características do *Chiller* cujo modelo é o CH100, presente no laboratório da FEQ.

Tabela 3. 2 – Modelo do *Chiller* presente na FEQ/UNICAMP.

Modelo	Aplicação	Temperatura	Capacidade de Refrigeração
CH100	<i>Chiller para lasers</i> até 100W	A partir de 14°C	500W

3.2.7 – Planificador de Material

O Planificador caracteriza-se por uma espécie de régua que, imediatamente após o depósito de uma nova camada de material, percorre toda a plataforma planificando a resina. É um equipamento relativamente simples, porém com uma importância grandiosa no processo IRTL.

3.2.8 – Fonte de Tensão

A Tabela 3.3 apresenta as características da Fonte de Tensão, responsável pelo suprimento da alimentação de energia do Sistema ELI.

Tabela 3.3 – Características da Fonte de Tensão.

Características da Fonte	Valores
Descarga inicial	até 45000 VDC
Corrente regulada	2 a 35 mA
Tensão de entrada	110 / 220 VAC
Consumo máximo	10 / 6 A
Máxima voltagem contínua	34500 VDC
Máxima corrente de pulso	55 mA
Potência máxima de saída	700 W
Frequência máxima de pulso	5000 Hz

3.3 – Interação *Software-Hardware* do Sistema ELI

O diagrama, apresentado na Figura 3.9, resume a interação entre o *Software* e o *Hardware* existente no Sistema ELI desde seu início até seu fim, partindo do design do protótipo, passando pela assistência de computador pelo tripé CAD/CAE/CAM e, por fim, pelos módulos do sistema.

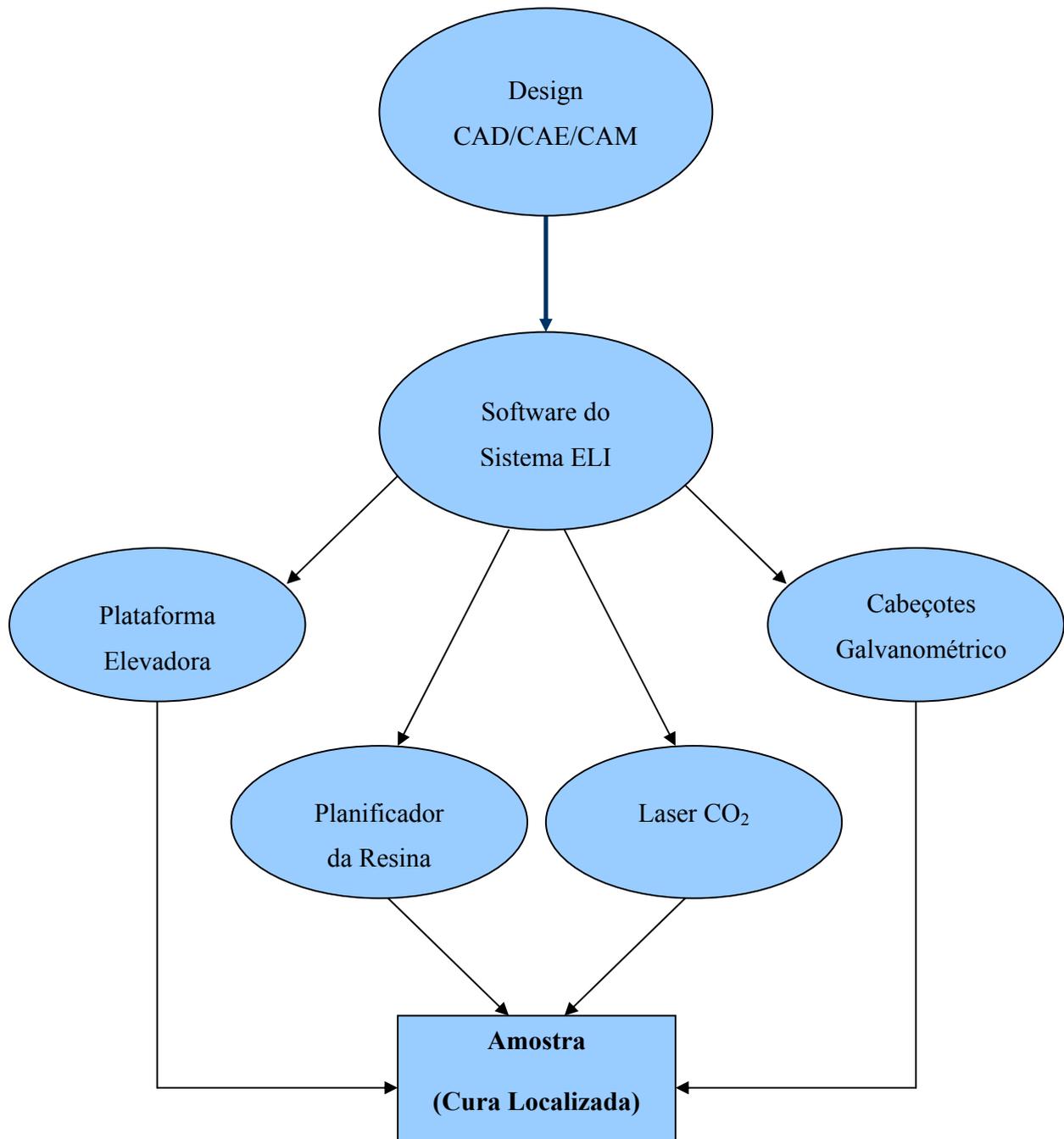


Figura 3. 9 – Interação *Software-Hardware* no Sistema ELI.

3.4 – Funcionamento do Sistema ELI

O sistema estereolitográfico descrito permite que os protótipos sejam construídos da seguinte maneira:

↗ inicialmente, depois de preparar a amostra, define-se o modelo gráfico com o uso de um programa modelador de sólidos (CAD), passando pela fase de processamento dos dados, com a conversão do desenho em finas seções transversais (fatiamento do sólido). O objeto é discretizado em microvetores que determinam a trajetória do feixe *laser* em toda seção do desenho. Para esta finalidade o módulo de controle é programado para definição destes microvetores, que no fundo são responsáveis diretos pela geometria e confecção da peça. Importante citar que, em nosso caso, as dimensões da peça a ser construída, prevista por este processo, coincidem com as dimensões reais do protótipo construído.

↗ uma vez dimensionado, a construção do protótipo escolhido inicia-se pela irradiação do feixe do *laser*, através do sistema, em sincronia com o módulo de controle. O *laser* de CO₂ opera dentro da faixa de 10 – 50 watts contínuos (CW) com diâmetro de feixe de 0,80 mm, em comprimento de onda fixo 10,6µm e taxa de repetição de 35ms.

↗ a luz *laser* passa então pelo módulo de controle, que tem a função específica e importante de dirigir, focalizar e varrer a superfície da resina termossensível, com velocidade variável, de acordo com as especificações previstas pelo programa do módulo de controle.

↗ As áreas iluminadas pelo *laser* curam (solidificam) e uma nova camada de resina cobre a camada curada e o feixe *laser*, desenha uma nova seção que cura e se adere a anterior. Neste processo podemos controlar e variar a espessura da camada que esta sendo curada de acordo com as previsões geométricas preestabelecidas. Para este tipo de resina (epóxi) a resolução espacial da camada obtida está em concordância com as dimensões do feixe *laser* (cura localizada). Este processo é repetido automaticamente até se completar a peça.

O sistema, como foi descrito, usa resinas termossensíveis como matéria prima e como produto final. Entende-se que seja importante descrever o processo básico de preparação da amostra (resina e demais componentes específicos). O efeito desta

preparação, levada ao sistema criado de produção dos protótipos é fundamental ao sucesso do mesmo.

3.5 – A Composição da Amostra

A cura das resinas é o processo físico que ocorre onde um conjunto de reações químicas provoca a mudança das propriedades físicas do material (usualmente de um líquido ou semi-líquido para um sólido) pela ação do calor, catalisadores e agentes de cura, isolados ou em combinação, com ou sem pressão. (BOHM e TVEEKREM, 1982; BILLMEYER, 1984; MANO, 1985). Análises dos efeitos da variação de parâmetros como a Temperatura de Cura e a Difusão são apresentados.

A Cura localizada consiste em se solidificar, na medida certa, somente a região da amostra polimérica irradiada pelo feixe *laser* compreendida pela área definida pelo diâmetro do feixe *laser* com certa profundidade de absorção óptica δ na resina, definindo um volume. Este é o principal objetivo do processo de Estereolitografia, seja por UV, seja por IR. Os estudos realizados neste trabalho são focados na obtenção dos melhores resultados para a cura através da determinação dos valores, de cada variável do processo, mais adequados para cada condição.

A reação de cura é normalmente uma reação exotérmica, mas assim como outras reações, o processo de cura requer um suprimento inicial de energia para curar a região da resina atingido pelo *laser*. O fornecimento de energia pode se dar de várias formas. As duas mais utilizadas são a de energia térmica (radiação infravermelha) no processo de cura termodinâmico e a de energia luminosa (luz ultravioleta ou visível) no processo fotodinâmico (BOLT e CARROLL, 1963; TURRO, 1965; SRINIVASAN, 1994).

A produção de modelos por meio do processo de Estereolitografia por Infravermelho (ou Termolitografia) envolve a cura de sistemas poliméricos de baixa viscosidade.

De acordo com BÁRTOLO (2001), o primeiro passo para o desenvolvimento de um sistema inteligente vinculado ao *design*, otimização e controle de um Processo Termoestereolitográfico é se obter informações adequadas referentes às reações cinéticas da resina termossensível e fotossensível adotada. De modo geral, este é o procedimento adotado para qualquer sistema com reação química, devido ao forte impacto que as reações têm no comportamento do processo (MELO, 2005).

Muitos são os parâmetros em um sistema de Prototipagem Rápida e, mais ainda, os efeitos produzidos pelas variações destes parâmetros, os quais requerem minuciosas análises. A temperatura externa é um dos parâmetros fundamentais no processo de cura da resina em sistema que operam com *laser* de CO₂.

Segundo BURNS (1993), um método importante para iniciar termicamente reações de cura é o uso de radiação infravermelho emitida por *laser* CO₂. O *laser* CO₂ possui maior eficiência na região espectral de 10.6 μm, mas pode também produzir resultados significativos na região entre 9 e 11 μm. Nestas regiões, muitos sistemas poliméricos apresentam absorções suficientes para serem aquecidos pelo *laser* CO₂ (CASTLE e SADHIR, 1990).

A composição padrão utilizada neste trabalho é formada por uma mistura de resina Epóxi, Dietilenotriamina e Sílica. A proporção da Sílica na amostra é determinante para o sucesso do confinamento (cura) da resina sob ação do *laser*. O papel da sílica é de moderador no controle do fluxo de calor, denominado *heat sink*, do inglês, algo como “absorvedor de calor”. A Tabela 3.4 apresenta os materiais e as respectivas proporções da composição orgânica adotada neste trabalho (SCARPARO *et al.*, 1994).

Tabela 3. 4 – Materiais da Amostra e respectivas proporções.

Material	Partes
<i>Resina Epóxi (DGEBA)</i>	<i>100</i>
<i>Dietilenotriamina (DETA)</i>	<i>14</i>
<i>Sílica em pó</i>	<i>7</i>

A escolha da resina polimérica para utilização no processo de estereolitografia com o *laser* na região espectral do infravermelho levou em consideração as características de termossensibilidade, baixa viscosidade e baixa variação volumétrica durante o processo de cura. A escolha da resina epóxi para compor a amostra foi mais adequada em função das suas características e por curar quando sob ação de calor. Existem outras resinas líquidas que curam de maneira similar, mas as resinas epóxi possuem mais propriamente uma combinação única de propriedades (LEE,1967; FLORY,1953), tais como:

- ***Mínima contração***: uma das mais vantajosas propriedades das resinas epóxi é sua mínima contração durante a cura. Resinas epóxi curam envolvendo pouca reordenação molecular e nenhuma produção de agentes voláteis.
- ***Cura fácil***: resinas epóxi curam rapidamente e facilmente para praticamente qualquer temperatura de 5 a 150°C, dependendo da escolha do agente de cura.
- ***Excelente adesividade***: devido à composição química, principalmente a presença de grupos polares, as resinas epóxi permitem excelente capacidade de adesão a muitas superfícies.
- ***Ótimas propriedades mecânicas***: a resistência das resinas epóxi normalmente supera outros tipos de resinas. Isto é provavelmente resultado da baixa contração, a qual minimiza as tensões internas (ou residuais) responsáveis pelo enfraquecimento da estrutura mecânica.
- ***Excelente resistência química***: a resistência química da resina curada depende consideravelmente do agente de cura escolhido. Exclusivamente, excelente resistência química pode ser obtida pela qualidade do próprio material.

O DGEBA (diglicidil éter bisfenol A, mais conhecido por resina epóxi) é um material termossensível básico, o DETA é o agente de cura e a Sílica, o moderador do fluxo de calor na reação iniciada com a exposição da amostra ao *laser*. Resinas termossensíveis são convertidas em redes tridimensionais a partir da reação de polimerização conhecida por “Cura”, afirma (STRONG, 1996 e KAMAL, 1984).

A sílica foi escolhida para ser incorporada na formulação da resina termossensível por apresentar a melhor combinação de características tais como: minimizar o encolhimento durante a cura da resina, alta absorção para o comprimento de onda do *laser* de CO₂, estabilidade ao calor, fácil disponibilidade e alteração nas propriedades específicas (química, mecânica, elétrica e óptica) da resina curada. A Tabela 3.5 mostra as propriedades termofísicas dessa amostra.

Tabela 3. 5 – Propriedades da amostra (100 partes de resina epóxi + 7p. de sílica).

Propriedades Físicas	Unidade	Amostra
Condutividade térmica	W/m.K	0,0427
Densidade	Kg/m ³	2799
Calor específico	J/Kg.K	1370

As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam as fórmulas estruturais da Resina Epóxi e do Dietilenotriamina.

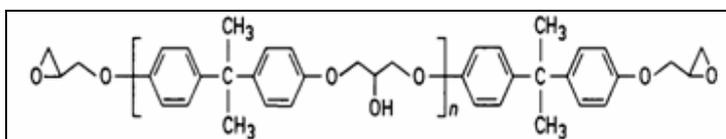


Figura 3. 10 – Fórmula estrutural da Resina Epóxi.

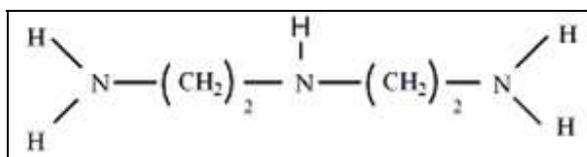


Figura 3. 11 – Fórmula estrutural do Dietilenotriamina.

A Figura 3.12 representa duas partículas de Sílica, uma hidrofóbica e, outra, hidrofílica.

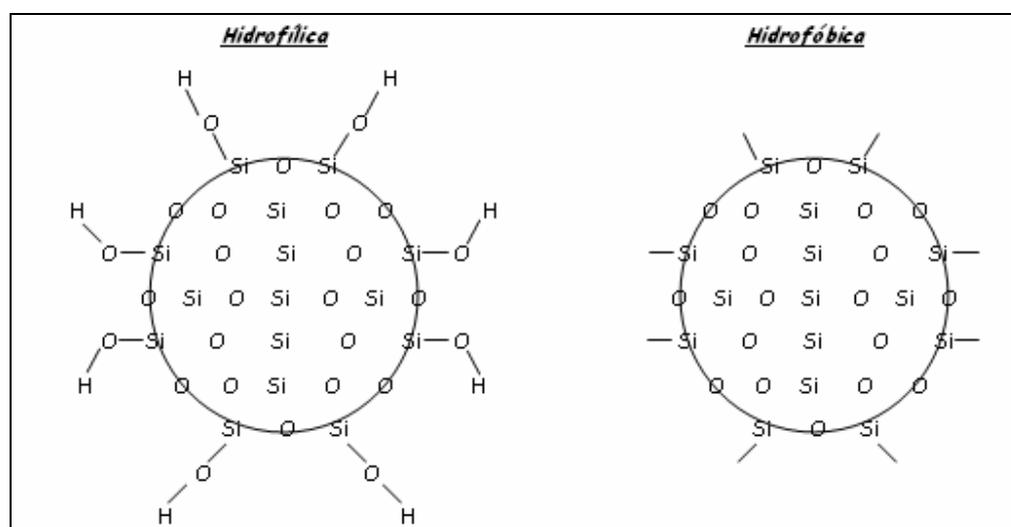


Figura 3. 12 – Representação de uma partícula de Sílica.

Segundo JARDINI (2001), a cura localizada depende da quantidade de sílica no sistema. Se a quantidade de Sílica for acima da composição ideal (Tabela 3.4), ocorre um bloqueio da cura entre os reagentes, os quais passam a absorver toda a energia transferida à amostra, ocorrendo a formação de pequena quantidade de ligações cruzadas no volume de absorção, devido à grande quantidade de grãos de sílica distribuídos entre os reagentes, e a cura não é completa.

Em contrapartida, com uma menor quantidade de Sílica, a cura não é localizada. Ocorre, portanto, a formação de um grande número de ligações cruzadas ocasionando o aumento da geração de calor no interior do volume de absorção devido a pouca quantidade de grãos de Sílica entre os reagentes. Este aumento do calor gerado, em razão da ausência do moderador de fluxo de calor, propicia que o calor retido no interior do volume (somatório das energias transferidas pelo *laser* e do calor gerado pelas ligações cruzadas) seja conduzido para regiões indesejáveis, impossibilitando a cura localizada.

3.6 – Principais Vantagens do Sistema ELI

As principais vantagens atribuídas ao Sistema ELI, o qual engloba o já discutido Processo IRTL, são:

✓ Ausência do Fenômeno de Contração

O processo com IR, ao contrário do processo com UV, em função da sílica na amostra na medida certa, concentra a energia transferida pelo *laser* na região atingida, realizando uma cura localizada sem haver espalhamento da energia (que solidificaria regiões vizinhas) e sem haver contração da resina, o que facilita a produção exata da protótipo.

✓ Eliminação do tratamento de pós-cura da resina

Neste processo, é desnecessário o tratamento de pós-cura, bastando apenas se retirar o objeto manufaturado do tanque de resina sem nenhum trabalho de limpeza extra ou nem da necessidade de se submeter o protótipo novamente ao *laser* para a conclusão do objeto final.

✓ Utilização de materiais alternativos / Autonomia

A variedade de materiais que eventualmente podem ser utilizados é um ponto importante pois isto torna o processo mais adaptativo, mais independente e autônomo de um ou outro tipo de material, propiciando também a aplicação de matérias-primas não-ofensivas ao meio ambiente. Logicamente, o fato de se descobrir um novo material implica em uma longa série de estudos até se encontrar uma composição ideal, ou seja, os componentes e respectivas proporções adequadas.

✓ Máquina e material a custo reduzidos

- ✓ Implantação do sistema no parque industrial nacional

Por ser um processo genuinamente brasileiro, a implantação e desenvolvimento deste processo no Brasil favorece a Prototipagem Rápida nacional, contribuindo para com a credibilidade do país no ramo da Prototipagem Rápida.

3.7 – Conclusões

Este capítulo apresentou o Sistema SLI desenvolvido na Unicamp, o qual é base de estudo do presente trabalho. Este sistema compreende a integração do processo IRTL com a utilização de resinas poliméricas termossensíveis. A composição considerada padrão no desenvolvimento do trabalho é formada por *Resina Epóxi (DGEBA)*, *Dietilenotriamina (DETA)* e *Sílica em pó*, nas proporções em partes, 100:14:7, respectivamente.

Os módulos mais importantes que compõem o sistema são o *laser* de CO₂, um microcomputador para a coordenação e controle do sistema, os cabeçotes galvanométricos, a plataforma elevadora, o chiller (“radiador” do *laser*).

A boa integração de todos estes equipamentos controlados pelo microcomputador e o conhecimento de seus parâmetros e das características dos materiais utilizados são fundamentais para a obtenção dos melhores resultados a partir deste sistema.

As principais vantagens do sistema ELI são a ausência do fenômeno de contração de material após a cura, o prescindível tratamento pós-cura, a possibilidade de materiais alternativos e custos menores de máquinas e materiais.

CAPÍTULO 4 – O Modelo Numérico ANSYS

Em continuidade aos resultados deste trabalho, neste capítulo é apresentado o Modelo Numérico ANSYS, utilizado como modelo matemático para as análises realizadas acerca da sensibilidade de alguns dos parâmetros operacionais pertencentes ao *laser* infravermelho do Sistema ELI, e das propriedades físicas da amostra.

Este capítulo prepara o ambiente de simulações ANSYS com seus equacionamentos, suas configurações (em nível de programa computacional), a atribuição de características próprias do cenário real como a convecção e a condução de calor entre as camadas dos materiais (amostra e ar). Os resultados finais serão oportunamente apresentados no capítulo seguinte.

4.1 – O ANSYS

O ANSYS é uma ferramenta computacional para análise, por elementos finitos, de problemas de engenharia. É um poderoso *software* comercial de simulação extremamente rico em recursos para tratamentos e análises em diversas áreas de engenharia, tais como análises termodinâmicas (transferência de calor, análises de resfriamento, gradientes de temperatura, respostas térmicas) e análises de estruturas (vibração, análises de *stress*, elasticidade). A escolha do ANSYS se dá pelo fato deste software CAE importar modelos digitais CAD para análise de simulação. O software CAE, baseado em análises por elementos finitos, é usado para cálculos de tensões, vibração, transferência de calor, fluxo de fluidos, instalações industriais e outras aplicações (FERREIRA *et al.*, 2002).

A Figura 4.1 ilustra a *interface* do *software* ANSYS.

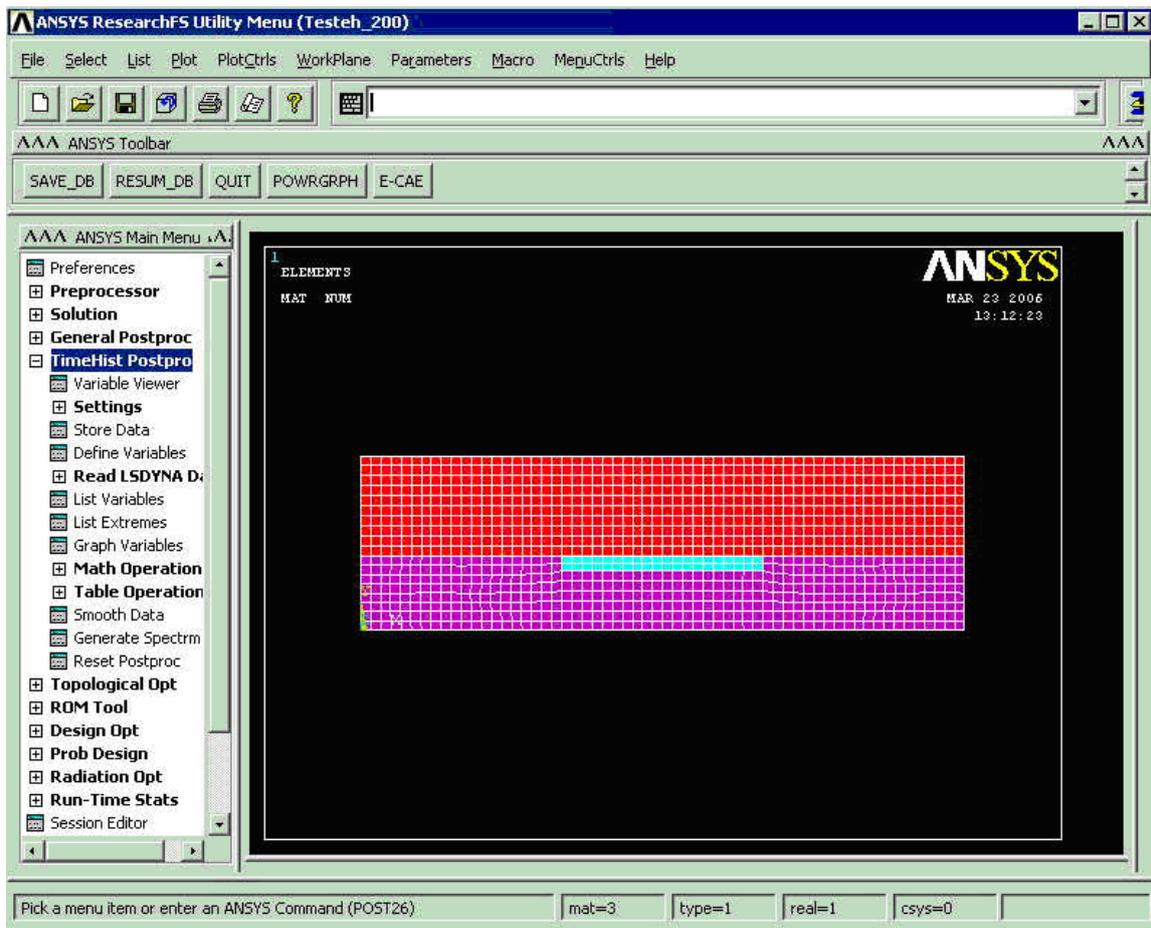


Figura 4.1 -Interface do software ANSYS

Neste trabalho, o método teórico desenvolvido por SCARPARO *et al.* (1992) para a reprodução em ambiente virtual (simulação computacional) foi utilizado como premissa e fonte de alimentação para o ANSYS, conforme poderá ser constatado ao longo deste capítulo. O modelo abrange as equações que regem o problema da transferência de calor no material, uma visão geral dos parâmetros envolvidos no processo e as condições de contorno que serão aplicadas e analisadas.

Para a “virtualização” do processo de termolitografia, ou seja, a representação do contexto real em um contexto analítico computacional, foi necessário o encapsulamento de um sistema de condições através de equações matemáticas (modelo numérico). O modelo abrange as equações que regem o problema da transferência de calor no material, uma visão

geral dos parâmetros envolvidos no processo e as condições de contorno que serão aplicadas e analisadas.

O modelo numérico engloba uma série de equações diferenciais que traduzem a Matemática e a Física intrínsecas no cenário real do sistema IRTL e, este mesmo modelo é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) (vide Apêndice E).

Ao lado do Método dos Elementos Finitos, utilizado e consagrado por diversos autores, inclusive ANDRADE (2003) em seus respectivos trabalhos, o ANSYS é utilizado para a simulação de variados processos de engenharia (CASPI *et al.*, 2003; LU *et al.*, 2004; CONDE *et al.*, 2004).

O ANSYS é um *software* de grande utilidade na simulação de peças com geometrias complexas, possibilitando tratamentos bidimensionais e tridimensionais e também por apresentar facilidades de pré e pós-processamento dos dados.

Uma malha, representando um volume da amostra, é construída com vários nós que podem ser precisamente averiguados e que, sobretudo, sustentam, independentemente de sua posição na malha, resultados locais fundamentais para a compreensão espacial e temporal dos efeitos das variáveis analisadas no cenário.

Segundo ANDRADE (2003), a solução de problemas através do MEF realizada pelo ANSYS calcula as temperaturas nodais e as utiliza na obtenção de outros parâmetros térmicos. A manipulação do MEF e sua aplicação na simulação de processos, como os que envolvem transferência de calor e mudanças de fase, são relativamente complexas, envolvendo:

- Conhecimento profundo dos aspectos físicos envolvidos no problema;
- Teoria de interpolação e aproximação por subdomínios;
- Princípios do método de resíduos ponderados;

- Álgebra matricial;
- Métodos numéricos de integração, soluções de sistemas lineares e não lineares de equações algébricas;
- Linguagens de programação (DHATT *et al.*, 1985).

No processo IRTL, como já apresentado no capítulo 2 e 3, um *design* gráfico inicial desenvolvido em CAD, é triangularizado e fatiado em várias camadas tão finas quanto seja necessário (levando-se em consideração, obviamente, um ajuste da relação do número de camadas fatiadas *versus* o tamanho do arquivo gerado que pode influir significativamente no seu processamento). Estas camadas são enviadas, uma a uma, para o sistema de *hardware* integrado (laser + espelhos galvanométricos + tanque de resina), a partir de um sistema central de controle. O *laser* é então incidido sobre a superfície de resina, planificada sobre a plataforma xy, contornando todos os pontos pertencentes à geometria a ser construída naquela camada. Neste contexto, baseado na filosofia CAE, o ANSYS é utilizado para a construção de um modelo numérico apto a simular, de acordo com o processo descrito, a transferência de calor e o fenômeno *heat sink* durante a cura localizada por pulsos de *laser* sobre o material polimérico (ANDRADE *et al.*, 2005).

4.2 – A Modelagem Matemática

O modelo matemático, descrito neste capítulo, visa a simulação da transferência de calor e da geração de calor devido à irradiação do feixe *laser* de CO₂ na região espectral do infravermelho, sobre uma camada do material polimérico, durante o processo IRTL. Além disto, torna-se possível acompanhar e analisar o comportamento da distribuição de temperatura em um ponto da superfície da resina durante o processo, de acordo com o conhecimento da temperatura de cura das resinas.

A construção do cenário virtual para a realização das simulações exige a composição de vários detalhes no ANSYS: a configuração da geometria e os valores das

propriedades físicas da amostra como, por exemplo, a condutividade térmica, a densidade de massa e o calor específico da composição (Tabela 3.5), a duração do pulso, a potência e a taxa de calor gerado pelo feixe *laser*. Estes detalhes são todos dados de entrada para o ANSYS que os recebe através de um *script* (arquivo com dados e instruções pré-definidas pronto para ser executado quando solicitado).

Com o fornecimento dos dados de entrada ao *software*, o *start-up* do processamento ocorre e, após a execução integral do *script*, a simulação está completa e os resultados esperados podem ser avaliados através da visualização das curvas com o perfil da distribuição da temperatura ao longo da amostra, monitorando-se, portanto, que regiões sofreram a cura e a velocidade ou taxa com que a reação ocorre.

Conforme mostra ANDRADE (2003), o modelo considera os três principais modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação, sendo que a base de sua análise térmica é a equação de balanço de calor obtida através do princípio da conservação de energia. A Equação 4.1 na forma diferencial, para um volume de controle genérico, assume a seguinte forma:

$$\rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot \vec{q} + \dot{q} \quad 4.1$$

onde :

ρ massa específica do material,

c_p calor específico,

T temperatura,

t tempo,

\vec{V} vetor velocidade de transporte de calor que pode ser escrito da forma

$$\{V_x, V_y, V_z\},$$

\vec{q} vetor fluxo de calor e

\dot{q} taxa de geração de calor (ANSYS Manual Guide, 1998).

A Lei de Fourier relaciona o vetor fluxo de calor com o vetor gradiente térmico como é mostrado na Equação 4.2:

$$\vec{q} = [D]\nabla T \quad 4.2$$

onde:

[D] é a matriz condutibilidade que pode ser escrita da forma:

$$[D] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad 4.3$$

sendo k_x , k_y e k_z a condutibilidade do material nas direções x, y e z respectivamente.

Combinando as equações 4.1 e 4.2, e expandindo para forma diferencial tem-se:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad 4.4$$

Dos modos de transferência de calor, apenas a radiação não está sendo analisada neste trabalho, pois as temperaturas utilizadas fazem com que este fenômeno seja desprezível. O modelo não prevê a dependência da temperatura para as condutibilidades, densidade e calor específico.

O Modelo Matemático pode considerar também a geração de calor causada pela liberação de calor latente durante transformações de fases que ocorrem em processos como os de fusão, solidificação ou reações exotérmicas que venham ocorrer durante os processos. Na análise da liberação de calor latente devido a transformações de fase é utilizado o método da entalpia (SWAMINATHAN e VOLLER, 1992), sendo necessária a definição da entalpia do material como função da sua temperatura e o valor do calor latente decorrente desta transformação.

A entalpia (H) do material é definida por:

$$H = \int \rho c_p(T).dT \quad 4.5$$

A energia liberada pela transferência de fase não foi utilizado pois verificou-se que o valor desta energia é desprezível se comparado ao valor da energia irradiada pelo *laser*.

Para a interface entre a amostra e o ar, foi considerada uma camada de ar em contato perfeito com a superfície da amostra e transferência de calor ocorrendo por condução entre os dois materiais, como mostra a Figura 4.2.

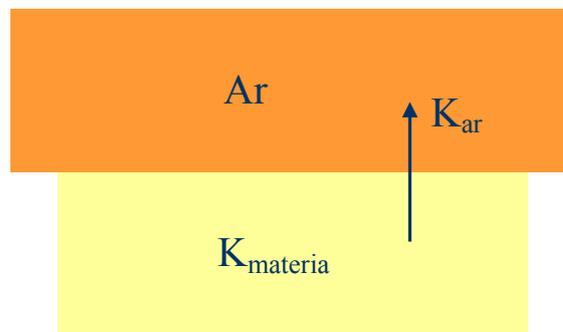


Figura 4. 2 – Esquema representativo da transferência de calor ocorrendo por condução.

Um detalhe importante na construção do cenário virtual é a representação da fonte irradiadora de *laser*, uma vez que não existem elementos na malha que possam representar o feixe. A forma adotada para inseri-la ao modelo é a admissão e adoção de um termo de geração de calor à equação de balanço de energia. O dimensionamento desta fonte irradiante de energia é estimado com base nos valores da potência do *laser*, diâmetro do feixe e profundidade de absorção.

Um modelo teórico simples é utilizado para descrever o fluxo de calor na amostra (SCARPARO *et al.*, 1995). A energia do feixe *laser* é determinada pela densidade de potência e pelo tempo de interação do feixe *laser* na superfície do material. A quantidade de energia depositada E é o produto da potência P pelo tempo de interação ou *dwell time* t_d , ou seja:

$$E = P \cdot t_d \quad 4.6$$

O *Dwell-Time*, por sua vez, é definido pela razão entre o diâmetro do feixe *laser* 2ω pela sua velocidade de varredura v :

$$\tau_d = \frac{2\omega}{v} \quad 4.7$$

O interesse na predição dos efeitos do *laser* sobre a cura localizada, a quantidade de energia depositada na amostra e o volume atingido por esta energia ou radiação devem ser avaliados. Devido à amostra ter alto grau de absorção a comprimentos de onda contínuos por *laser* de CO₂ (vide Apêndice D), praticamente toda a energia irradiada pelo pulso durante o *dwell time* é absorvida a uma profundidade de absorção δ medida a partir da superfície da amostra. Inclusive, nas simulações, considera-se que toda a energia irradiada seja absorvida pela resina, sem haver reflexões.

Imediatamente após a aplicação do pulso *laser* a energia térmica absorvida E é totalmente transformada em calor no volume cilíndrico definido por:

$$V = \pi \cdot \omega^2 \cdot \delta \quad 4.8$$

onde ω é o raio do feixe *laser* e δ é a profundidade de absorção da amostra.

O valor da geração de calor, neste modelo, é dependente da potência P do *laser* e do volume irradiado V conforme a equação (4.10):

$$\dot{q} = \frac{P}{\pi \omega^2 \delta} \quad 4.9$$

É importante ressaltar a consideração de que as dimensões do feixe *laser* 2ω (dimensão no plano x e y) e da profundidade de absorção δ da amostra (direção do eixo z)

são muito menores do que a dimensão da camada da amostra do cenário, conforme pode ser observado na Figura 4.3.

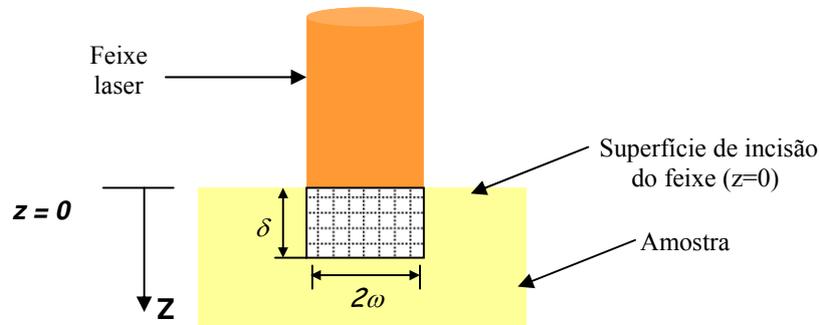


Figura 4.3 – Esboço do modelo físico teórico.

Após a irradiação do *laser*, a região atingida pelo feixe recebe alta quantidade de calor, em função de sua pequena dimensão. A difusão ou transferência de calor, de um ponto para outro na amostra, ocorre por condução. O objetivo para a cura localizada é que ela possa ser controlada para uma determinada região na amostra, mesmo que esta região seja maior que o diâmetro do *laser*, dependendo do caso, com uma profundidade de absorção δ , representando, em síntese, um volume cilíndrico. O efeito da difusão de calor é um dos fatores que se deseja avaliar nas simulações, visto que, desta forma, pode-se com maior precisão determinar os parâmetros de potência ou tempo de irradiação de *laser*, por exemplo, até que setor da amostra sofreu a cura completa e, também, qual a distribuição espacial da temperatura após certo tempo.

A relação entre a profundidade de absorção óptica e a condução de calor, ambas durante o período de irradiação do *laser*, é que define o quanto de volume da amostra foi aquecido suficientemente para ser curado e, conseqüentemente, produzir a estrutura desejada (SRINIVASAN, 1994; JARDINI *et al.*, 2000).

4.3 – Elaboração de Modelos pelo ANSYS

Para o modelamento usando o ANSYS, três passos sequenciais de elaboração e execução são seguidos:

- Construção do modelo (a)
- Aplicação das condições de contorno (b)
- Obtenção da solução (c)

Os passos (a) e (b) pertencem ao pré-processamento e (c) ao pós-processamento (Figuras 4.4 e 4.5). Na fase de Pré-processamento, as características de geometria e as condições de contorno são definidas. A simulação caracteriza-se por alternar pulsos de *laser*, isto é, durante um intervalo há aquecimento (irradiação de *laser*), durante outro, a fonte *laser* é desligada, ocorrendo o resfriamento da amostra. Em seguida, novamente ligado e desligado. E assim, sucessivamente, por algumas vezes.

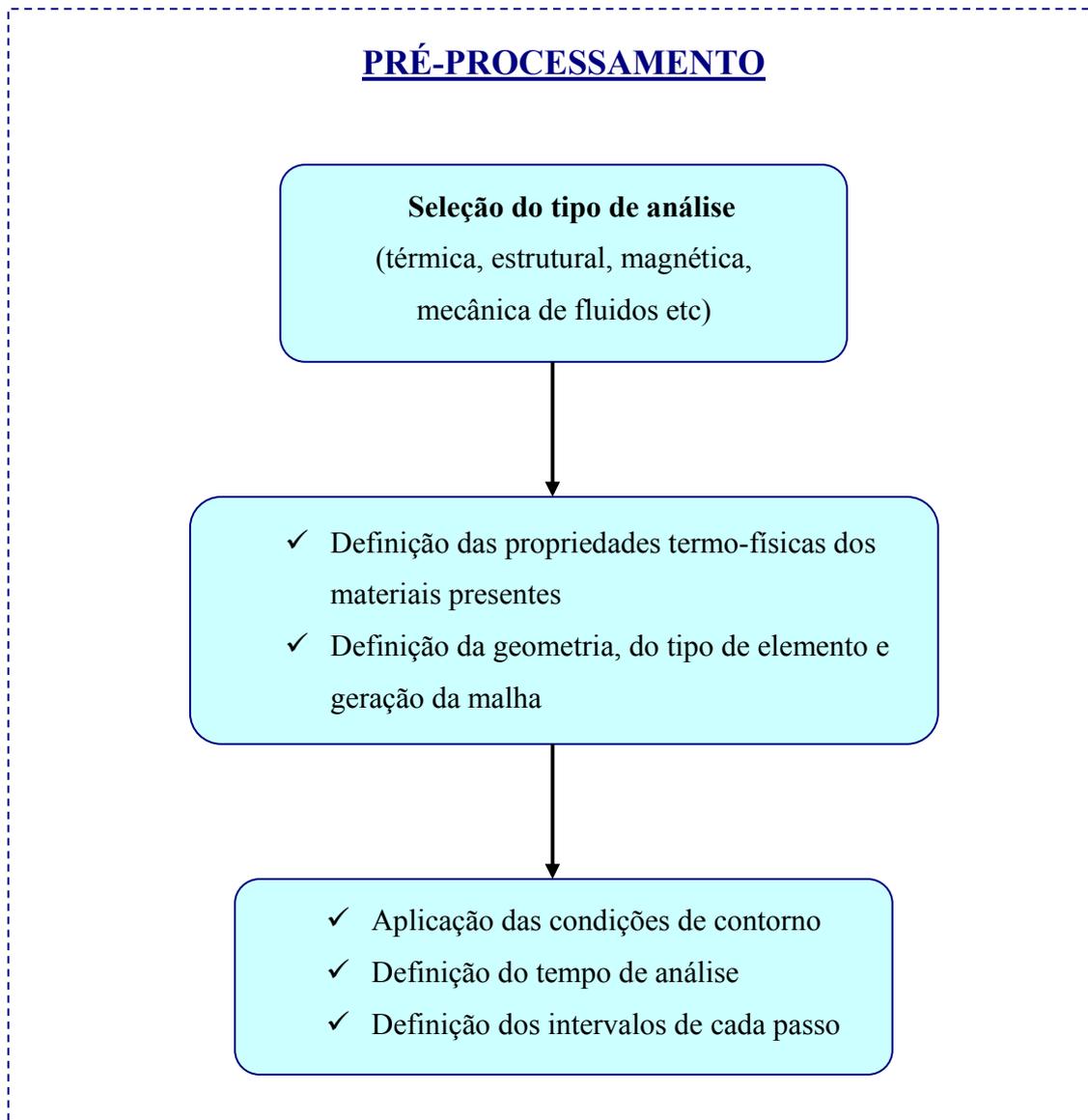


Figura 4. 4 – Fluxograma de Pré-processamento

A etapa de construção do modelo (pré-processamento) engloba:

- Escolha do tipo de análise (estática ou transiente),
- Escolha do elemento a ser utilizado
- Criação do banco de dados com as propriedades termo físicas dos materiais que compõem o sistema,
- Definição da geometria que reproduz melhor o sistema em questão,
- Aplicação das condições de contorno,
- Definição do tempo total de análise e dos intervalos de tempo dos passos (*time step*) durante a simulação numérica.

No modelo desenvolvido, é durante o pré-processamento (Figura 4.4) que o programa computacional é implementado para possibilitar uma simulação da geração de calor devida ao pulso *laser*. A energia cedida ao polímero devido à aplicação do feixe *laser* é considerada, durante a aplicação das condições de contorno, através da introdução de um valor ao termo de geração de calor. No caso de sistema com mais de um pulso *laser*, o modelo leva em consideração o tempo do pulso e o intervalo de tempo entre um pulso e outro, como se o *laser* fosse ligado e desligado alternadamente.

Após os processamentos da simulação, realização dos cálculos e obtenção da solução, dois tipos de pós-processadores estão disponíveis no ANSYS. No primeiro tipo, (POST 1) os resultados são verificados em um determinado momento sobre todo o sistema ou uma parte escolhida. É possível determinar a distribuição de temperatura a cada instante

no sistema inteiro através de intervalos de temperatura representados por diferentes cores, ou mesmo através de um gráfico de temperatura em função da posição na placa. O outro pós-processador disponível (POST26) disponibiliza a evolução dos resultados em função do tempo e do espaço, ou seja, obtém-se a variação da temperatura em função do tempo em qualquer ponto da malha (ANDRADE, 2003).

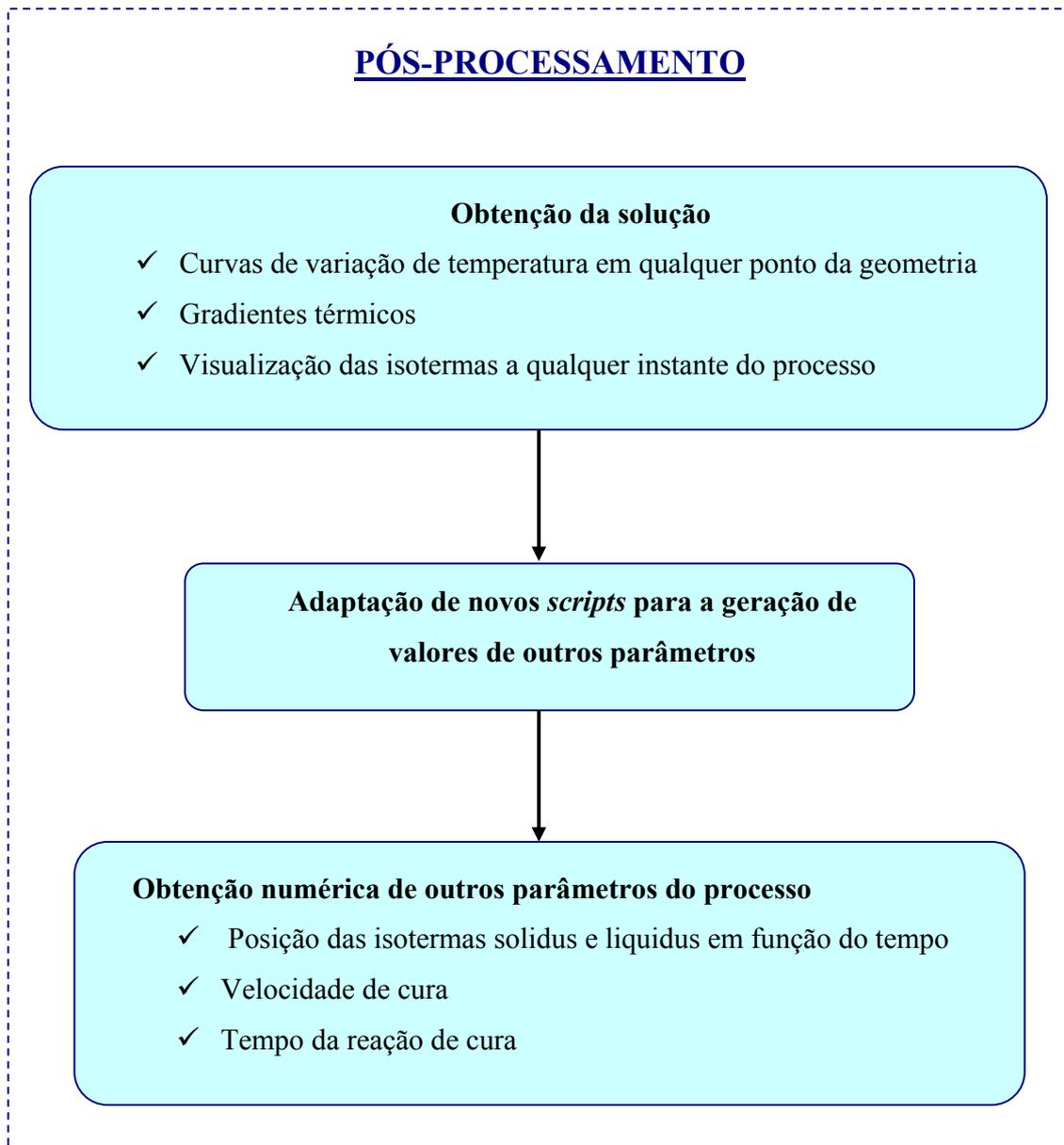


Figura 4. 5 – Fluxograma de Pós-processamento

Uma condição importante para se adaptar o processo da cura localizada, com o *laser* na região espectral do infravermelho, é a avaliação dos parâmetros experimentais, incluindo a potência do feixe *laser*, o tempo de interação ou duração do pulso, a frequência e velocidade de varredura, o diâmetro do feixe *laser*, e a condutividade térmica da amostra (SCARPARO *et al.*, 1996).

A análise dos cenários simulados, relativos à variação dos parâmetros operacionais, traduz o comportamento da cura e das temperaturas finais na amostra, permitindo novas adaptações ao modelo com o ajuste e melhor dimensionamento destas variáveis, ou seja, a otimização do processo IRTL, tomando-se como base os resultados obtidos experimentalmente.

4.4 – A Construção e Configuração do Modelo Numérico no ANSYS

O modelo real teórico deve ser transferido ao ANSYS para que possa ser interpretado e executado. Como em qualquer linguagem de computação, o ANSYS também possui uma sintaxe própria. Os dados de entrada (*input*) podem ser, como já dito anteriormente, inseridos no software por arquivos contendo instruções (*scripts*). Outra alternativa seria definir as configurações do caso estudado por meio das janelas e menus do programa, escolhendo-se as opções desejadas e informando-se os respectivos valores requisitados.

A linguagem de programação do ANSYS é chamada de APDL, *ANSYS Parametric Design Language*, e permite otimizar a utilização de comandos, ou macros, do ANSYS ou mesmo a criação de sub-rotinas ou programas inteiros de simulação. A partir desta linguagem será feito um estudo da viabilidade de se introduzir, dentro do próprio programa, sub-rotinas de cálculos de parâmetros do processo tais como: posição das frentes de cura da resina, gradientes de temperatura na amostra, a velocidade de cura, entre outros.

A seguir, são apresentados os passos necessários para a segunda opção, a qual pode ser denominada como “algoritmo por menus”.

1. *Nomear o modelo*
2. *Determinação do(s) tipo(s) de análise(s): térmica*
3. *Escolha dos elementos – PLANE 77: elemento plano (temperatura), quadrático, de 8 nós com um grau de liberdade.*
4. *Definição das propriedades termo físicas (consideradas, nesta etapa, não dependentes da temperatura) para o material polimérico e para o ar (quando se considera contato perfeito ente a amostra e o ar). As propriedades consideradas são: condutibilidade, densidade e calor específico.*
5. *Construção da geometria.*
6. *Divisão em elementos, térmicos, que formam a malha e indicação do material que cada elemento representa: amostra ou camada de ar.*
7. *Definir o tipo de solução: transiente*
8. *Aplicação das condições iniciais: temperatura ambiente para o polímero e a amostra.*
9. *Aplicação das condições de contorno: indicação da porção de polímero atingida pelo laser e parâmetros do laser, bordas onde ocorre transferência de calor por convecção (interface amostra / ar) e definição dos valores deste coeficiente, temperatura inicial da amostra.*
10. *Definição do tempo de cada pulso laser, dos intervalos de tempo entre os pulsos e do número de pulsos.*

11. *Definição do tempo total da análise térmica e dos intervalos de iteração.*

12. *Obtenção dos resultados: variação da temperatura em toda amostra em função da posição e do tempo.*

4.5 – Conclusões

Este capítulo descreveu o Modelo Numérico Ansys, uma ferramenta computacional baseada no Método dos Elementos Finitos. A *interface do software* foi apresentada assim como as equações que regem este modelo que representa matematicamente os fenômenos físicos que ocorrem durante a irradiação do *laser* sobre a resina polimérica, no processo Termolitográfico. Para a simulação da fonte de energia do *laser* de CO₂ foi calculado um termo de geração de calor constante em função da potência do *laser* e do volume irradiado; sendo que este volume irradiado é obtido em termos da profundidade de absorção óptica que, por sua vez, depende da quantidade de sílica na amostra.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DO MODELO NUMÉRICO ANSYS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações numéricas do processo de cura obtidos utilizando o Modelo de Elementos Finitos resolvido numericamente através do *software* ANSYS. O estudo da variação dos parâmetros operacionais do *laser* e de algumas características é essencial para um controle mais refinado do sistema. As principais variáveis analisadas são:

Parâmetros Operacionais:

- Potência do *Laser* [W]
- Diâmetro do Feixe [mm]
- Velocidade de Varredura [m/s]

Características da Amostra:

- Condutividade Térmica [W/cmK]
- Densidade de Massa [g/cm³]
- Calor Específico [J/gK]
- Proporção de Sílica na Amostra [partes]

Parâmetro de Saída do Modelo (base de análise):

- Variação do aumento da temperatura na borda e no centro da superfície da amostra

Os resultados obtidos ajudarão a direcionar futuros trabalhos experimentais e até mesmo novas simulações.

5.1 – O Cenário Geral do Modelo – Geometria e Condições de Contorno

As simulações realizadas basearam-se no Modelo Matemático apresentado no Capítulo 4. Os dados de entrada (*input*) para o ANSYS foram dimensionados através das equações do modelo apresentadas no Capítulo 4. Estes *inputs* foram inseridos no *software* por meio de *scripts*.

Foi desenvolvido um modelo de superfície bidimensional, cuja área representada pela malha é um corte transversal de uma camada da resina, como uma fatia de um paralelepípedo, que engloba a região da resina atingida pelo pulso de *laser* e uma região adjacente ao diâmetro do feixe *laser*. Considerou-se apenas condução como modo de transferência de calor, acrescentando-se elementos que representem uma camada de ar sobre a superfície da amostra, como pode ser visto na Figura 5.1.

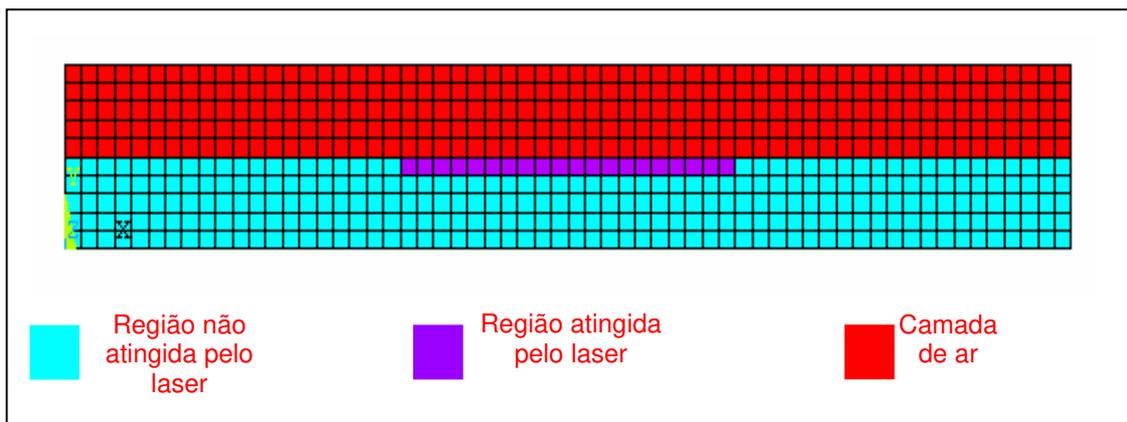


Figura 5. 1 – Malha de elementos com camada de ar

A Figura 5.1 representa a geometria do modelo que considera transferência de calor por condução entre a superfície da resina e o ar.

A geometria escolhida para simulação representa um corte transversal de um ponto da resina sendo atingida pelo *laser* como está representado na Figura 5.2. No aparato experimental, esboçado na Figura 5.3, o feixe *laser* descreve uma circunferência pela resina, passando por um mesmo ponto várias vezes até se atingir a cura completa. Na

simulação, portanto, são considerados vários pulsos *laser* e um intervalo de tempo constante entre eles, que representa o tempo que o *laser* demora a dar uma volta completa no anel que está se formando. Durante este tempo, o sistema polimérico experimenta, como esperado, um resfriamento até que o *laser* atinja novamente a região considerada na simulação. Sendo a velocidade de varredura do *laser* constante, a geometria da malha deve representar, pela simetria do sistema, o comportamento de qualquer porção do anel em construção.

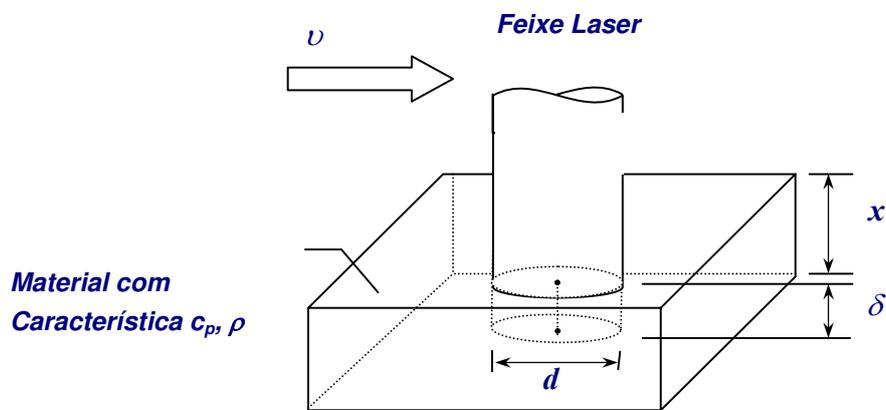


Figura 5. 2 – Representação do sistema *laser/ resina*.

Deve-se ressaltar como já foi comentado anteriormente, que a fonte de calor referente ao pulso *laser* foi projetada para gerar calor apenas naquela região irradiada pelo feixe *laser*. As dimensões reais dessa região representam o tamanho real do diâmetro do feixe 0,8mm e a profundidade considerada 60 μ m foi escolhida a partir de medidas de absorção óptica (vide Apêndice D) realizadas por JARDINI *et al.* (1998).

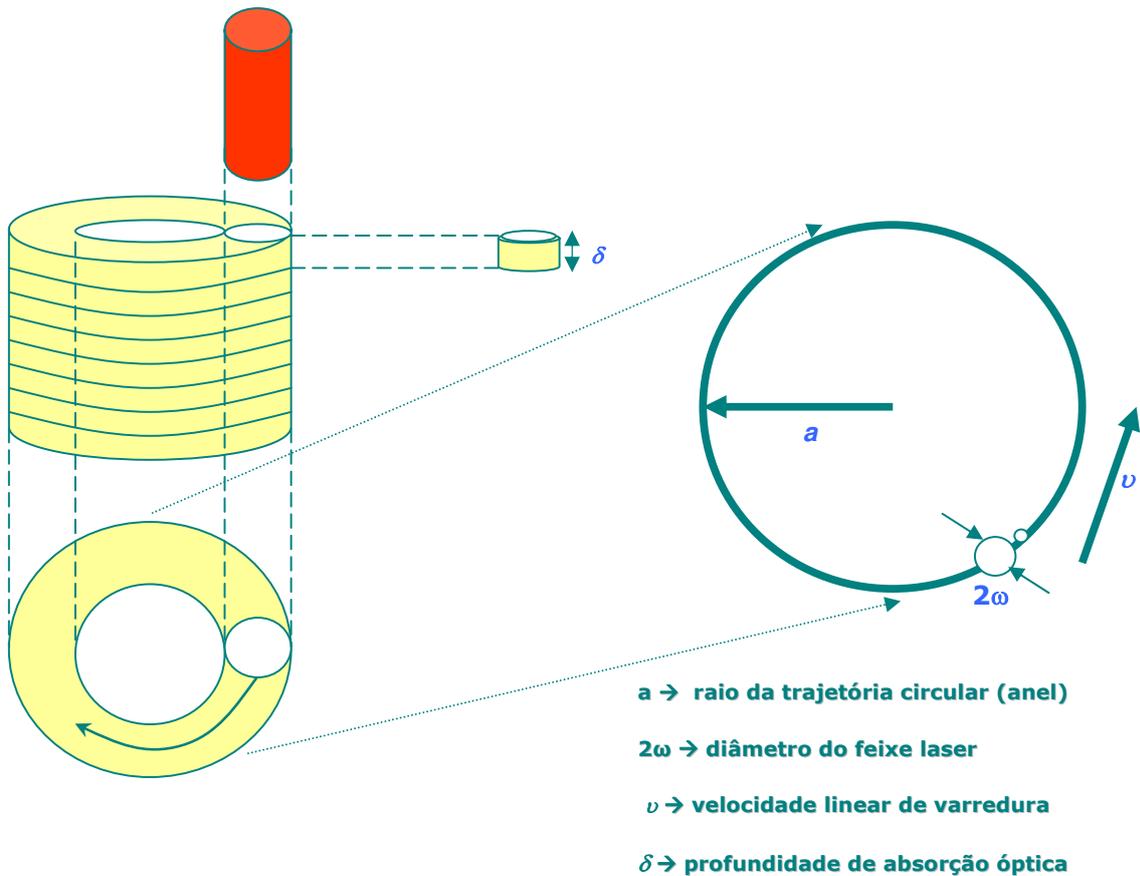


Figura 5.3 – Representação esquemática da circunferência descrita pelo *laser*.

O modelo numérico considera, para ambas as laterais da malha, dimensões semi-infinitas. Essa característica é a que representa de maneira correta o sistema físico de construção dos modelos, pois a porção de resina ao redor do feixe *laser*, durante o processo, é muito maior que a dimensão deste. A temperatura inicial da amostra, considerada nas simulações é de 25°C , assim como a temperatura do ar.

Os tempos de interação dos pulsos *laser* e o tempo de “descanso” entre um pulso e outro sofreram variação durante as simulações para possibilitar uma análise da sua influência sobre o resultado final. As simulações foram realizadas adotando-se uma quantidade padrão de 10 pulsos sucessivos. Cada pulso corresponde à irradiação de *laser* sobre um determinado ponto do anel. O intervalo entre um pulso e outro tem a duração equivalente ao tempo gasto para se contornar o anel até o retorno do feixe ao ponto que sofre a irradiação. Estes tempos variam de acordo com o tamanho do diâmetro do feixe e da

velocidade de varredura do feixe. O diâmetro do anel foi fixado com um valor de 9 mm para todos os cenários simulados neste capítulo.

5.2 – Preparação dos Cenários

Este item apresenta a maneira como as simulações foram organizadas e realizadas, além de todos os valores utilizados nos cenários.

Configuração-Padrão adotada para alguns parâmetros:

- Quantidade de Pulsos = 10
- Raio do Anel = 9 mm
- Proporção-padrão da Composição = 100 : 14 : 7 partes (Tabela 3.4)

A Tabela 5.1 resume os valores das propriedades físicas dos materiais presentes na amostra padrão (Tabela 3.4):

Tabela 5.1 – Propriedades físicas padrão utilizadas nas simulações dos Grupos 1, 2 e 3

Propriedades Físicas	Composição Padrão	Camada de Ar	Profundidade de Absorção Óptica δ (μm)
Condutividade Térmica (W/mK)	0,0427	0,026	60
Densidade (Kg/m ³)	2799	1,16	
Calor específico(J/KgK)	1383	1007	

Os cenários de simulação foram organizados no seguinte formato:

Algarismo/Letra-Algarismo Romano

- Algarismos: representam o Diâmetro do Feixe *Laser* (d):
 - 1 $\rightarrow d = 0,6 \text{ mm}$
 - 2 $\rightarrow d = 0,8 \text{ mm}$
 - 3 $\rightarrow d = 1,0 \text{ mm}$
 - 4 $\rightarrow d = 1,2 \text{ mm}$

- Letras: representam a Velocidade de Varredura (v):
 - $A \rightarrow v = 1,60 \text{ m/s}$
 - $B \rightarrow v = 2,39 \text{ m/s}$
- Algarismos Romanos: representam a Potência do *Laser* (P):
 - $I \rightarrow P = 20W$
 - $II \rightarrow P = 10W$
 - $III \rightarrow P = 30W$

Os cenários de simulação foram organizados em 4 grupos:

GRUPO 1: Casos 1A-I, 1B-I, 2A-I, 2B-I, 3A-I, 3B-I, 4A-I, 4B-I

- Potência do *Laser* = 20 W
- Profundidade de Absorção Óptica $\delta = 60 \mu\text{m}$

A Tabela 5.2 apresenta os valores dos casos simulados do Grupo 1.

Tabela 5. 2 – Valores para os parâmetros do Grupo 1

CASOS	1A-I	1B-I	2A-I	2B-I	3A-I	3B-I	4A-I	4B-I
Diâmetro (mm)	0,6		0,8		1,0		1,2	
Velocidade (m/s)	1,60	2,39	1,60	2,39	1,60	2,39	1,60	2,39
Dwell-Time* (μs)	375	251	503	334	625	418	750	502
Intervalo** (ms)	34,95	23,30	34,84	23,31	34,7	23,23	34,59	23,15
Volume*** x (10⁻¹¹) (m³)	1,70		3,02		4,71		6,78	
Calor Gerado**** x (10¹¹) (W/m³)	11,79		6,63		4,24		2,94	

* Dwell-Time τ_d (Equação 4.8)

** Intervalo $T = \text{Tempo de contorno do Anel} - \tau_d$ (Tempo de contorno do Anel: $T = 2\pi R / v$)

*** Volume irradiado pelo *laser* (Equação 4.9)

**** Calor Gerado (Equação 4.10)

GRUPO 2: Casos 2A-II, 2B-II e 3A-II

- Potência do *Laser* = 10 W
- Profundidade de Absorção Óptica $\delta = 60 \mu\text{m}$

Os Casos 2A-II, 2B-II e 3A-II são equivalentes, respectivamente, aos Casos 2A-I, 2B-I e 3A-I, alterando-se apenas o valor do Calor Gerado, em função da nova potência de 10W.

A Tabela 5.3 apresenta os valores dos casos simulados do Grupo 2.

Tabela 5. 3 – Valores para os parâmetros do Grupo 2

CASOS	2A-II	2B-II	3A-II
Diâmetro (mm)	<i>0,8</i>		<i>1,0</i>
Velocidade (m/s)	<i>1,60</i>	<i>2,39</i>	<i>1,60</i>
Dwell-Time (μs)	<i>503</i>	<i>334</i>	<i>625</i>
Intervalo (ms)	<i>34,84</i>	<i>23,31</i>	<i>34,7</i>
Volume x (10^{-11}) (m^3)	<i>3,02</i>		<i>4,71</i>
Calor Gerado x (10^{11}) (W/m^3)	<i>3,31</i>		<i>2,12</i>

GRUPO 3: Casos 2A-III, 2B-III, 3A-III

- Potência do *Laser* = 30 W
- Profundidade de Absorção Óptica $\delta = 60 \mu\text{m}$

Os Casos 2A-III, 2B-III, 3A-III são equivalentes, respectivamente, aos Casos 2A-II, 2B-II, 3A-II, alterando-se apenas o valor do Calor Gerado, em função da nova potência de 30W.

A Tabela 5.4 apresenta os valores dos casos simulados do Grupo 3.

Tabela 5. 4 – Valores para os parâmetros do Grupo 3

CASOS	2A-III	2B-III	3A-III
Diâmetro (mm)	0,8		1,0
Velocidade (m/s)	1,60	2,39	1,60
Dwell-Time* (µs)	503	334	625
Intervalo** (ms)	34,84	23,31	34,7
Volume*** x (10⁻¹¹) (m³)	3,02		4,71
Calor Gerado**** x (10¹¹) (W/m³)	3,31		2,12

GRUPO 4: Casos S0, S12, S35, S54, S70, S90, S110, S125, S140.

Os detalhes e parâmetros analisados em cada caso são descritos a seguir:

- Potência do *Laser* = 20 W
- Proporção da Composição = Variável para cada caso
- Profundidade de Absorção Óptica δ = Variável para cada caso

As Proporções das Composições, ou seja, a quantidade sílica na amostra, são alteradas em cada caso do Grupo 4, provocando naturalmente também a variação da Profundidade de Absorção Óptica..

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os valores dos casos simulados do Grupo 4.

Tabela 5. 5 – Valores para os parâmetros (S0, S12, S35, S54, S70) do Grupo 4

CASOS	Quantidade de SÍLICA na Amostra				
	S0	S12	S35	S54	S70
Proporção*	100:14:0	100:14:1,2	100:14:3,5	100:14:5,4	100:14:7
Diâmetro (mm)	0,8				
Velocidade (m/s)	1,60				
Dwell-Time* (µs)	503				
Intervalo** (ms)	35				
Profundidade de Absorção δ (µm)	353	246	85	71	60
Volume*** x (10 ⁻¹¹) (m ³)	18	12,36	4,27	3,56	3,02
Calor Gerado**** x (10 ¹¹) (W/m ³)	1,11	1,62	4,68	5,62	6,63

* Proporção de Sílica na Composição (Resina Epóxi : Dietilenotriamina : Sílica)

Tabela 5. 6 – Valores para os parâmetros (S90, S110, S125, S140) do Grupo 4

CASOS	Quantidade de SÍLICA na Amostra			
	S90	S110	S125	S140
Proporção*	100:14:9	100:14:11	100:14:12,5	100:14:14
Diâmetro (mm)	0,8			
Velocidade (m/s)	1,60			
Dwell-Time* (µs)	503			
Intervalo** (ms)	35			
Profundidade de Absorção δ (µm)	46	40	39	38
Volume*** x (10 ⁻¹¹) (m ³)	2,31	2,01	1,96	1,91
Calor Gerado**** x (10 ¹¹) (W/m ³)	8,66	9,95	10,20	10,47

* Proporção de Sílica na Composição (Resina Epóxi : Dietilenotriamina : Sílica)

A Tabela 5.7 mostra para todas as variações da quantidade de Sílica na amostra os respectivos valores para as suas propriedades termofísicas.

Tabela 5.7 – Propriedades físicas dos materiais utilizadas nas simulações do Grupo 4.

Propriedades Físicas	Unidades	Amostras								
		S0	S12	S35	S54	S70	S90	S110	S125	S140
Condutividade Térmica	W/mK	0,0359	0,0372	0,0395	0,0413	0,0427	0,0446	0,0463	0,0476	0,0488
Densidade	Kg/m ³	1155	1453	2005	2443	2800	3231	3647	3949	4243
Calor Especifico	J/KgK	1410	1405	1396	1389	1383	1377	1370	1365	1360

5.3 – Apresentação e Discussão dos Resultados

5.3.1 – Estudo do Efeito da Variação do Diâmetro do Feixe *Laser*

Para o estudo da variação do diâmetro d do feixe *laser*, os cenários foram simulados com os valores da Tabela 5.2:

O valor $d = 0,8$ mm é o referente ao diâmetro do feixe *laser* na distância focal da lente, nos experimentos realizados por JARDINI (2001). Os demais valores adotados para o diâmetro são variações próximas ao diâmetro padrão para efeitos de comparação e avaliação da influência deste parâmetro sobre o processo.

Cenários Analisados: 1A-I, 2A-I, 3A-I e 4A-I

A Velocidade de Varredura do *laser* nestes casos é $v = 1,60$ m/s.

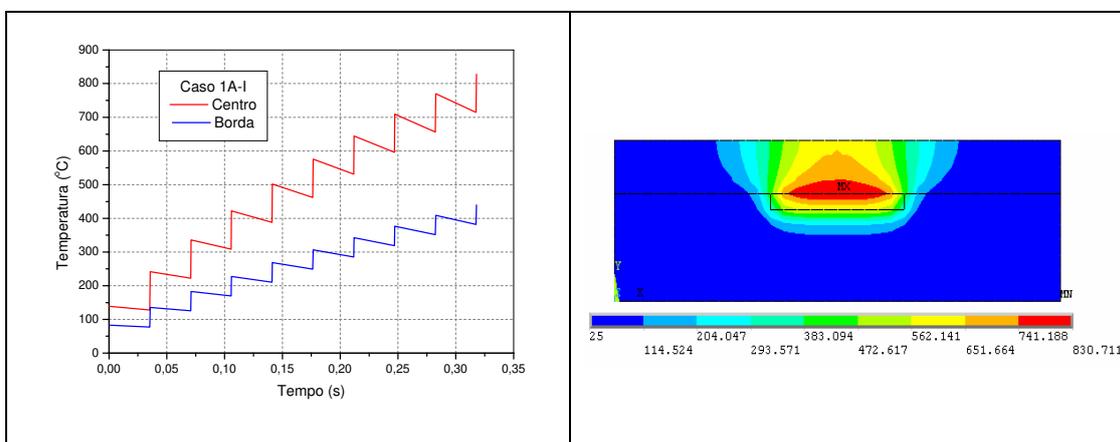


Figura 5. 4 – Caso 1A-I ($d=0,6$ mm)

Figura 5. 5 – Perfil Espacial da Temperatura 1A-I

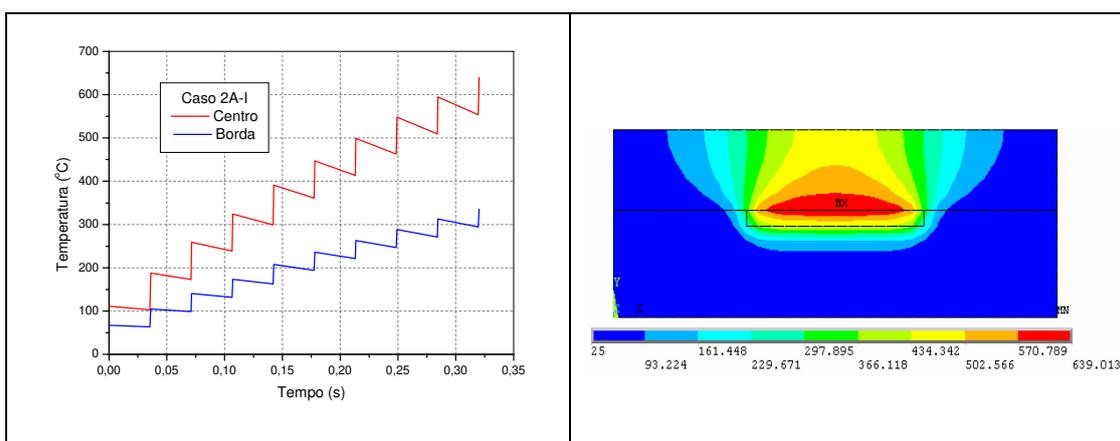


Figura 5. 6 – Caso 2A-I ($d=0,8$ mm)

Figura 5. 7 – Perfil Espacial da Temperatura 2A-I

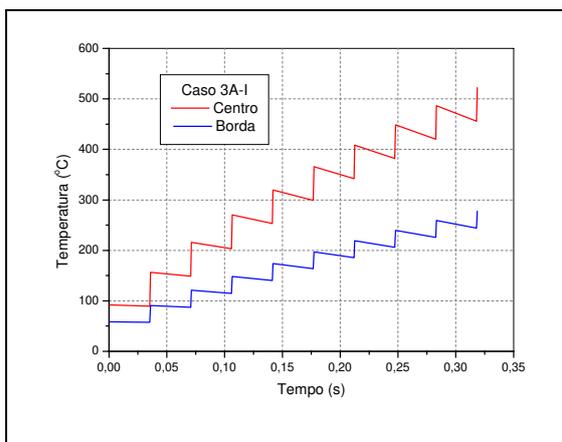


Figura 5. 8 – Caso 3A-I ($d=1,0\text{mm}$)

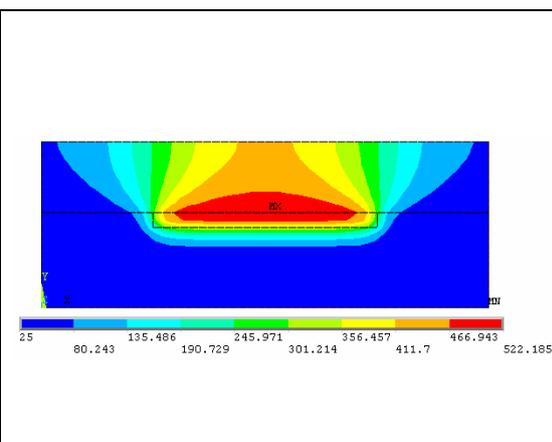


Figura 5. 9 – Perfil Espacial da Temperatura 3A-I

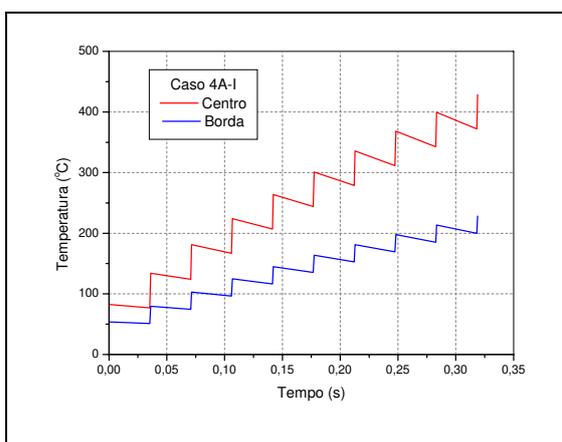


Figura 5. 10 – Caso 4A-I ($d=1,2\text{ mm}$)

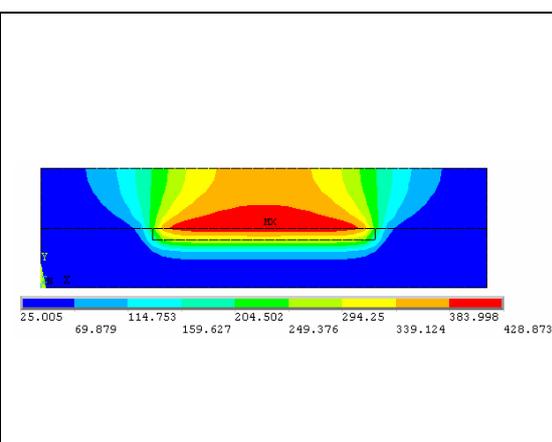


Figura 5. 11 – Perfil Espacial da Temperatura 4A-I

A Tabela 5.8 apresenta as temperaturas finais, no último pulso, no centro e borda para os casos analisados.

Tabela 5. 8 – Temperaturas finais para os casos 1A-I, 2A-I, 3A-I, 4A-I

Caso	Variável analisada Diâmetro (mm)	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
1A-I	0,6	827,8	439,6	388,2
2A-I	0,8	639,0	335,7	303,3
3A-I	1	522,2	277,4	244,8
4A-I	1,2	428,7	228,4	200,3

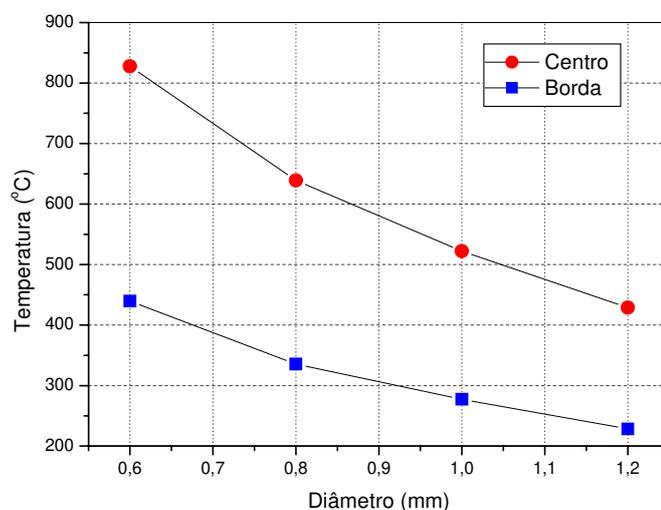


Figura 5. 12 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 1A-I, 2A-I, 3A-I e 4A-I

Pelos resultados apresentados na Figura 5.12, pode-se perceber que, na medida em que se aumenta o diâmetro, as temperaturas no centro e na borda da amostra diminuem. Em sentido contrário, para cada 0,2 mm de redução do diâmetro, existe um aumento das temperaturas em uma razão de 1,2 vezes, ou seja, um aumento linear da temperatura em 20% de um caso para outro. A razão entre as temperaturas de centro e de borda, para cada caso, também é linear em um valor médio de 1,88 vezes.

Outra observação interessante é que, ao se aumentar o diâmetro, a diferença de temperatura entre centro e borda diminui gradativamente. O aumento do diâmetro implica em uma distância maior para o espalhamento da energia irradiada, o que se traduz em temperaturas menores nas bordas, resultando em diferenças de temperatura menores entre centro e borda.

Cenários Analisados: 1B-I, 2B-I, 3B-I e 4B-I

A Velocidade de Varredura do *laser* nestes casos é $v = 2,39$ m/s.

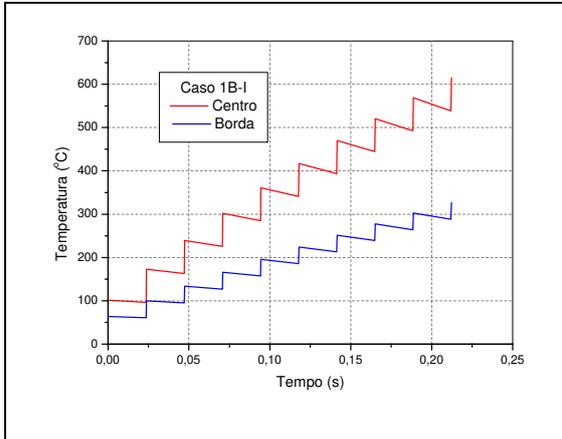


Figura 5.13 – Caso 1B-I ($d=0,6$ mm)

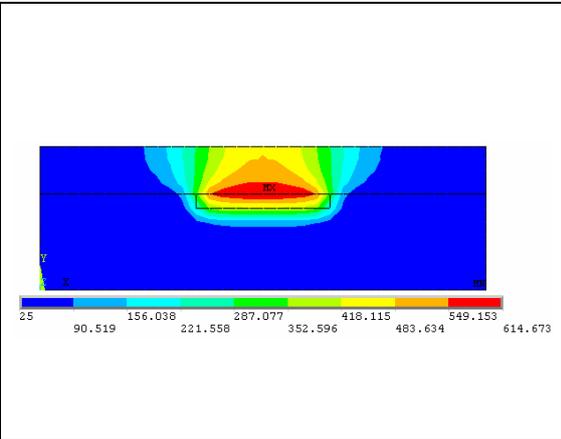


Figura 5.14 – Perfil Espacial da Temperatura 1B-I

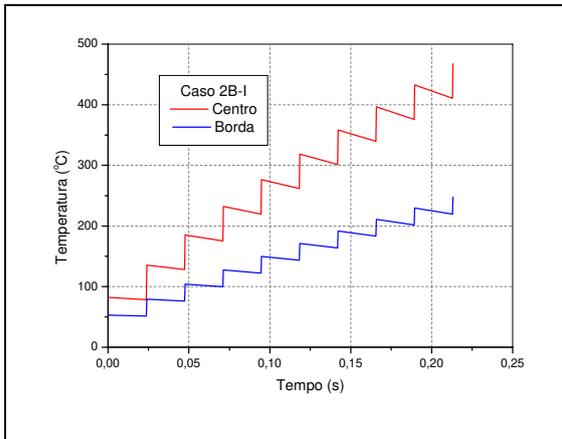


Figura 5.15 – Caso 2B-I ($d=0,8$ mm)

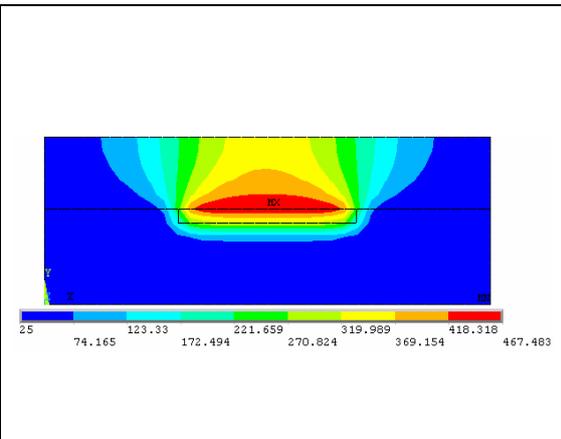


Figura 5.16 – Perfil Espacial da Temperatura 2B-I

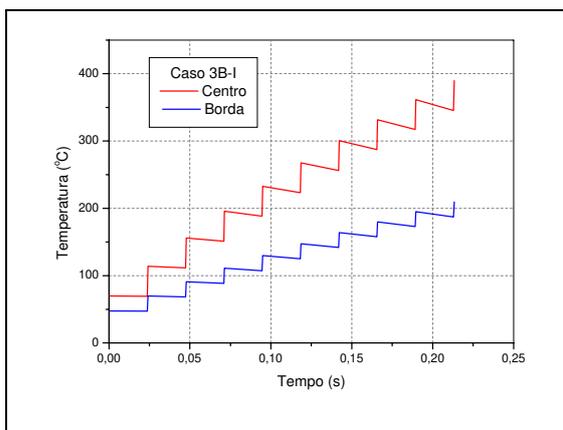


Figura 5.17 – Caso 3B-I ($d=1,0$ mm)

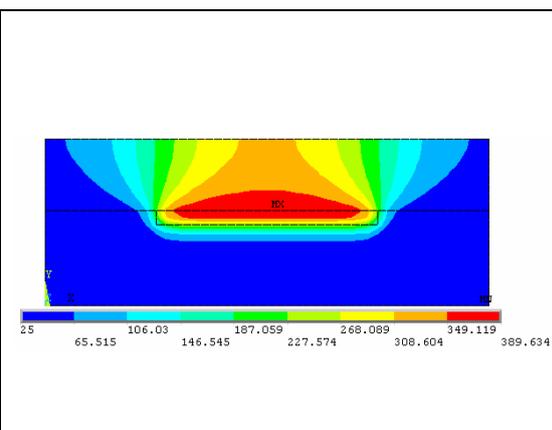


Figura 5.18 – Perfil Espacial da Temperatura 3B-I

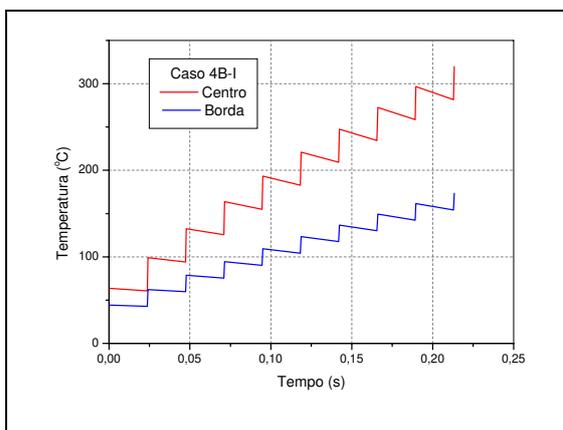


Figura 5.19 – Caso 4B-I ($d=1,2$ mm)

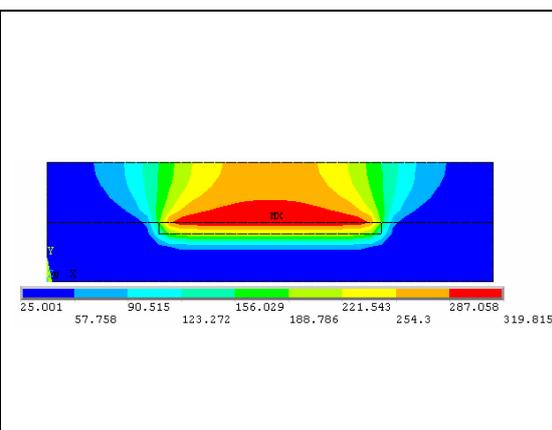


Figura 5.20 – Perfil Espacial da Temperatura 4B-I

A Tabela 5.9 apresenta as respectivas temperaturas finais, de centro e borda, dos casos analisados.

Tabela 5.9 – Temperaturas finais para os casos 1B-I, 2B-I, 3B-I, 4B-I

Caso	Variável analisada	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
1B-I	<i>0,6</i>	<i>614,7</i>	<i>326,5</i>	<i>288,2</i>
2B-I	<i>0,8</i>	<i>467,5</i>	<i>247,5</i>	<i>220,0</i>
3B-I	<i>1</i>	<i>389,6</i>	<i>209,5</i>	<i>180,1</i>
4B-I	<i>1,2</i>	<i>319,7</i>	<i>173,2</i>	<i>146,5</i>

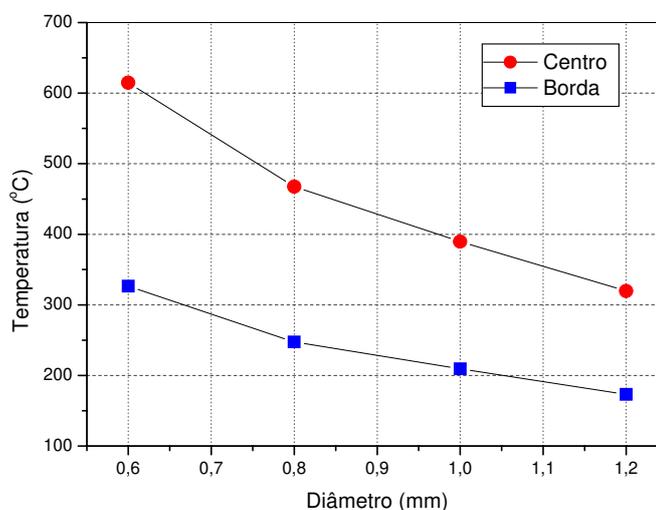


Figura 5. 21 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 1B-I, 2B-I, 3B-I e 4B-I.

Pelos resultados apresentados na Tabela 5.9, pode-se perceber, da mesma forma que nos casos anteriores (1A-I, 2A-I, 3A-I e 4A-I) que, à medida que o diâmetro é aumentado, as temperaturas no centro e na borda da amostra diminuem. Em contrapartida a esta afirmação, para cada 0,2 mm de redução do diâmetro, existe um aumento médio das temperaturas de um caso para outro, em média de 25%, valor pouco acima daquele obtido para o centro da amostra.

À medida que se aumenta a velocidade do feixe, diminui-se a diferença de temperatura entre a borda e o centro.

Estes resultados, mostrados nas Tabelas 5.8 e 5.9, vêm sugerir que um diâmetro muito pequeno do feixe *laser* pode vir a ser prejudicial para a “integridade física” da amostra, isto é, a possibilidade de degradação do material é maior. Um diâmetro muito grande, por outro lado, gera um volume de irradiação maior e o espalhamento da energia do *laser* e, conseqüente, redução da temperatura ao longo do volume, pode ser insuficiente para curar uniformemente as regiões mais periféricas na amostra. Nota-se que, ao se aumentar o diâmetro, a diferença de temperatura entre centro e borda diminui.

Outro fator importante a se abordar é a duração de cada pulso. Embora, por exemplo, para o Caso 1A-I, a temperatura final (último pulso) no centro, seja de, aproximadamente, 830 °C é incerto afirmar, pela simulação, que a amostra se degrada. O pulso anterior, para se atingir este pico de temperatura, tem duração de 35,33 ms. Deste tempo, 34,95 ms equivalem a um resfriamento, enquanto que 0,38 ms correspondem ao aquecimento. O tempo de irradiação é, portanto, cerca de 100 vezes menor que o de resfriamento, o que pode garantir a integridade do material. Além do fato de a temperatura de degradação da amostra ser aproximadamente de 277°C, obtida por medição pelo processo gravimétrico (SCARPARO *et al.*, 1996).

5.3.2 – Estudo do Efeito da Variação da Velocidade de Varredura do Feixe *Laser*

Para o estudo da variação da Velocidade de Varredura v do feixe *laser*, os cenários foram simulados com os seguintes valores:

- $v = 1,60$ m/s
- $v = 2,39$ m/s

Cenários Analisados: 1A-I e 1B-I

O Diâmetro do Feixe *laser* nos Casos 1A-I e 1B-I é $d = 0,6$ mm.

Os cenários 1A-I e 1B-I podem ser visualizados nas figuras 5.4 e 5.5, e 5.13 e 5.14.

Tabela 5. 10 – Temperaturas finais para os casos 1A-I e 1B-I

Caso	Variável analisada	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
1A-I	<i>1,60</i>	<i>827,8</i>	<i>439,6</i>	<i>388,2</i>
1B-I	<i>2,39</i>	<i>614,7</i>	<i>326,5</i>	<i>288,2</i>

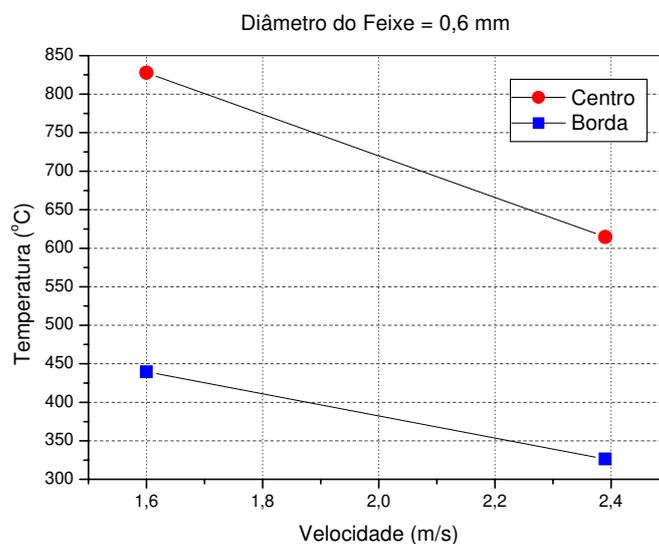


Figura 5. 22 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 1A-I e 1B-I

No Caso 1A-I, no 1º pulso, a diferença de temperatura entre o centro e a borda é de aproximadamente 56 °C, enquanto que, no 10º e último pulso, a diferença passa a ser de 213 °C.

No Caso 1B-I, 1º pulso, a diferença de temperatura entre centro e borda é de 37 °C. Para o último pulso, a diferença aumenta para 113 °C.

Para os Casos 1A-I e 1B-I, cujo diâmetro do *laser* é igual a 0,6mm, a variação da velocidade de varredura, de 1,60 m/s para 2,39 m/s, ou seja, um fator multiplicativo de 1,5x ocasiona uma redução, tanto no centro quanto na borda, de 25,7% do Caso 1A-I para o Caso 1B-I, para o 10º pulso.

A temperatura no centro, para o 10º pulso no Caso 1A-I, foi a maior temperatura registrada nas simulações do Grupo 1. A amostra parte da temperatura ambiente (25 °C) e atinge 827,8 °C, após 10 pulsos. Após cada pulso, há um resfriamento natural da amostra durante o intervalo do percurso do anel. Embora este seja um valor de temperatura possivelmente degradante ao material, uma vez que a resina se cura na faixa de 80 a 100°C,

todos os 10 pulsos ocorrem em um período pouco superior a 35 ms, o que, por outro lado, pode ser um fator que protege o material da degradação. O fato real só pode ser efetivamente constatado com experimentos em laboratório.

Cenários Analisados: 2A-I e 2B-I

O Diâmetro do Feixe *laser* nos Casos 2A-I e 2B-I é $d = 0,8$ mm.

Os cenários 2A-I e 2B-I podem ser visualizados nas figuras 5.6 e 5.7, e 5.15 e 5.16.

Tabela 5. 11 – Temperaturas finais para os casos 2A-I e 2B-I

Caso	Variável analisada	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
2A-I	1,60	639,0	335,7	303,3
2B-I	2,39	467,5	247,5	220,0

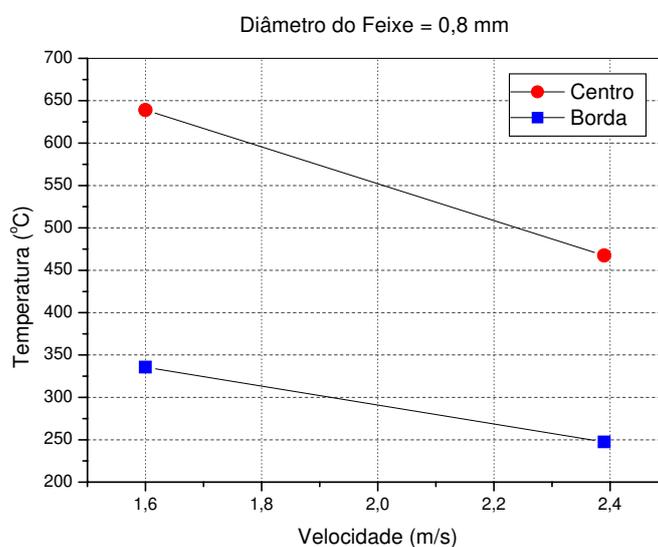


Figura 5. 23 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 2A-I e 2B-I

Nos casos 2A-I e 2B-I, os diâmetros do feixe foram fixados em 0,8 mm, e foram variadas as suas velocidades de varredura. Para o 1º pulso do Caso 2A-I, a diferença aproximada de temperatura entre o centro e a borda é de 44 °C. Para o último pulso, esta

diferença é de 303°C. A simulação do Caso 2B-I apresentou, para o 1º pulso, 29°C de diferença das temperaturas de centro e borda. Já no 10º pulso, este valor sobe para 220°C.

A variação da velocidade de varredura do feixe entre os casos 2A-I e 2B-I, ao final de 10 pulsos, resulta para o centro e borda, em um decréscimo médio de 26,5% em suas temperaturas.

Cenários Analisados: 3A-I e 3B-I

O Diâmetro do Feixe *laser* nos Casos 3A-I e 3B-I é $d = 1,0$ mm.

Os cenários 3A-I e 3B-I podem ser visualizados nas figuras 5.8 e 5.9, e 5.17 e 5.18.

Tabela 5. 12 – Temperaturas finais para os casos 3A-I e 3B-I

Caso	Variável analisada	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
3A-I	1,60	522,2	277,4	244,8
3B-I	2,39	389,6	209,5	180,1

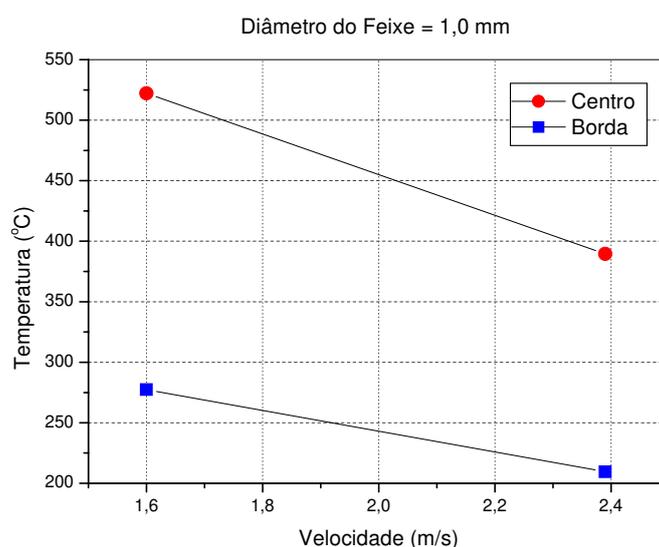


Figura 5. 24 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 3A-I e 3B-I

Com temperaturas ainda menores do que nos casos anteriores, os casos 3A-I e 3B-I, com diâmetros de 1,0 mm, apresentam após a variação da velocidade de varredura e de 10 pulsos, uma redução percentual de 25,39% para o centro e de 24,47% para a borda.

O 1º pulso gerou temperaturas de 92 °C no centro da amostra e 59 °C – uma diferença de 33 °C, para o Caso 3A-I. Para o Caso 3B-I, a temperatura inicial no centro foi de 70 °C, e 47 °C para a borda, uma diferença centro-borda no primeiro pulso de 23 °C.

Cenários Analisados: 4A-I e 4B-I

O Diâmetro do Feixe *laser* nos Casos 4A-I e 4B-I é $d = 1,2$ mm.

Os cenários 4A-I e 4B-I podem ser visualizados nas figuras 5.10 e 5.11, 5.19 e 5.20.

Tabela 5. 13 – Temperaturas finais para os casos 4A-I e 4B-I

Caso	Variável analisada	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
4A-I	1,60	428,7	228,4	200,3
4B-I	2,39	319,7	173,2	146,5

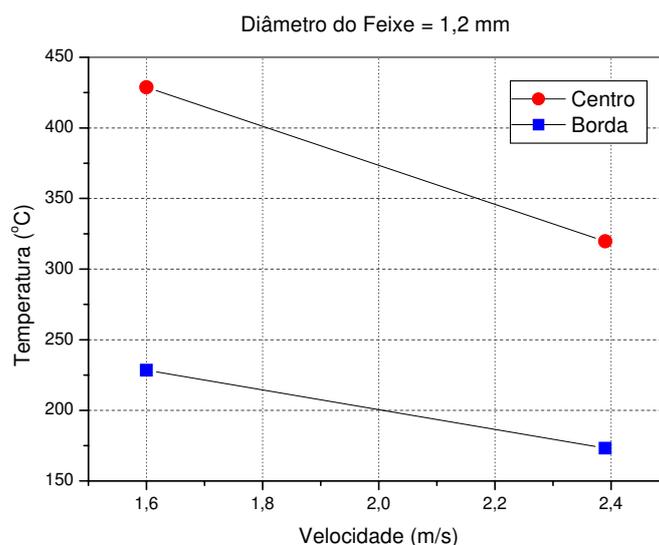


Figura 5. 25 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 4A-I e 4B-I

Para um diâmetro do feixe de 1,2 mm, casos 4A-I e 4B-I, as temperaturas decresceram ainda mais. Enquanto que, para o Caso 2A-I relativo ao diâmetro padrão (0,8mm), após 10 pulsos, a temperatura no centro foi de 639 °C, para o Caso 4A-I, com mesma velocidade de varredura, a temperatura ficou em torno de 429 °C. Seguindo o mesmo raciocínio, o Caso 2B-I apresentou 468 °C enquanto que, o Caso 4B-I, a temperatura no centro da amostra chegou a 320 °C.

Portanto, para um aumento de diâmetro de 0,4mm, e velocidade de 1,60m/s, a temperatura de centro reduziu-se quase 33% e, para a velocidade de 2,39m/s, esta diferença do diâmetro resultou em queda de aproximadamente 32%.

O que se constata no aumento do diâmetro do feixe é uma diminuição da temperatura, em uma faixa de 20 a 25%, a cada 0,2mm variados, seja para o centro da amostra, seja para a sua borda. Ou seja, aumentando-se o diâmetro, ocorre a redução da temperatura na amostra. Ao se aumentar o diâmetro, aumenta-se, por consequência, o volume atingido pelo *laser*, como a potência é a mesma em todos estes casos analisados (20W), o calor transferido pela energia depositada pelo *laser* espalha-se por uma região maior, à medida que o diâmetro do feixe é aumentado, resultando em temperaturas menores.

5.3.3 – Estudo do Efeito da Variação de Potência do *Laser*

Para o estudo da variação da Potência P do feixe *laser*, os cenários foram simulados com os seguintes valores:

- P = 20 W
- P = 10 W
- P = 30 W

Cenários Analisados : 2A-I, 2A-II e 2A-III

O Diâmetro do Feixe *laser* nos casos 2A-I, 2A-II e 2A-III é $d = 0,8$ mm.

A Velocidade de Varredura $v = 1,60$ m/s

O cenário 2A-I pode ser visualizado nas figuras 5.6 e 5.7.

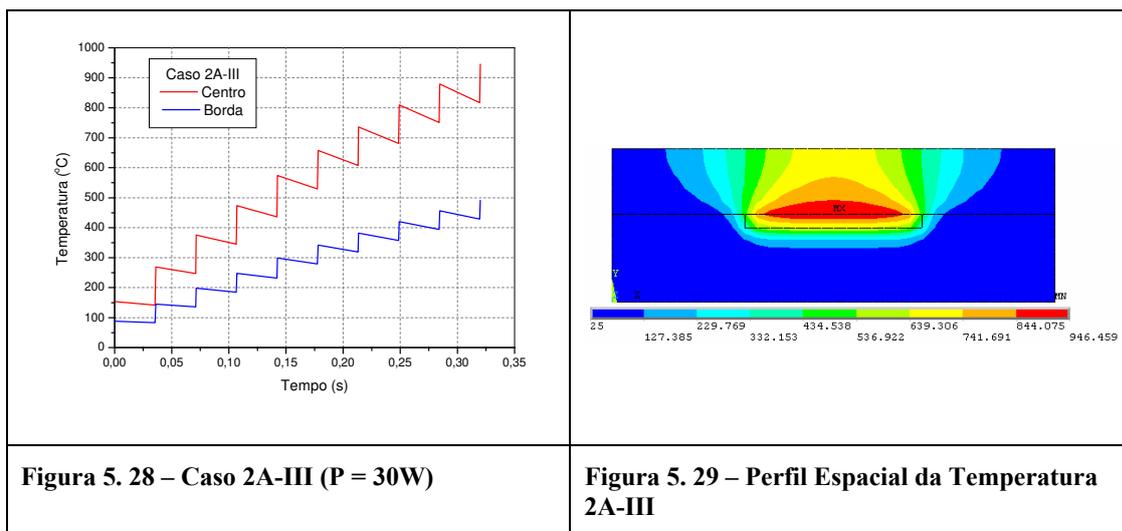
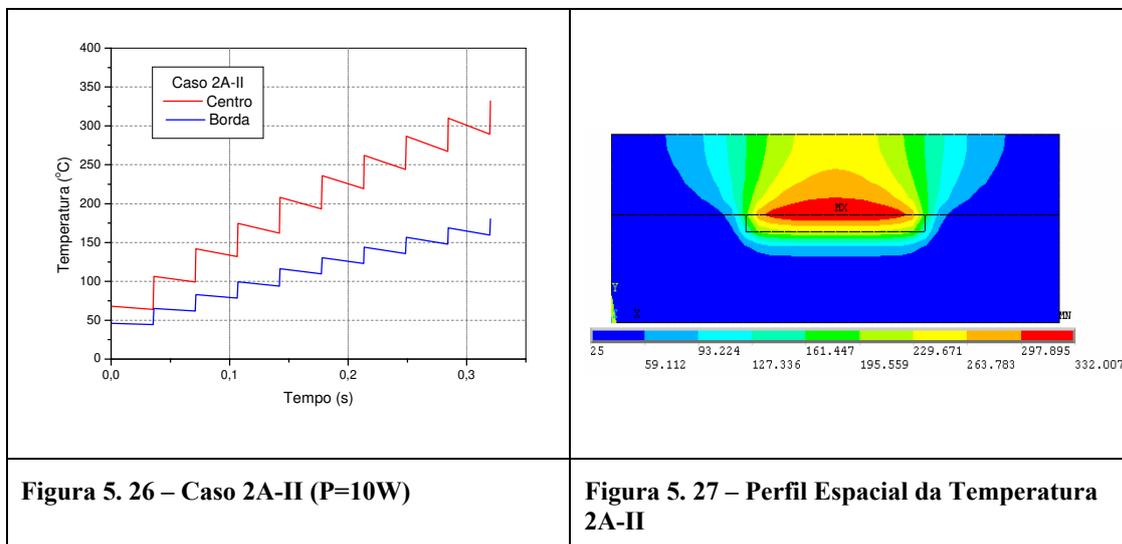


Tabela 5. 14 – Temperaturas finais para os casos 2A-I, 2A-II e 2A-III

Caso	Variável analisada	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
2A-I	Potência (W)	639,0	335,7	303,3
2A-II	10	332,0	180,3	151,7
2A-III	30	945,5	491,3	454,2

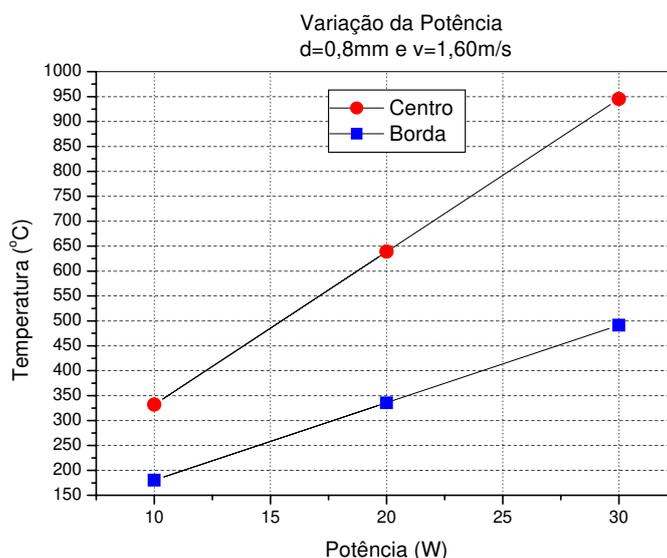


Figura 5. 30 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 2A-I, 2A-II e 2A-III

Entre os casos 2A-I, 2A-II e 2A-III, a única diferença é a potência imposta ao *laser*, com respectivos valores de 20W, 10W e 30W.

O 1º pulso nos três casos gera, para o Caso 2A-I, uma temperatura central de 111°C, para o Caso 2A-II, 68°C e, para o Caso 2A-III, 153°C. Em relação à região periférica atingida pelo feixe, no Caso 2A-I, 67°C, 46°C no Caso 2A-II e 88°C no Caso 2A-III. Observa-se que a temperatura inicial de borda gerada pelo *laser* de 10W é bastante próxima daquela central gerada pelo *laser* mais potente, de 20W.

Pela relação entre o *laser* de 20W e o *laser* menos potente (10W), observa-se que a relação entre as temperaturas finais (10º pulso) no centro, provocadas pelos dois *lasers* respectivamente é de 1,92 vezes. O *laser* mais potente (30W) apresenta temperaturas centrais no 10º pulso em uma razão de 2,85 vezes maior. Para as temperaturas de borda, a relação é de 1,86 vezes entre os *lasers* de 20W e 10W, e de 2,72 vezes entre os *lasers* de 30W e 10W. Vale ressaltar, também, que o diâmetro do *laser* nestes casos é 0,8mm e a velocidade de varredura é 1,60 m/s.

Cenários Analisados : 2B-I, 2B-II e 2B-III

O Diâmetro do Feixe *laser* nos casos 2B-I, 2B-II e 2B-III é $d = 0,8$ mm.

A Velocidade de Varredura $v = 2,39$ m/s

O cenário 2B-I pode ser visualizado nas figuras 5.15 e 5.16.

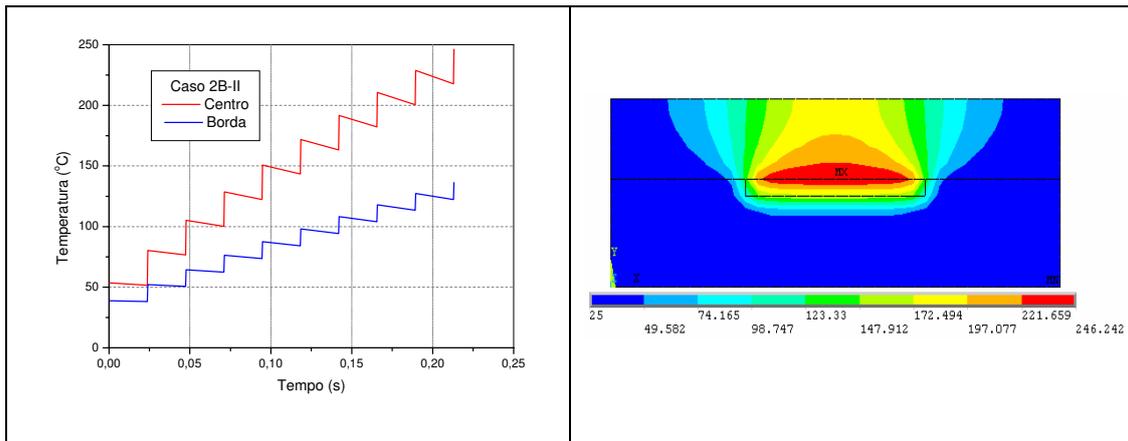


Figura 5. 31 – Caso 2B-II (P = 10W)

Figura 5. 32 – Perfil Espacial da Temperatura 2B-II

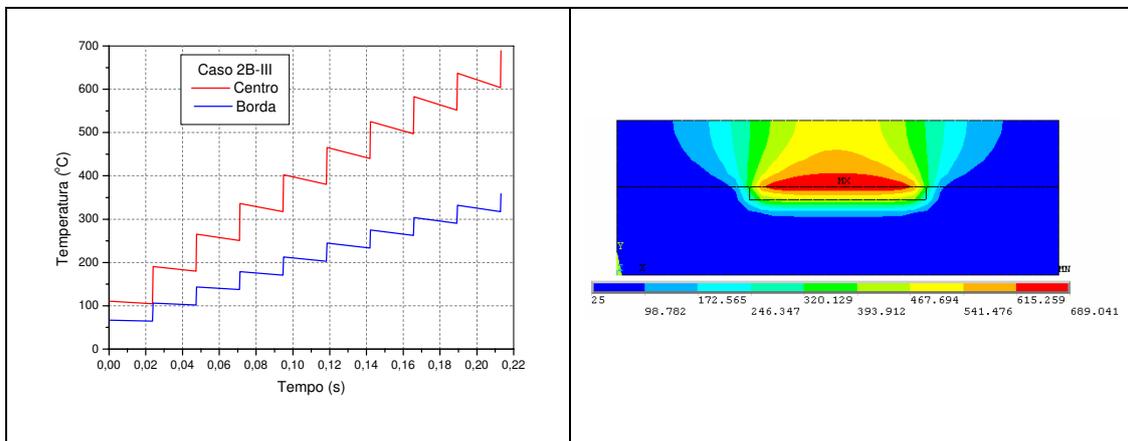


Figura 5. 33 – Caso 2B-III (P = 30W)

Figura 5. 34– Perfil Espacial da Temperatura 2B-III

Tabela 5. 15 – Temperaturas finais para os casos 2B-I, 2B-II e 2B-III

Caso	Variável analisada	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
2B-I	20	467,5	247,5	220,0
2B-II	10	246,2	136,2	110,0
2B-III	30	689,0	358,8	330,2

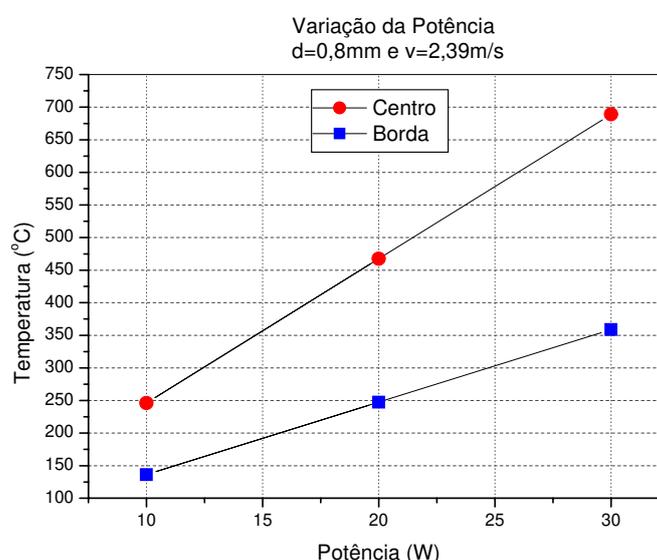


Figura 5. 35 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 2B-I, 2B-II e 2B-III

Na comparação entre os casos 2B-I, 2B-II e 2B-III, a razão entre as temperaturas centrais, para 20W, 10W e 30W, respectivamente, após os 10 pulsos é da ordem de 1,89 vezes; entre os *lasers* de 30W e 10W, a razão é de 2,80 vezes. Para a borda, a razão é 1,81 e 2,63 vezes, respectivamente.

Entre os casos 2A-I, 2A-II e 2A-III e 2B-I, 2B-II e 2B-III, os objetos de análises são, além da variação da Potência, a variação da Velocidade de Varredura. Percebe-se que com velocidade menor (1,60 m/s), maiores os patamares das temperaturas.

Cenários Analisados : 3A-I, 3A-II e 3A-III

O Diâmetro do Feixe *laser* nos casos 3A-I, 3A-II e 3A-III é $d = 1,0$ mm.

A Velocidade de Varredura $v = 1,60$ m/s

O cenário 3A-I pode ser visualizado nas figuras 5.8 e 5.9.

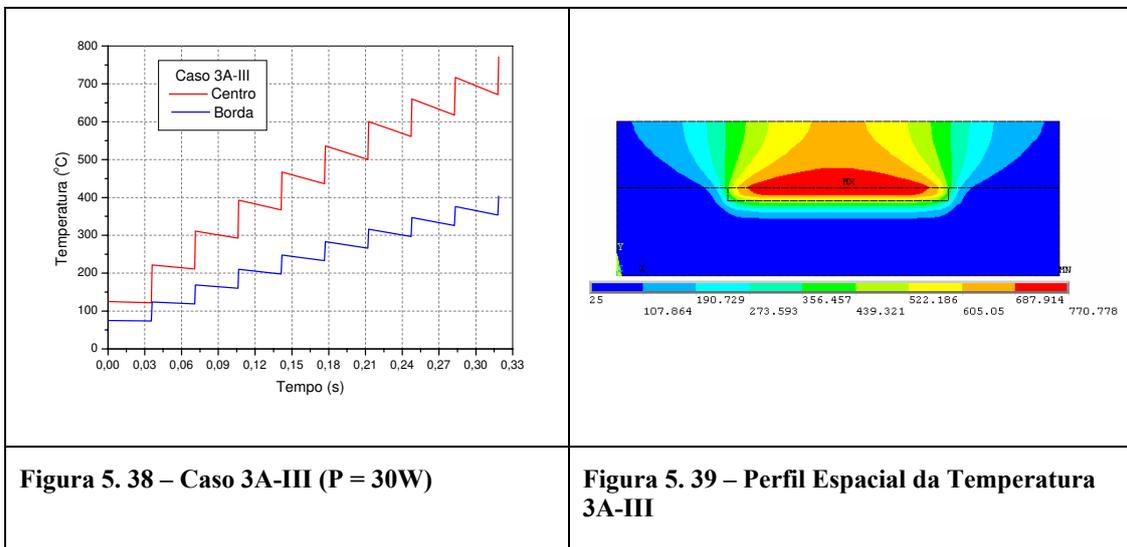
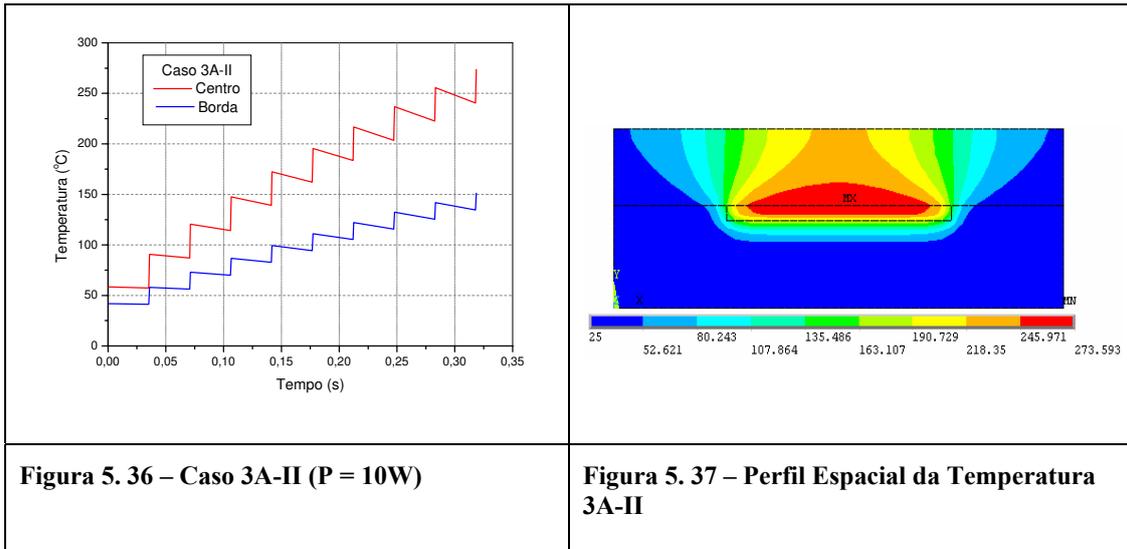


Tabela 5. 16 – Temperaturas finais para os casos 3A-I, 3A-II e 3A-III

Caso	Variável analisada Potência (W)	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
3A-I	20	522,2	277,4	244,8
3A-II	10	273,6	151,2	122,4
3A-III	30	770,8	403,6	367,2

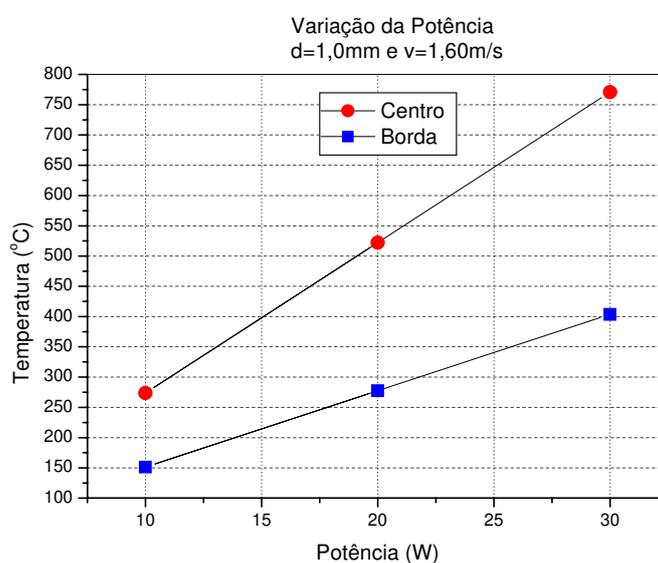


Figura 5. 40 – Temperaturas de Centro e Borda dos casos 3A-I, 3A-II e 3A-III

O resultado das simulações variando-se a Potência, com diâmetro do feixe fixado em 1,0 mm, apresenta valores de temperaturas de centro e de borda ainda maiores. A diferença entre as temperaturas de centro e de borda aumenta à medida que a Potência aumenta, no entanto, são diferenças menores do que aquelas para as variações de Potência com $d = 0,8$ mm.

5.3.5 – Estudo do Efeito da Proporção de Sílica da Composição

Casos Analisados: S0, S12, S35, S54, S70, S90, S110, S125 e S140.

Potência = 20W

Diâmetro = 0,8 mm

Velocidade de Varredura = 1,60 m/s

As Tabelas 5.5 a 5.7 apresentadas anteriormente contêm os valores adotados para os parâmetros de todos os casos.

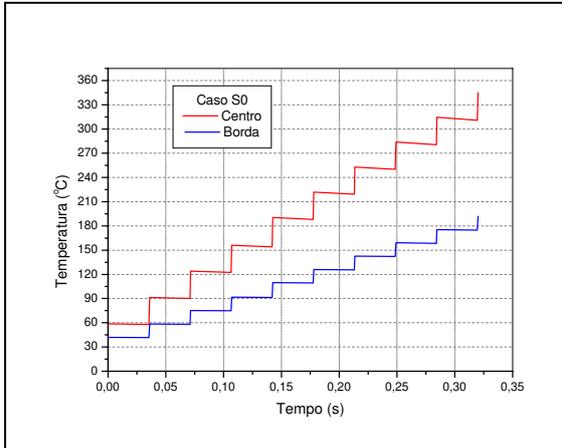


Figura 5. 41 – Caso S0

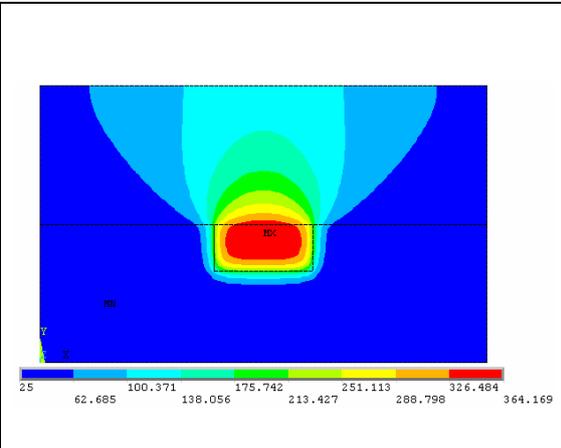


Figura 5. 42 – Perfil Espacial da Temperatura S0

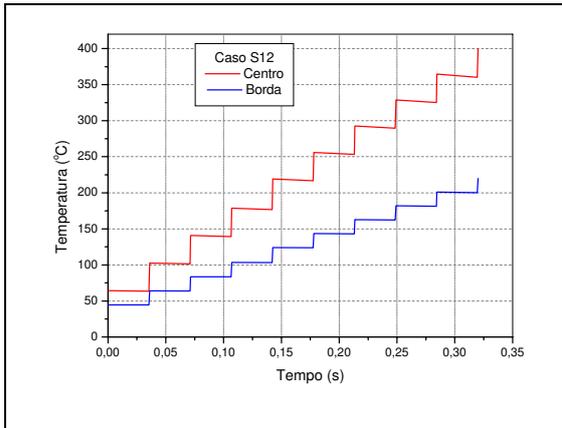


Figura 5. 43 – Caso S12

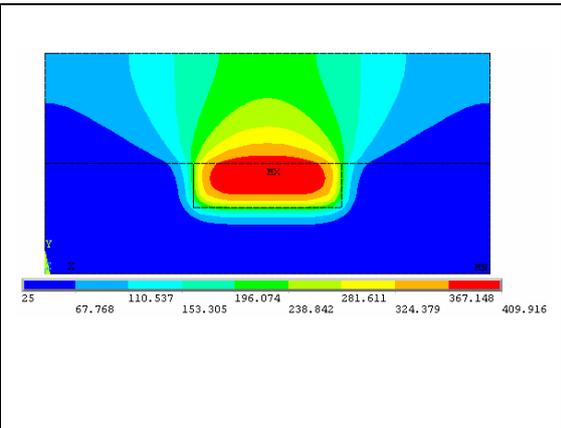


Figura 5. 44 – Perfil Espacial da Temperatura S12

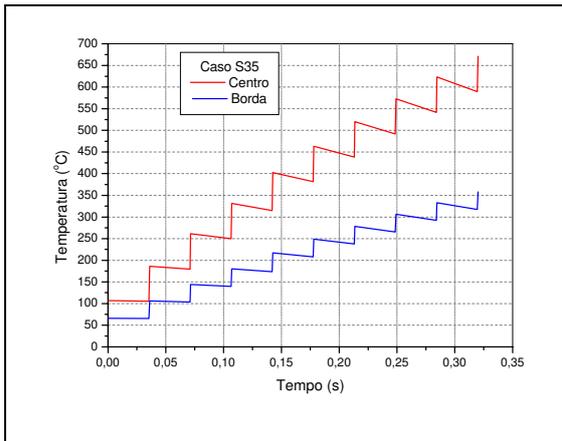


Figura 5. 45 – Caso S35

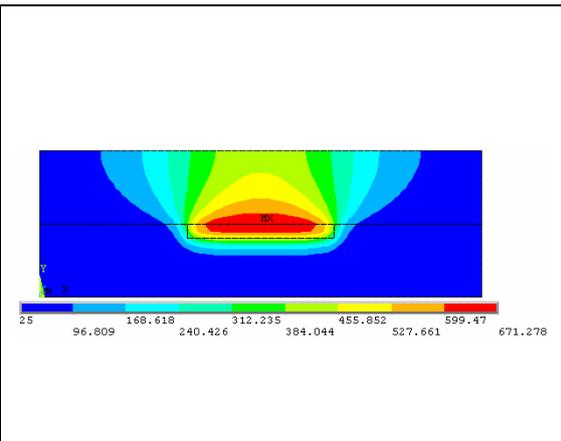


Figura 5. 46 – Perfil Espacial da Temperatura S35

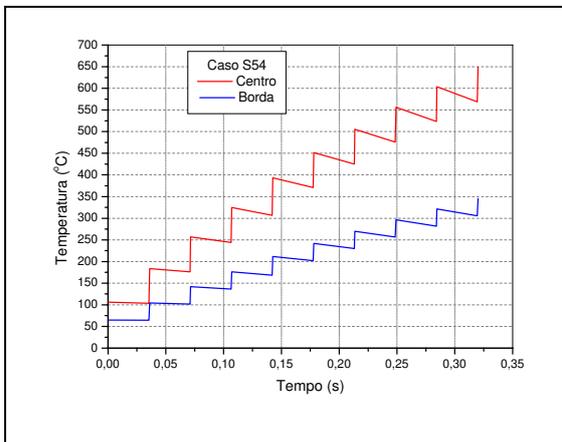


Figura 5. 47 – Caso S54

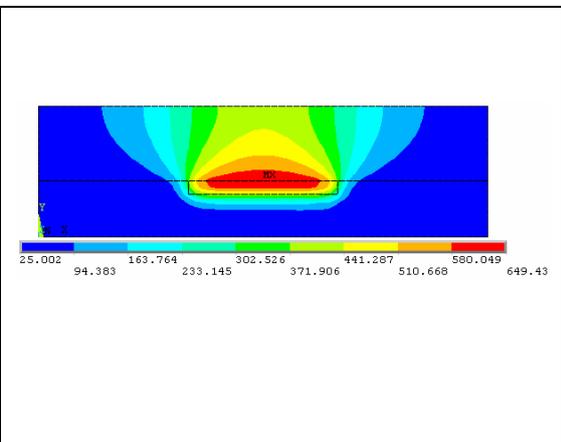


Figura 5. 48 – Perfil Espacial da Temperatura S54

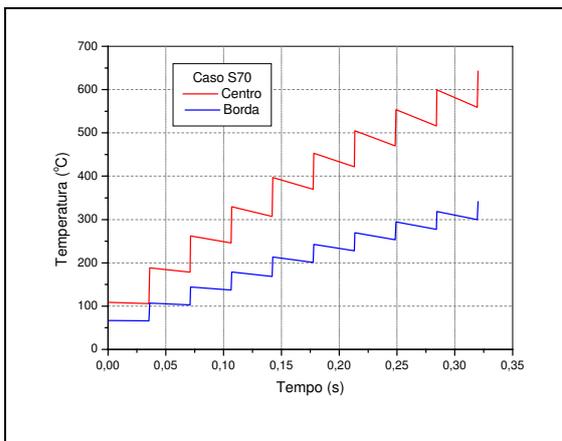


Figura 5. 49 – Caso S70

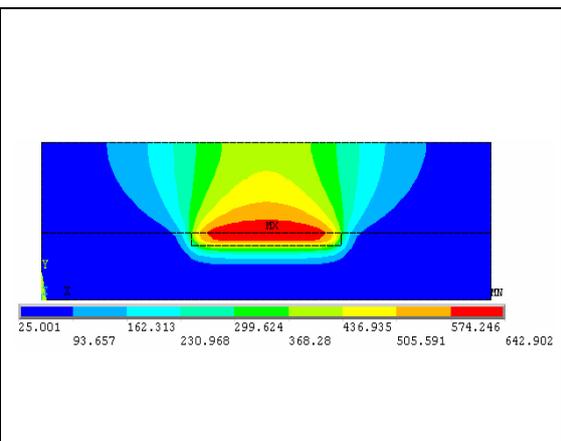


Figura 5. 50 – Perfil Espacial da Temperatura S70

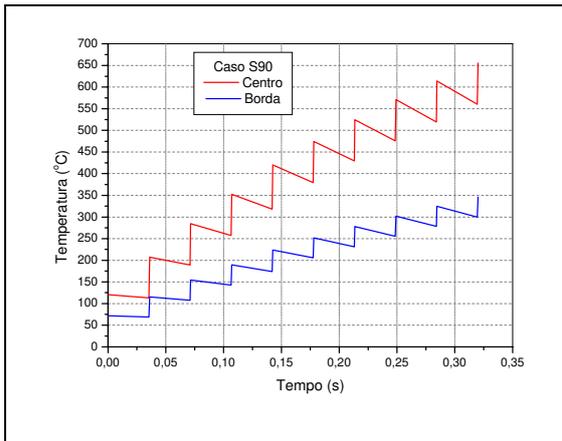


Figura 5.51 – Caso S90

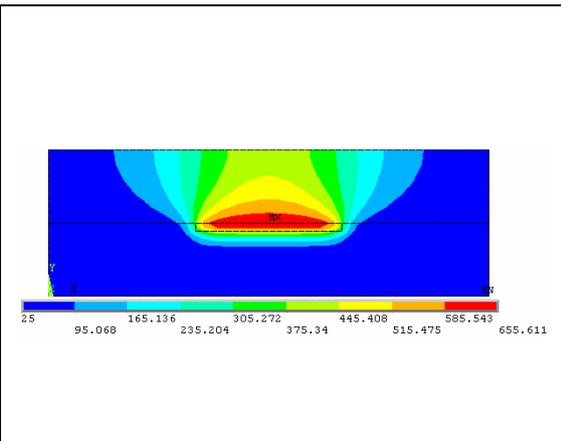


Figura 5.52 – Perfil Espacial da Temperatura S90

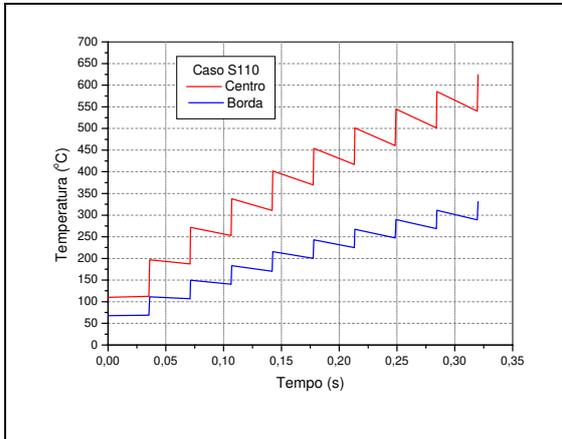


Figura 5.53 – Caso S110

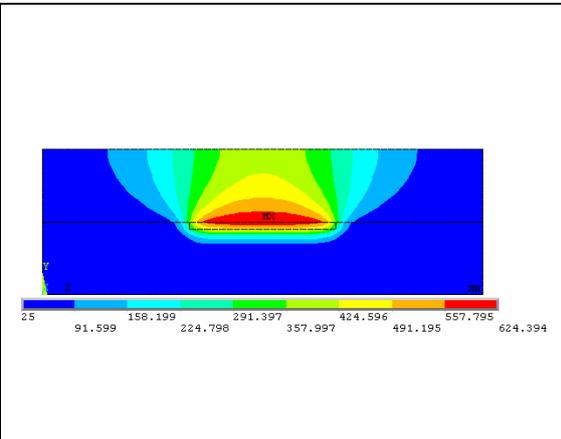


Figura 5.54 – Perfil Espacial da Temperatura S110

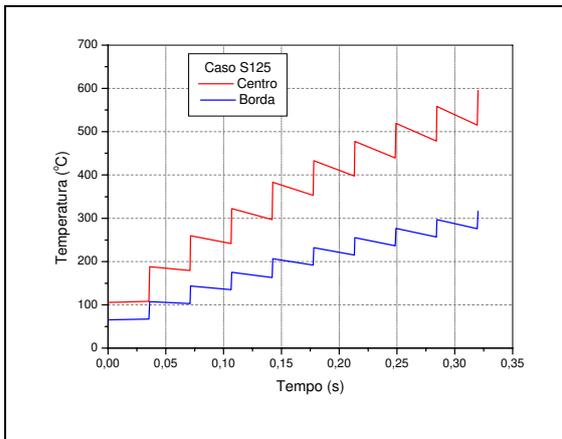


Figura 5.55 – Caso S125

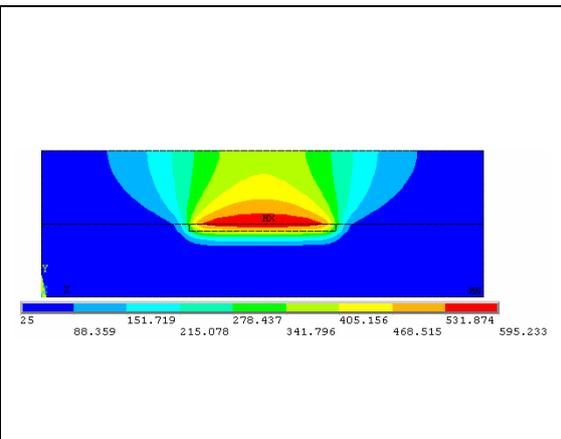


Figura 5.56 – Perfil Espacial da Temperatura S125

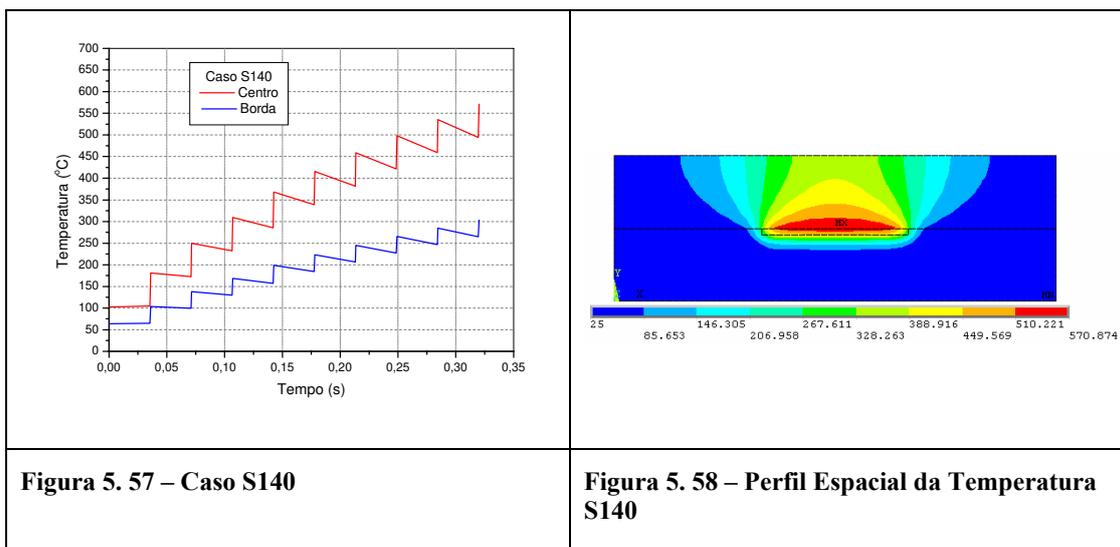


Tabela 5. 17 - Temperaturas finais para todos os casos de variação da quantidade de Sílica.

Caso	Temperaturas Máximas °C (após 10 pulsos)		Diferença Centro – Borda (°C)
	Centro	Borda	
S0	344,7	191,7	153,0
S12	399,7	219,9	179,8
S35	670,8	358,1	312,7
S54	649,1	345,4	303,7
S70	642,6	341,3	301,3
S90	655,3	346,2	309,1
S110	624,1	331,2	292,9
S125	594,9	316,0	278,9
S140	570,7	303,2	267,5

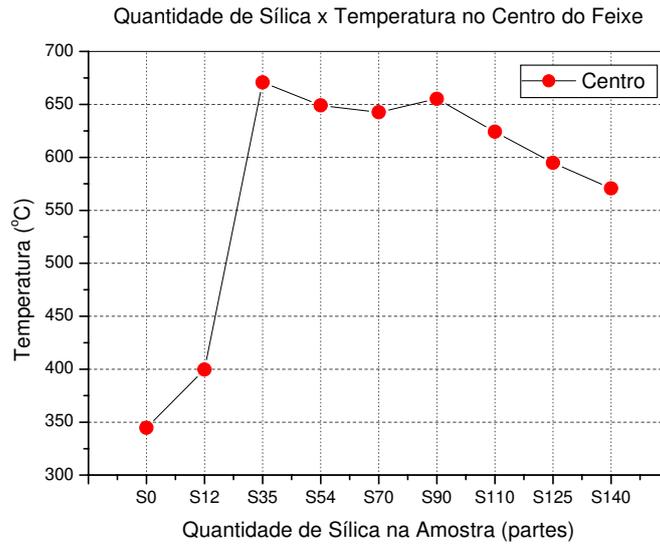


Figura 5. 59 – Temperaturas de Centro para todas as variações da Quantidade de Sílica

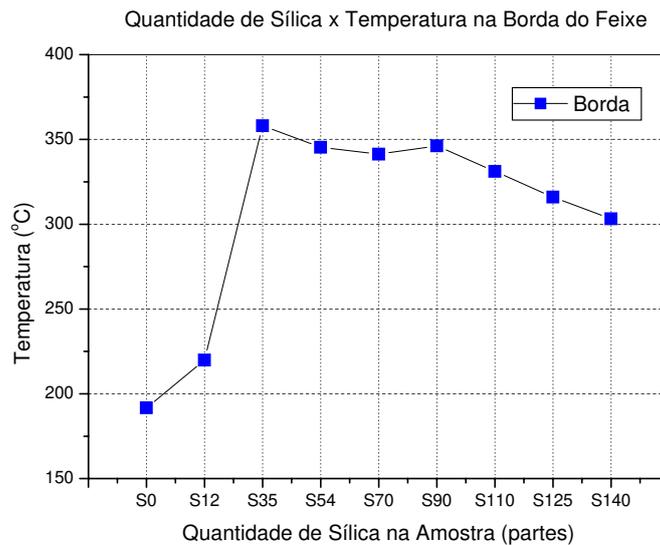


Figura 5. 60 – Temperaturas de Borda para todas as variações da Quantidade de Sílica

5.3.6 – Estudo do Efeito de Resfriamento do Material após o Último Pulso

- Em função do Diâmetro do Feixe
Casos analisados: 1A-I, 2A-I, 3A-I e 4A-I
Condições:
Velocidade = 1,60m/s
Potência = 20W

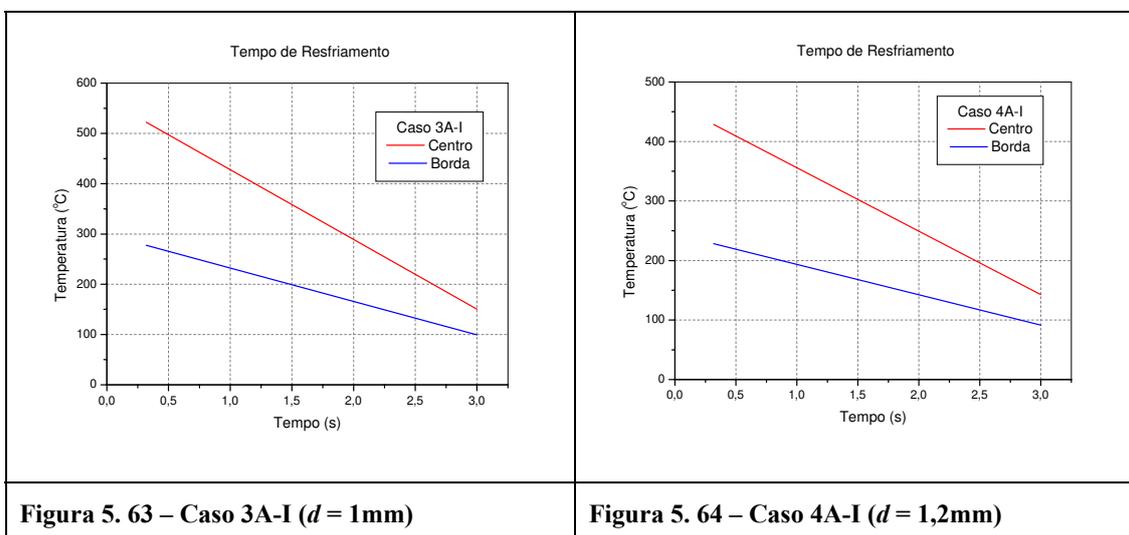
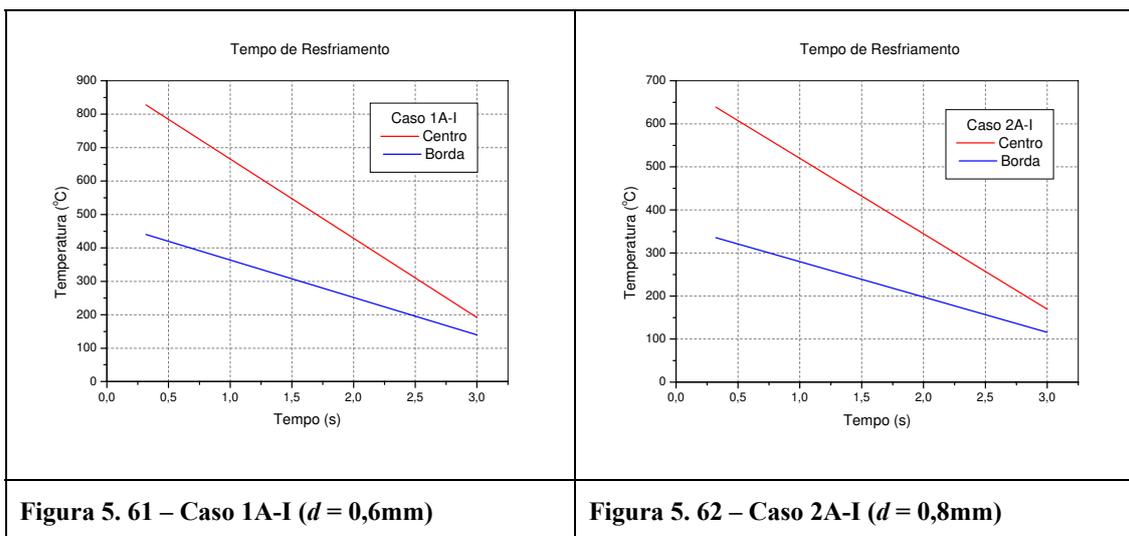


Tabela 5. 18 – Resfriamento após 3 segundos para os casos 1A-I, 2A-I e 3A-I

Caso	Variável analisada	Resfriamento após 3 segundos (°C)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
1A-I	Diâmetro (mm)	636,4	300,2	336,2
2A-I	0,8	469,5	220,1	249,4
3A-I	1,0	371,9	178,2	193,7
4A-I	1,2	286,1	137,0	149,1

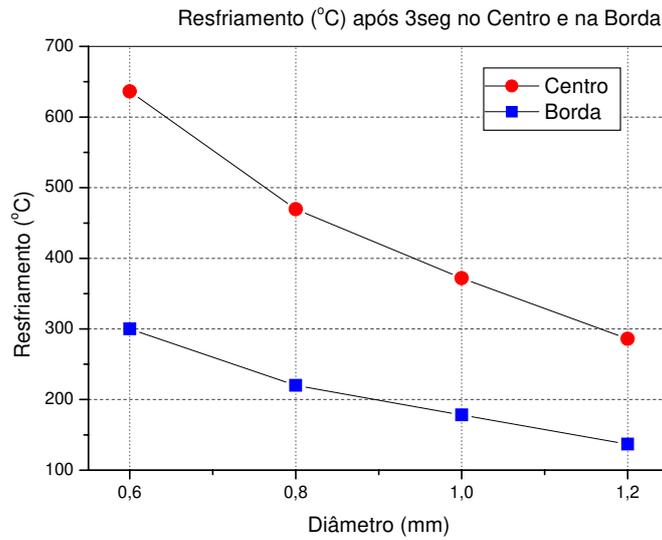


Figura 5. 65 – Resfriamento de Centro e Borda dos casos 1A-I, 2A-I, 3A-I e 4A-I

- Em função da Velocidade do Feixe

Casos analisados: 2A-I e 2B-I

Condições:

Diâmetro = 0,8 mm

Potência = 20W

O cenário 2A-I pode ser visualizado na figura 5.62.

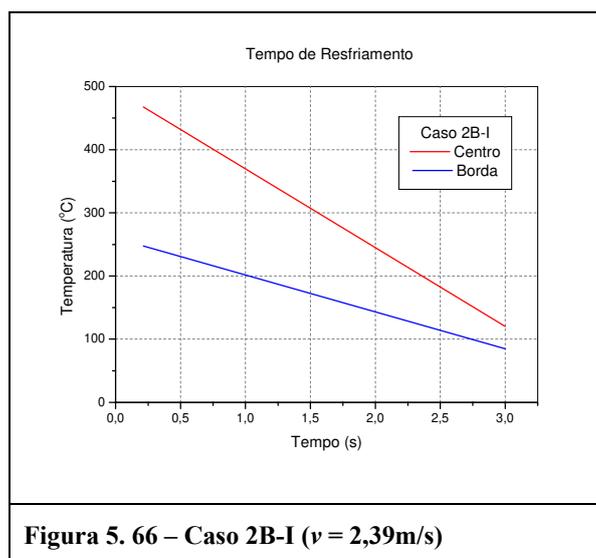


Tabela 5. 19 – Resfriamento após 3 segundos para os casos 2A-I e 2B-I

Caso	Variável analisada	Resfriamento após 3 segundos (°C)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
2A-I	1,60	469,5	220,1	249,4
2B-I	2,39	347,4	162,8	184,6

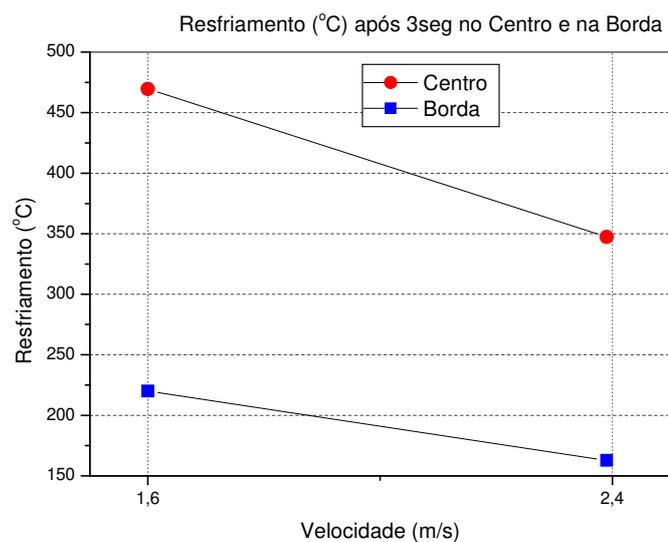


Figura 5. 67 – Resfriamento de Centro e Borda dos casos 2A-I e 2B-I

- Em função da Potência do Feixe
 Casos analisados: 2A-I, 2A-II e 2A-III
 Condições:
 Diâmetro = 0,8 mm
 Velocidade = 1,60m/s

O cenário 2A-I pode ser visualizado na figura 5.62.

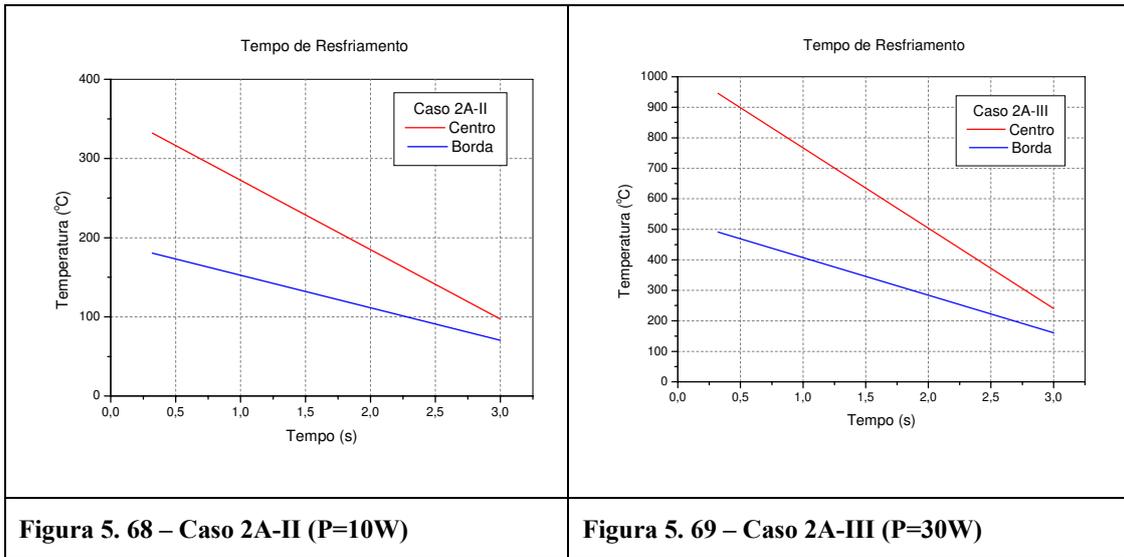


Tabela 5. 20 – Resfriamento após 3 segundos para os casos 2A-I, 2A-II e 2A-III

Caso	Variável analisada Potência (W)	Resfriamento após 3 segundos (°C)		Diferença Centro – Borda (°C)
		Centro	Borda	
2A-I	20	469,5	220,1	249,4
2A-II	10	234,7	110,0	124,7
2A-III	30	705,2	330,3	374,9

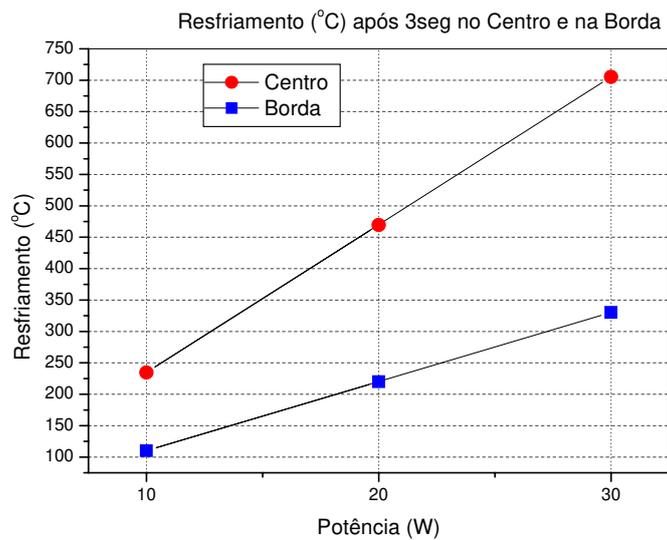


Figura 5. 70 – Resfriamento de Centro e Borda dos casos 2A-I, 2A-II e 2A-III

- Em função da Proporção de Sílica na Composição

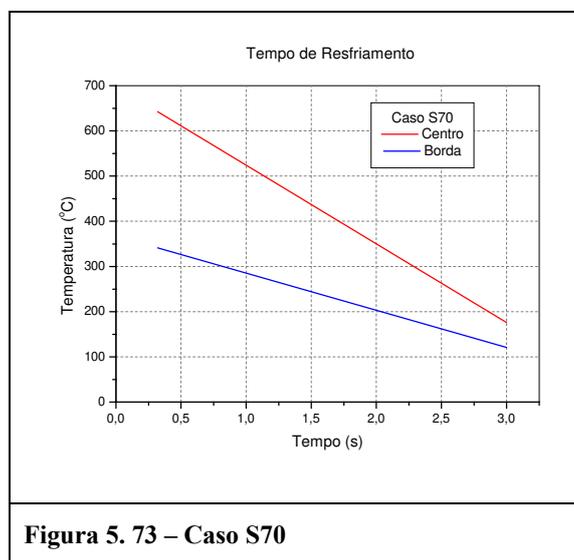
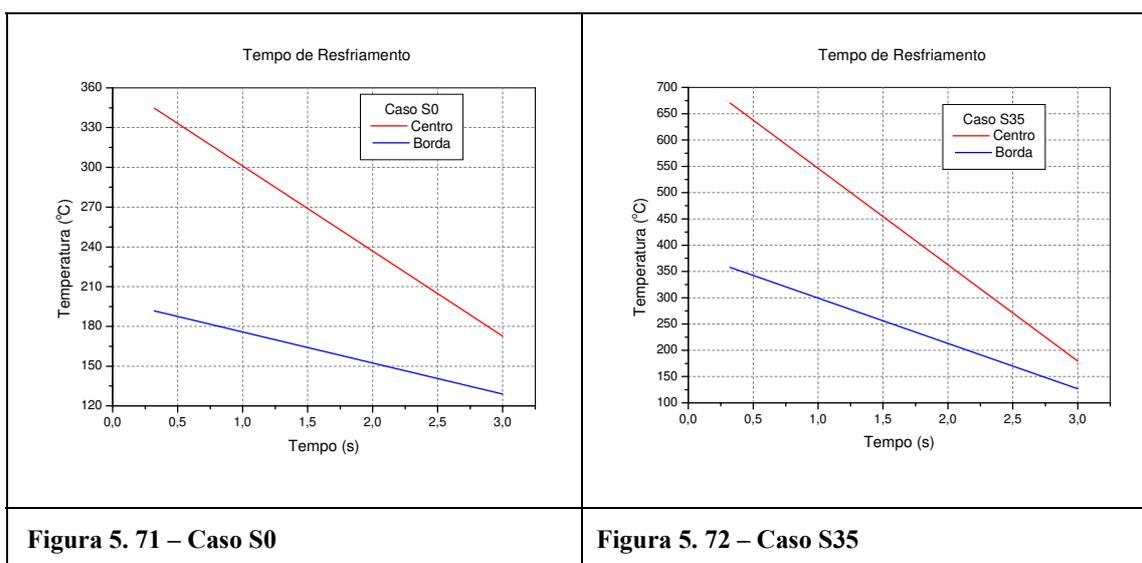
Casos analisados: Sem, 35%, 70%, 110%, 140%

Condições:

Diâmetro = 0,8 mm

Velocidade = 1,60m/s

Potência = 20W



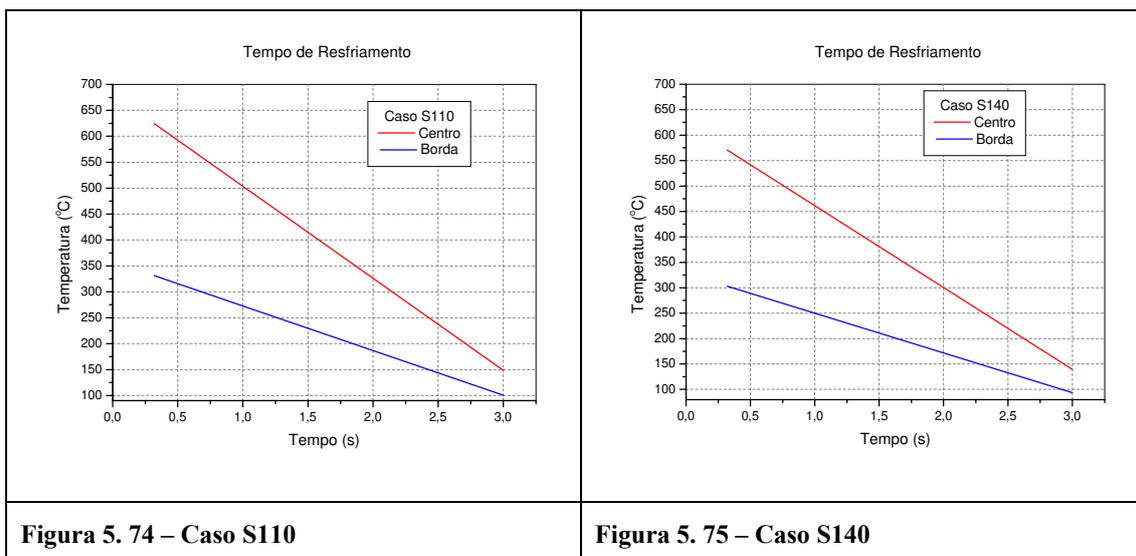


Tabela 5. 21 – Resfriamento após 3 segundos para os casos S0, S35, S70, S110 e S140

Variável analisada	Resfriamento após 3 segundos (°C)		Diferença Centro – Borda (°C)
	Centro	Borda	
S0	171,9	62,8	109,1
S35	491,6	231,2	260,4
S70	466,5	220,6	245,9
S110	475,6	230,7	244,9
S140	431,4	209,6	221,8

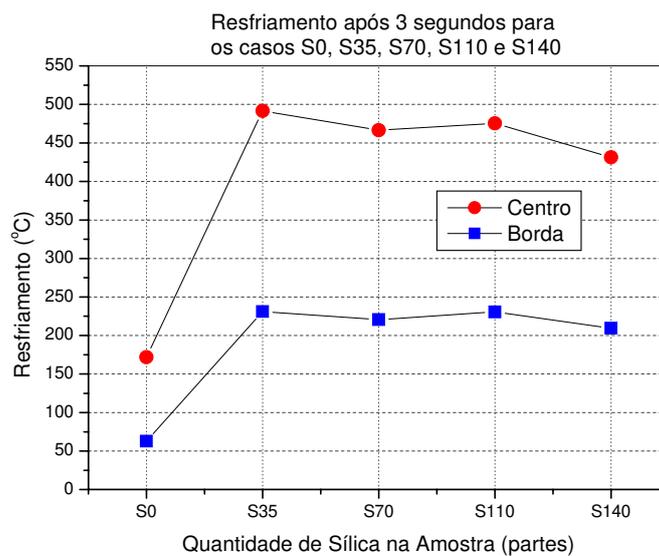


Figura 5. 76 – Resfriamento de Centro e Borda dos casos S0, S35, S70, S110 e S140

5.4 – Conclusões

O presente capítulo apresentou e discutiu os resultados obtidos com as simulações realizadas com uso do Modelo Numérico Ansys. Foram planejadas análises em função dos parâmetros operacionais do *laser* (diâmetro, velocidade de varredura e potência) e das propriedades termofísicas da amostra através da variação da sua quantidade de sílica.

O aumento do diâmetro do feixe *laser*, ocasiona naturalmente maior volume irradiado. Como a potência é fixa, nestes casos, a energia é distribuída em uma região maior, o que ocasiona o decréscimo dos valores de temperatura tanto no centro quanto na borda da amostra. Além disto, com o aumento do diâmetro do feixe, a diferença de temperatura entre centro e borda reduz-se também. O aumento da velocidade de varredura acarreta a diminuição das temperaturas de centro e borda. O aumento da potência do *laser* gera maiores valores de temperatura para centro e borda.

Com relação à variação da quantidade de sílica na amostra, obteve-se uma faixa de valores que compreende 35, 54, 70 e 90 partes de sílica, em que as temperaturas de centro e borda foram as mais elevadas. Estes valores de sílica na amostra apresentam maior “heat sink”, ou seja, maior retenção de energia, o que é interessante para o processo IRTL.

CAPÍTULO 6 – O MODELO CINÉTICO STLG – FEM

Neste capítulo, será apresentado o Modelo Cinético STLG-FEM, desenvolvido por BÁRTOLO (2001), com seus objetivos e suas funcionalidades e como o mesmo foi aplicado neste trabalho, além de abordar a cinética de cura, sua definição e conceitos envolvidos.

6.1 – A Cinética de Cura

A reação de cura de resinas termossensíveis é um processo de cura caracterizado pelas reações químicas de ligações cruzadas que criam uma rede tridimensional insolúvel, sem fusão e altamente ligada por cruzamentos (SELLI e BELLOBONO, 1993). Dois eventos podem ocorrer durante a reação de cura de resinas termossensíveis:

- Gelificação: transição de líquido para gel elástico.
- Vitrificação: transição de líquido ou gel elástico para vidro.

A gelificação, considerada como “explosão química”, é um fenômeno não-reversível e corresponde a uma formação inicial de uma rede molecular infinita (gelificação molecular), a qual é associada com um aumento considerável de viscosidade (gelificação macroscópica) (BÁRTOLO, 2001). Neste ponto, o sistema não flui mais e duas fases coexistem: uma fase gel e uma fase sólida. A fase gel é a parte gelatinosa, insolúvel em solventes não-degradantes enquanto que a fase sólida, que permanece solúvel, pode ser extraída com solventes. A gelificação molecular é definida como a formação inicial de moléculas ramificadas de peso molecular infinito, e ocorre a uma fração de conversão particular para cada sistema, a qual depende da funcionalidade, reatividade e estequiometria das espécies reativas.

A gelificação macroscópica é vinculada com um aumento significativo na viscosidade e com um correspondente decréscimo na processabilidade. A transformação abrupta, de um líquido viscoso para um gel elástico, corresponde ao ponto de gel e define o princípio da gelificação. A partir deste ponto, como a reação continua a quantidade de fase sólida presente no sistema diminui e o polímero torna-se mais e mais cruzadamente ligado.

A vitrificação corresponde à formação de um material sólido vitrificado devido ao aumento tanto da densidade das ligações cruzadas quanto do peso molecular do polímero sendo curado e, usualmente segue a gelificação. A ativação da vitrificação ocorre quando o aumento da temperatura de transição vítrea (T_g) atinge a temperatura de cura (T_{cura}). Este aumento na T_g é conseqüente do aumento do peso molecular e da densidade das ligações cruzadas observadas durante a reação de cura. A partir da vitrificação, a taxa de reação sofre um considerável decréscimo e a reação se torna muito lenta como se estivesse controlada pela difusão das espécies reativas. Por sua vez, a vitrificação atravessa uma mudança de uma reação essencialmente controlada cineticamente ($T_g < T_{cura}$) para uma reação controlada por difusão ($T_g > T_{cura}$) (BÁRTOLO, 2001).

O efeito controlado por difusão, além de causar uma diminuição suave da reação de conversão, determina o grau final de conversão obtida. Além do mais, este efeito pode levar à formação de estruturas não-homogêneas e alterar as propriedades físicas e a durabilidade do polímero curado. Isto causa também mudanças no volume específico de um material contribuindo para a geração de tensões residuais.

A temperatura de transição vítrea aumenta com a fração de conversão (α), graças às restrições de mobilidade sobre os segmentos da cadeia, os quais estão vinculados ao decréscimo do volume livre. Durante as reações de cura, o volume livre é consumido por reações adicionais e por reações cruzadas que restringem o movimento das cadeias colaborando com a formação da rede. Como as ligações cruzadas aumentam a dificuldade de movimentação na cadeia, isto reflete em um aumento de T_g e, por conseqüência, reações não-lineares entre T_g e α podem ser concebidas.

6.1.1 – As Reações de Cura Termo-Iniciadas

As reações de cura termo iniciadas foram estudadas por SCARPARO *et al.* (1995), empregando um Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC).

Nas curvas obtidas do DSC, a taxa de geração de calor exibe um pico máximo ou mínimo, dependendo de como os termopares são alocados no aparelho, quando registrada em função do tempo, e a taxa de reação, que é proporcional a taxa de geração de calor, também exibe valores de máximo e de mínimo, e decresce em função do tempo.

O DSC pode proporcionar dois tipos de varreduras: as dinâmicas (fluxo de calor em função da temperatura) e as isotérmicas (fluxo de calor em função do tempo). Deve-se considerar, então, que o fluxo de calor exibido em relação à linha base do instrumento é proporcional à Taxa da Reação $d\alpha / dt$.

As reações de cura termo iniciadas foram desenvolvidas para medir e modelar o efeito da temperatura de cura isotérmica sobre o processo.

6.1.2 – Efeitos da Temperatura de Cura (T_{cura})

No trabalho experimental, desenvolvido por SCARPARO *et al.* (1996), foram adotadas amostras de resina epóxi DER*338 (Dow Chemical), com termoiniciador Dietilenotriamina DEH*20 (Dow Chemical) na razão (100:14 partes), que foram curadas para diferentes temperaturas de cura isotérmicas: 80, 90, 100, 110, 120 e 130°C. O objetivo deste trabalho experimental é determinar a fração de conversão e a taxa de cura das amostras.

A Fração de Conversão é o processo de transição do material da fase líquida para a fase de gel com aumento da viscosidade da amostra.

A Taxa de Reação é a rapidez com que o material sofre a reação de cura, atingindo um ponto máximo (ponto de vitrificação) e retornando ao marco zero da taxa devido à formação completa da cadeia, através das ligações cruzadas que dificultam a mobilidade das moléculas.

Em sistemas isotérmicos, a equação 6.1 representa, através de uma única reação, o processo de cura como um todo:

$$\frac{d\alpha}{dt} = f(\alpha) \cdot k_c(T) \quad 6.1$$

onde, $d\alpha/dt$ é a taxa de reação, $f(\alpha)$ é a fração de conversão e $K_c(t)$ é a constante da taxa quimicamente controlada ou constante cinética da reação.

Para os experimentos, as medidas são feitas sob condições isotérmicas, ou seja, o aquecimento respeita certo degrau de fornecimento de energia por período de tempo, a equação 6.2 modela este caso:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{\phi} \cdot f(\alpha) \cdot k_c(T) \quad 6.2$$

em que ϕ é a taxa de aquecimento.

A mais comum forma analítica da $f(\alpha)$ é dada por (POPESCU e SEGAL, 1998; YOUSEFI *et al.*, 1997) na equação 6.3:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad 6.3$$

onde n é a constante que corresponde a ordem da reação. Substituindo a equação 6.3 na equação 6.1, a seguinte equação 6.4 é obtida:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_c(T) \cdot (1 - \alpha)^n \quad 6.4$$

que corresponde ao modelo cinético de ordem n (PRIME, 1997).

Como a força motriz da reação de cura da maioria das resinas termossensíveis é a temperatura, pode-se considerar que esta ocorre segundo a equação de Arrhenius e, portanto a expressão da taxa constante é dada por:

$$k_c = k_o \cdot \exp\left(\frac{E}{R \cdot (\Delta + T)}\right) \quad 6.5$$

onde: k_c = taxa constante da velocidade da reação na temperatura T (s^{-1});

k_o = fator pré exponencial ou de frequência (s^{-1});

E = energia de ativação (J/mol);

R = constante dos gases (8,314 J/K.mol);

$\Delta + T$ = temperatura absoluta ($\Delta = 273^\circ C$).

Portanto, a velocidade da reação aumenta exponencialmente com o aumento da temperatura. Na prática, o curso das reações de cura da maioria dos sistemas termossensíveis pode ser adequadamente descrito em termo desses modelos cinéticos simples. Assim, pode-se concluir que as reações químicas de cura são basicamente controladas pela taxa de cura.

Considerando a expressão da taxa constante, e substituindo a equação 6.5 na equação 6.4, obtém-se:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_o \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_{abs}}\right) \cdot (1 - \alpha)^n \quad 6.6$$

Para uma reação isotérmica, a expressão cinética de ordem n , dada pela equação 6.6, mostra um máximo da taxa da reação no tempo $t = 0$. Entretanto, se em um processo isotérmico caracterizado por um termograma, mostrar um valor máximo na taxa da reação entre 30 a 40% da reação total de cura, o modelo cinético de ordem n não pode ser aplicado, e neste caso, o modelo de ordem n é substituído pelo modelo chamado autocatalítico, dado pela equação 6.7:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_{c1}(T) + k_{c2}(T) \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n \quad 6.7$$

onde $k_{c1}(T)$ e $k_{c2}(T)$ são taxas constantes, m é a ordem da reação e $(m + n)$ é a ordem total da reação. A ordem da reação, de acordo com as definições, indica o número de átomos, moléculas ou grupos reativos cuja concentração determina a taxa da reação.

Esta fórmula, observadas através de resultados experimentais mostra que o pico exotérmico ocorre para $t > 0$ e conseqüentemente $k_{c1}(T) = 0$ e, portanto, a equação 6.7 torna-se:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_c(T) \alpha^m \cdot (1 - \alpha)^n \quad 6.8$$

Esta expressão é utilizada para descrever processos autocatalíticos, contudo, este modelo autocatalítico não inclui explicitamente os efeitos da concentração do iniciador na taxa de cura e, o efeito de difusão controlada após a vitrificação.

Muitos autores (JANG, 1981; KENNY e TRIVISANO, 1991; PUTCIOGLUE *et al.*, 1979), utilizam para estudo isotérmico a técnica da calorimetria diferencial de varredura (DSC). Utilizando-se o método isotérmico é possível avaliar os dois tipos de reação: o de ordem n e o de ordem autocatalítica.

Como a taxa constante da velocidade da reação é função da temperatura, os cálculos dos parâmetros cinéticos necessitam de no mínimo três isotermas a temperaturas diferentes. Uma varredura dinâmica deve ser obtida para se verificar quais as temperaturas mais adequadas em que devam ser obtidas as isotermas, além de fornecer o valor do calor da reação total, ΔH_o , necessário nos cálculos. O ensaio deve ser realizado com taxa de aquecimento entre 5 a 10°C/min. As temperaturas das isotermas são selecionadas com intervalos de 10 a 20°C/min entre as temperaturas inicial de cura e correspondente ao pico.

O valor de α é determinado pela equação 6.9:

$$\alpha = \frac{\Delta H_p}{\Delta H}$$

6.9

onde $\Delta H = \Delta H_r + \Delta H_{iso}$, onde ΔH_p é o calor da reação parcial no tempo t , ΔH_r é o calor residual da reação, e ΔH_{iso} é o calor total da reação durante a cura isotérmica.

6.2 – Apresentação do Modelo

O Modelo Cinético STLG-FEM consiste de um programa computacional, desenvolvido em linguagem de programação Fortran, cujo conteúdo utiliza o Método dos Elementos Finitos para cálculos no estudo e caracterização dos efeitos de variações, dentre outros parâmetros, da temperatura, de uma malha de $[(N-1) \times (M-1)]$ elementos, representando a resina polimérica.

Este programa, desenvolvido por BÁRTOLO (2001), foi utilizado no presente trabalho para a análise de algumas condições específicas na malha, para o Processo Termolitográfico (IRTL), ou seja, a cura localizada da resina com uso de *laser* infravermelho de CO₂.

A Figura 6.1 ilustra uma malha construída com 15x5 elementos (numerados dentro de triângulos) e 75 nós (numerados nos círculos azuis).

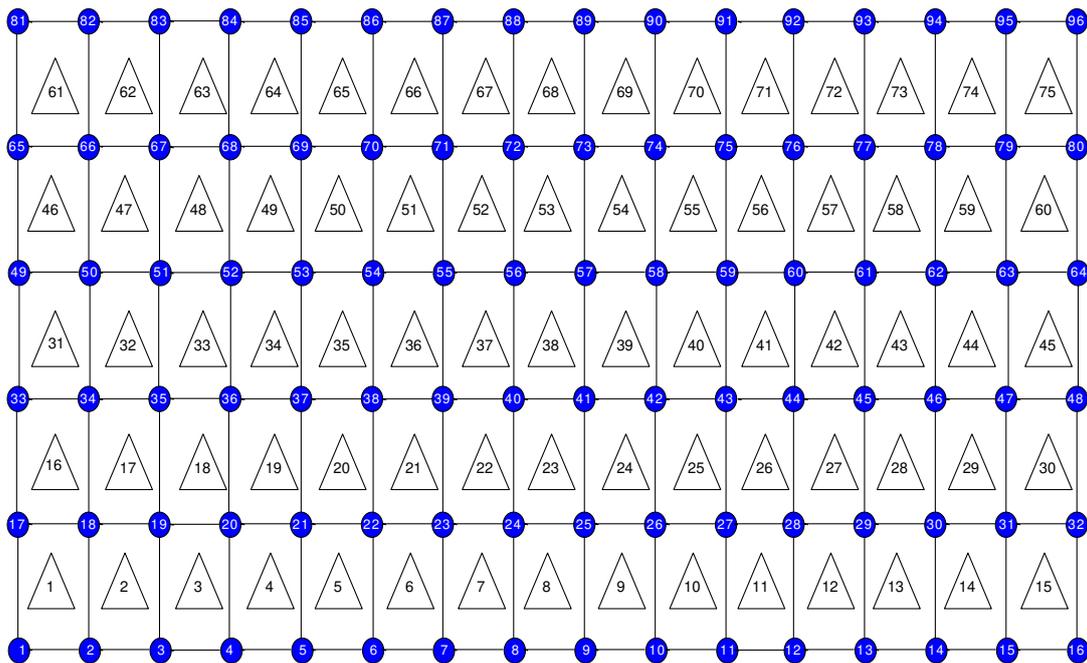


Figura 6. 1 – Exemplo de uma malha de 15x5 elementos

A localização dos elementos e dos nós é feita por uma numeração da esquerda para a direita e de baixo para cima na malha.

O Modelo STLG-FEM é baseado no conceito do Método dos Elementos Finitos que se caracteriza pela discretização de um domínio geral em um número finito de subdomínios, denominados “elementos”. Os elementos, por sua vez, estão ligados uns aos outros por pontos denominados “nós”, formando uma grade de células chamada “malha de elementos finitos”. Os parâmetros designados para cada elemento ou variável nodal são denominados como “graus de liberdade”.

Em um domínio contínuo, uma variável de campo tem um número infinito de incógnitas por esta variável ser uma função de cada ponto genérico no domínio. A discretização por elementos finitos reduz o problema para apenas uma incógnita de um número finito de incógnitas, com o comportamento da variável de campo dentro de um elemento sendo representado através de funções de aproximação chamadas “contorno” ou “funções de interpolação” (BÁRTOLO, 2001).

O Método dos Elementos Finitos transforma equações em forma de derivadas ou integrais em um conjunto de equações algébricas, mais facilmente manipuláveis.

O algoritmo de Cranck-Nicolson do método da estabilidade incondicional (LEWIS, 1996) foi empregado para integrar a equação (6.10) em relação ao tempo. De acordo com este algoritmo, os valores desconhecidos da temperatura no instante de tempo t_{n+1} são determinados através do conhecimento das temperaturas no instante de tempo t_n , considerando a seguinte aproximação temporal:

$$[C]^e \left\{ \dot{T} \right\}^e + [K]^e \{T\}^e = \{F\}^e \quad 6.10$$

onde $[C]^e$ é a matriz do calor específico no elemento, $[K]^e$ é a matriz da condutividade térmica no elemento e $\{F\}^e$ é o vetor equivalente ao fluxo de calor no elemento. Os elementos da matriz na equação (6.10) são dados pelas seguintes equações:

$$C_{ij}^e = \int_{\Omega_e} N_i^e \rho C N_j^e dx dy \quad 6.11$$

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega_e} \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x} k_x \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} k_y \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \right) dx dy + \int_{\Gamma_e} N_i^e h N_j^e d\Gamma \quad 6.12$$

$$F_i^e = \int_{\Omega_e} N_i^e \rho H \frac{d\alpha}{dt} dx dy + \int_{\Gamma_e} N_i^e l d\Gamma + \int_{\Gamma_e} N_i^e h T_\infty d\Gamma \quad 6.13$$

$$\{T\}_{n+1}^e = \{T\}_n^e + \frac{1}{2} \Delta t \left(\left\{ \dot{T} \right\}_{n+1}^e + \left\{ \dot{T} \right\}_n^e \right) \quad 6.14$$

que aplicada na equação (6.10) torna-se:

$$\left([C]^e + \frac{1}{2} \Delta t [K]^e \right) \{T\}_{n+1}^e = \left[[C]^e + \frac{1}{2} \Delta t [K]^e \right] \{T\}_n^e + \frac{1}{2} \Delta t \left[\{F\}_{n+1}^e + \{F\}_n^e \right] \quad 6.15$$

onde o subscrito denota o tempo para qual o termo correspondente deve ser estipulado, e Δt é o intervalo de tempo.

6.2.1 – Elemento Mestre

Elementos retangulares da família Lagrange foram considerados (ZIENKIEWICZ, 1977). As funções de interpolação para este tipo de elemento são desenvolvidas para um elemento retangular (Figura 6.2), denominado elemento mestre, considerando um local do sistema de coordenada (ε, η) onde $-1 \leq (\varepsilon, \eta) \leq 1$ (REDDY, 1993).

As funções de interpolação definidas neste item pode também ser utilizada para estimativas numéricas das integrais definidas nos elementos irregulares, requerendo a transformação da geometria do elemento irregular para o elemento mestre. Esta transformação será descrita no item 6.3.2.

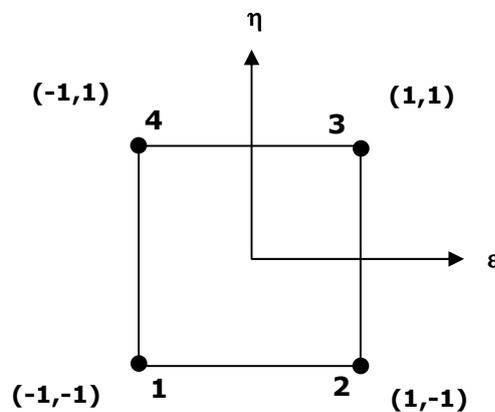


Figura 6. 2 – Elemento mestre quadrilateral (quatro nós).

O elemento mestre tem os nós numerados em uma seqüência, iniciando do nó $\varepsilon = -1$ e $\eta = -1$. Para este elemento, as funções de interpolação linear são dadas por:

$$\begin{aligned}
 N_1^e &= \frac{1}{4}(1 - \varepsilon)(1 - \eta) \\
 N_2^e &= \frac{1}{4}(1 - \varepsilon)(1 + \eta) \\
 N_3^e &= \frac{1}{4}(1 + \varepsilon)(1 - \eta) \\
 N_4^e &= \frac{1}{4}(1 + \varepsilon)(1 + \eta)
 \end{aligned}
 \tag{6.16}$$

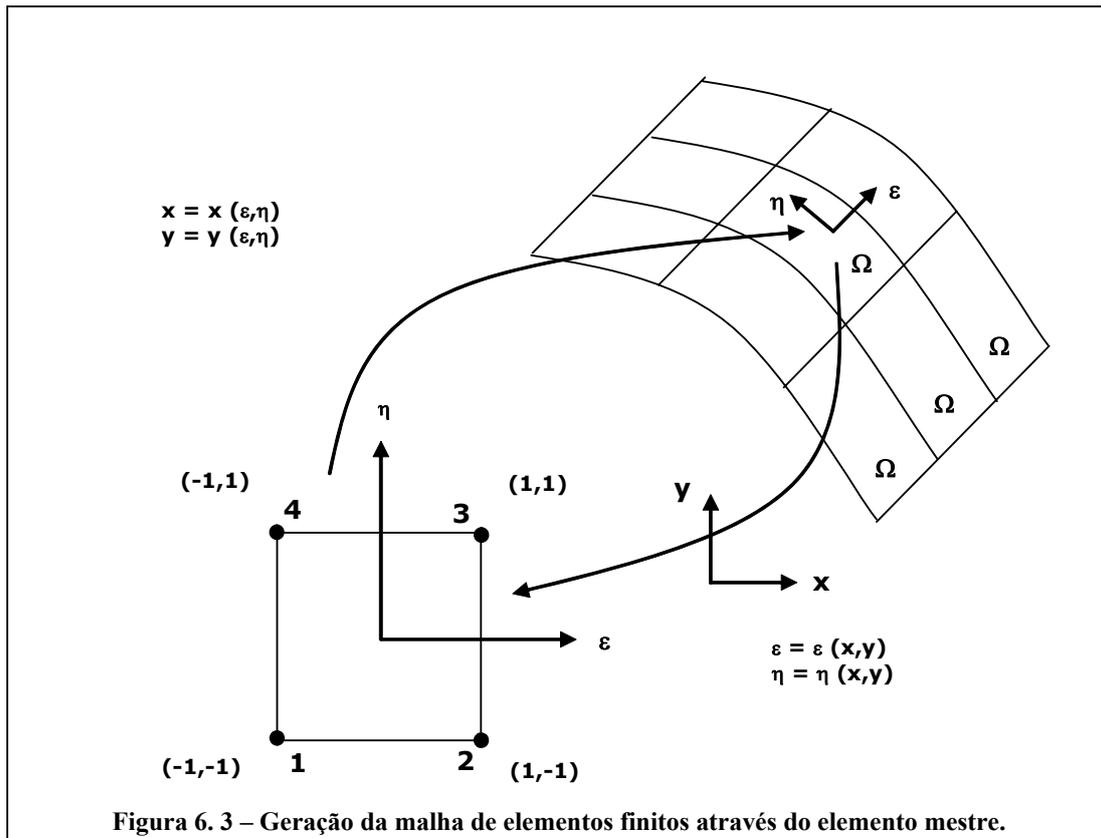
As funções de interpolação linear têm o valor um para o nó a qual elas são relacionadas, e o valor zero para os outros nós. Além disso, pode-se facilmente verificar que a soma das funções de interpolação em qualquer ponto dentro do elemento é igual a um.

6.2.2 – Formulação Isoparamétrica

Para estimar as integrais incluídas na definição dos elementos das matrizes e vetores (equações 6.11 e 6.13), os valores das funções de interpolação devem ser conhecidos bem como as funções de interpolação derivadas, as áreas e os comprimentos elementares. Contudo, desde que as coordenadas locais são usadas para definir o elemento mestre, uma transformação de coordenada é requerida para computar as integrais em termos das coordenadas locais utilizadas na definição do problema.

De acordo com a Figura 6.3, que representa a geração da malha de elementos finitos através do elemento mestre, um elemento arbitrário Ω_e pode ser gerado do elemento mestre Ω , pela transformação da coordenada de forma (COMINI *et al.*, 1994):

$$\begin{aligned}
 x &= \sum_{i=1}^4 N_i^e(\varepsilon, \eta) x_i \\
 y &= \sum_{i=1}^4 N_i^e(\varepsilon, \eta) y_i
 \end{aligned}
 \tag{6.17}$$



Empregando a regra da diferenciação parcial, a seguinte equação é obtida:

$$\frac{\partial N_i^e}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \varepsilon} \tag{6.18}$$

$$\frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} = \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta}$$

Na forma matricial, a equação (6.18) pode ser reescrita como:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i^e}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial y}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \end{Bmatrix} \tag{6.19}$$

Da equação (6.19), a matriz Jacobiana definida por COMINI *et al.* (1994) e ZIENKIEWICZ e PAREKH (1970) da transformação é dada por:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial y}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad 6.20$$

com

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial \varepsilon} &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i^e}{\partial \varepsilon} x_i, & \frac{\partial y}{\partial \varepsilon} &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i^e}{\partial \varepsilon} y_i \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} x_i, & \frac{\partial y}{\partial \eta} &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} y_i \end{aligned} \quad 6.21$$

Finalmente, a relação entre $(\partial N_i^e / \partial x, \partial N_i^e / \partial y)$ e $(\partial N_i^e / \partial \varepsilon, \partial N_i^e / \partial \eta)$ pode ser computada pela inversão da matriz Jacobiana:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i^e}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad 6.22$$

Para estimar as integrais no domínio bidimensional, é necessário calcular o comprimento e área elementar com referência ao elemento mestre bidimensional. Neste caso, $d\Omega_e$ é uma área elementar, que pode ser estimada, em coordenadas locais expressa por:

$$d\Omega_e = dx dy = \det [J] d\varepsilon d\eta \quad 6.23$$

enquanto que a integral sobre os elementos laterais pode ser calculada em termos da coordenada ε normalizada COMINI *et al.* (1994):

$$d\Gamma_e = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varepsilon}\right)^2} d\varepsilon \quad 6.24$$

com estas transformações, as integrais definidas pela equações (6.10) a (6.13) podem ser facilmente estimadas.

6.2.3 – Integração Numérica

A integração numérica é usada para estimar as equações (6.11) a (6.13). As regras da quadratura de Gauss-Legendre (ZIENKIEWICZ, 1977) foram utilizadas para computar a integração numérica. As formulas da quadratura numérica em elementos quadrilaterais têm seguido a forma:

$$\int_{\Omega_e} F(\varepsilon, \eta) d\varepsilon d\eta = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(\varepsilon, \eta) d\varepsilon d\eta \approx \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k F(\varepsilon_i, \eta_j) W_i W_j \quad 6.25$$

onde W_i e W_j são os fatores de Gauss e k é o numero de integração ou pontos de Gauss. A regra da integração 2 x 2 para elementos retangulares lineares é usada para integrar numericamente as equações (6.11) a (6.13). Os valores correspondentes para os pontos da quadratura e os fatores de gauss, são indicadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores para os pontos e fatores de Gauss.

K x k	ε_i	η_j	W_i	W_j
	-0,57735	-0,57735		
2 x 2	-0,57735	-0,57735	1	1
	-0,57735	-0,57735		
	-0,57735	-0,57735		

6.3 – Processamento Computacional do Modelo – O Programa

O Programa é dividido em três partes principais:

❖ Pré-processamento

Fase em que ocorrem as leituras dos dados de entrada.

❖ Processamento

Fase em que ocorrem a criação da malha (elementos e nós) por integração numérica, a especificação das condições de contorno, o cálculo das temperaturas nos nós, as frações de conversão e as taxas de reação.

❖ Pós-processamento

Fase que gera os resultados, os quais estarão disponíveis em arquivo de saída.

O código é formado por várias sub-rotinas e variáveis distribuídas nas três fases acima.

6.3.1 – Sub-rotinas

Ao todo, existem 17 sub-rotinas ao longo do programa. Seus nomes e funcionalidades são apresentados a seguir de acordo com as fases em que são solicitadas:

Fase de Pré-processamento

As sub-rotinas desta fase estão disponíveis na Tabela 6.2

Tabela 6. 2 – Sub-rotinas da Fase de Pré-processamento do STLG-FEM.

SUBROTINA	OBJETIVO
MODEL	Define o sistema de coordenadas, o tipo do processo de cura e efeitos de difusão
MPROP	Especifica as propriedades do material
MESH	Gera a malha
TEMP	Define os parâmetros para a subrotina Boundry
THERMAL	Determina as condições térmicas e da radiação Infravermelho
LIGHT	Determina as condições da radiação Ultra-violeta (não utilizada neste trabalho)
CATAL	Realiza a computação dos parâmetros cinéticos
CONVEC	Determina os efeitos de convecção
NSTEADY	Define os parâmetros para problemas dependentes do tempo

Fase de Processamento

As sub-rotinas desta fase estão disponíveis na Tabela 6.3

Tabela 6.3 – Sub-rotinas da Fase de Processamento do STLG-FEM.

SUBROTINA	OBJETIVO
EMATRIX	Realiza a computação de algumas matrizes de elementos (capacidade de aquecimento e condutividade)
SHAPE	Calcula funções de interpolação e respectivas derivações
TIMER	Realiza a computação das matrizes e dos vetores para problemas dependentes do tempo
BOUNDRY	Determina as condições de contorno
SOLVER	Resolve o sistema de equações algébricas
RUNGEKUTTA	Implementa o algoritmo Runge-Kutta
KINETIC	Realiza a computação da equação cinética

Fase de Pós-Processamento

A sub-rotina desta fase é apresentada na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Sub-rotinas da Fase de Pós-Processamento do STLG-FEM.

SUBROTINA	OBJETIVO
POSTP	Realiza a computação do gradiente da solução

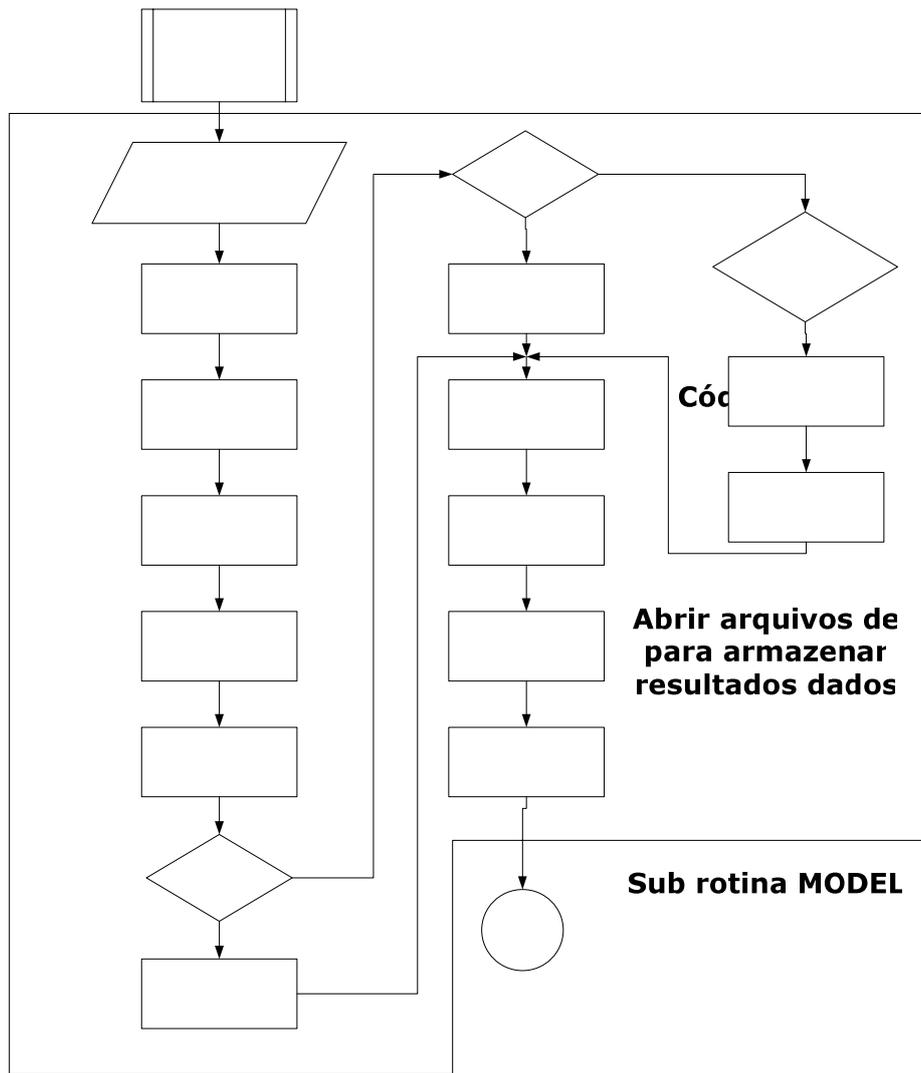


Figura 6. 4 – Fluxograma do código FEM (unidade de Pré-Processamento e Processamento)

Não

Sub rotina GENER

Sub rotina MESH

Sub rotina TEMP

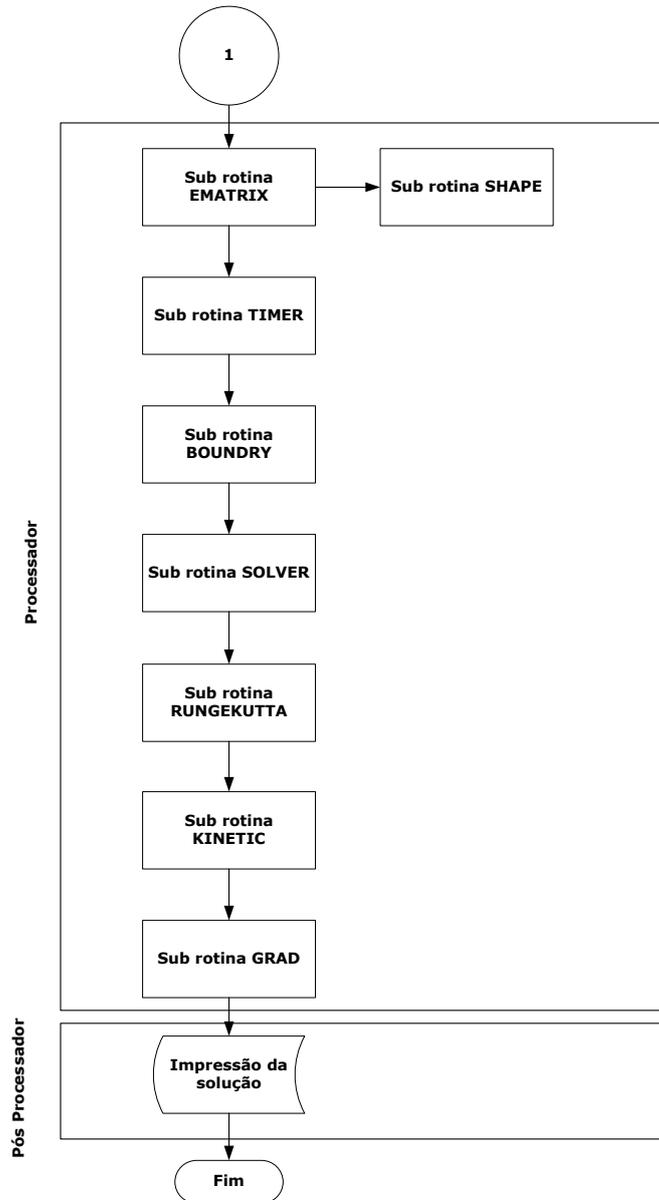


Figura 6. 5 – Fluxograma do código FEM (unidade de processamento e pós processamento)

6.3.2 – Variáveis

As principais variáveis do programa são apresentadas a seguir na Tabela 6.5 :

Tabela 6. 5 – Principais variáveis do STLG-FEM.

Nome	Descrição	Subrotina
INPUT	Indica a forma da entrada de dados do programa: Entrada por arquivo ou por teclado	Data Input
SYST	Define o tipo de orientação do sistema: Plano ou Axisimétrico	MODEL
NX	Indica o número de elementos na direção x	MODEL
NY	Indica o número de elementos na direção y	MODEL
VAL	Define a dimensão de cada elemento na direção x	MODEL
VAL1	Define a dimensão de cada elemento na direção y	MODEL
CURE	Define o tipo da reação de cura: Termoiniciada/Fotoiniciada/Ambas	MODEL
DIFFUS	Considera ou não efeito de difusão	MODEL
A10	Indica o valor da Condutividade Térmica do material na direção x	MPROP
A20	Indica o valor da Condutividade Térmica do material na direção y	MPROP
E	Indica o valor da Energia de Ativação	MPROP
DH	Indica o valor do Calor da Reação	MPROP
DENS	Indica o valor da Densidade de Massa	MPROP
CP	Indica o valor do Calor Específico	MPROP
NSPV	Define o número de nós com temperaturas iniciais	TEMP
VAL2	Define o número dos nós com temperaturas iniciais	TEMP
VAL3	Indica o valor de cada nó com temperatura inicial	TEMP
ICONV	Considera ou não o efeito de Convecção	CONVEC
TEFFECT	Define o tipo do problema termoiniciado: Isotérmico/Não-Isotérmico/Irradiação IR	THERMAL
HRATE	Define o valor da Taxa de Aquecimento	THERMAL
TCURE	Define o valor da Temperatura de Cura	THERMAL
NTIME	Define o número de <i>steps</i> para a solução transiente	NSTEADY
NSTP	Define o número de <i>steps</i> de tempo para se remover a fonte geradora de energia	NSTEADY
DT	Define os tempos dos passos usados na solução transiente	NSTEADY
ALFA	Definição do parâmetro na família-alfa de aproximação do tempo: Forward difference / Crank-Nicolson / Galerkin / Backward difference	NSTEADY

6.4 – Conclusões

Este capítulo apresentou o Modelo Cinético. Este modelo foi desenvolvido em linguagem computacional Fortran, para o estudo do comportamento das reações químicas que ocorrem durante o processo de cura da resina, e denominado por STLG-FEM. Este modelo também faz uso do Método dos Elementos Finitos. O Programa STLG-FEM é dividido em três fases de processamento: Pré-Processamento, Processamento e Pós-Processamento. Muitas subrotinas são encontradas no programas, e cada uma delas é responsável seja por algum cálculo, seja pela montagem da malha, por exemplo.

Foram apresentadas, também, as equações relacionadas com o processo de cura. Como já mencionado, a temperatura é a força-motriz da reação de cura para o processo IRTL. Deste modo, considerou-se que as reações termoiniciadas ocorrem segundo a equação de Arrhenius.

CAPÍTULO 7 – RESULTADOS DO MODELO CINÉTICO STLG – FEM

Neste capítulo é realizada uma análise do comportamento da amostra-padrão termossensível utilizada para a estereolitografia, porém sem Sílica, submetidas a diferentes temperaturas de cura isotérmicas e sob efeito ou não da difusão, além da validação do Modelo Cinético por meio da comparação dos resultados de suas simulações com os dados experimentais.

7.1 – O Efeito da Variação das Temperaturas de Cura (T_{cura})

A quantidade de calor fornecida pelo *laser* de IR, durante um certo período, gera um volume de resina curado. A estequiometria da amostra é um fator determinante para a boa cura no sistema, isto é, na proporção mais adequada a cura estabelece uma região solidificada homoganeamente.

De encontro com a variável analisada neste item, a Temperatura de Cura, estudos realizados experimentalmente por SCARPARO *et al.* (1995) constataram que a reação de cura será tão mais rápida quanto maior for a temperatura ambiente (externa ao sistema). Este experimento foi realizado com equipamentos e instrumentos como um *laser* de H_eNe , um tipo especial de termopar a baixa temperatura, detector para faixa visível do espectro, registrador de temperatura, osciloscópio com placa de aquisição de dados e o sistema óptico necessário.

Um pequeno volume da amostra de alta viscosidade foi aquecido em um recipiente envolvido por uma cinta térmica de aquecimento e, desta forma, foi possível o monitoramento, pelo termopar, da temperatura no volume da amostra em função do tempo de aquecimento. Todos estes procedimentos foram executados para diferentes temperaturas externas. Os dois objetivos do experimento foram a averiguação da variação da temperatura da amostra em função do tempo de cura e a detecção do início da cura na amostra utilizando como suporte o princípio da transmissividade do *laser*. Tal estudo foi

fundamental para tornar possível prever o perfil do processo de cura e verificar o comportamento da amostra durante o processo de cura, em função do tempo e temperatura. O experimento confirma também a intensa variação de energia interna do sistema.

As amostras, com temperaturas iniciais ambientes, foram experimentadas sob diferentes temperaturas externas constantes nos valores de 44°C, 57°C, 65°C, 73°C e 80°C. O comportamento da amostra para estas condições pode ser consultado no Apêndice C.

Ainda segundo SCARPARO *et al.* (1995), o gráfico revela que as amostras iniciam a cura entre valores de temperatura de 60°C e 100°C e, a partir deste patamar, as amostras começam a sofrer um aumento exponencial de suas temperaturas internas, o que comprova a reação exotérmica. O aumento da temperatura, a qual é traduzida como calor, e conseqüente aumento de energia interna do sistema, é oriundo da formação de ligações químicas entre o grupo epóxi e as aminas.

Todo este processo compreende reações que consomem calor, com a quebra de ligações do oxigênio do grupo epóxi e a quebra de ligações do hidrogênio da amina. Sucodem-se, também, reações que liberam energia (exotérmicas), como, por exemplo, a formação do grupo hidroxila (ligação entre o hidrogênio proveniente da amina com o oxigênio do grupo epóxi) e a ligação entre a amina com um grupo epóxi.

As variações da Fração de Conversão e da Taxa de Reação de Cura versus o Tempo de Aquecimento, para diferentes temperaturas isotérmicas de cura empregadas, são mostradas nas Figuras 7.5 a 7.19, respectivamente. Os valores obtidos são utilizados para determinar a taxa de formação de gel e os parâmetros cinéticos para modelar o comportamento de cura da resina.

7.2 – Resultados Experimentais

As propriedades do material utilizado nos experimentos são mostradas a seguir na Tabela 7.1. Os nomes das variáveis do programa foram apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 7.1 – Propriedades Termofísicas usadas nos experimentos e nas simulações(amostras sem sílica)

VARIÁVEIS	VALORES	UNIDADES
A10	0.000359	W/cm.°C
A20	0.000359	W/cm.°C
E	50.9	KJ/mol
DH	395.5	J/g
DENS	1.155	g/cm ³
CP	1.41	J/g°C

Os valores considerados para as temperaturas de cura utilizados nos experimentos e nas simulações são mostrados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Temperaturas de Cura utilizadas nos experimentos e nas simulações.

TEMPERATURAS DE CURA (°C)
80
90
100
110
120
130

7.2.1 – A Fração de Conversão Experimental

A seguir, as Figuras 7.1 a 7.6 apresentam graficamente os resultados experimentais das Frações de Conversão, obtidos com o DSC.

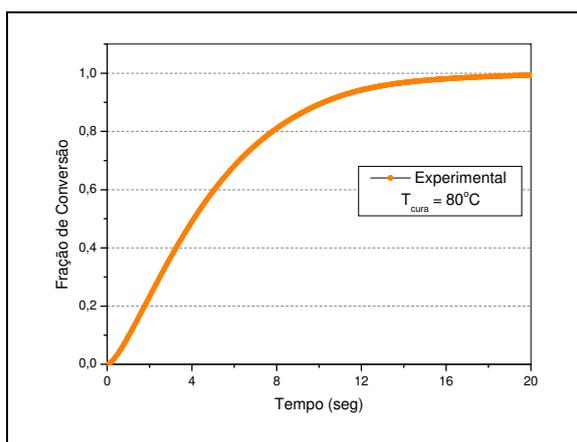


Figura 7. 1 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para Tcura=80°C – Experimental.

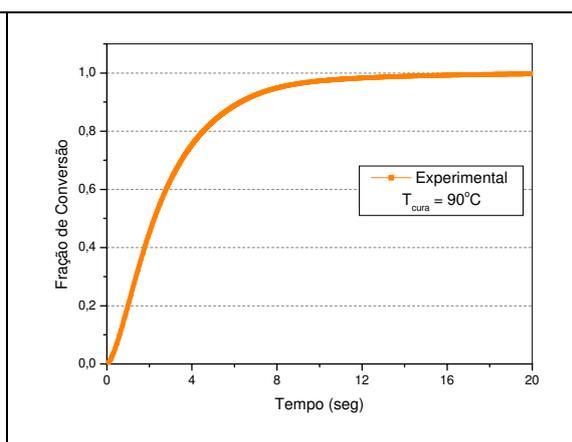


Figura 7. 2 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para Tcura=90°C – Experimental.

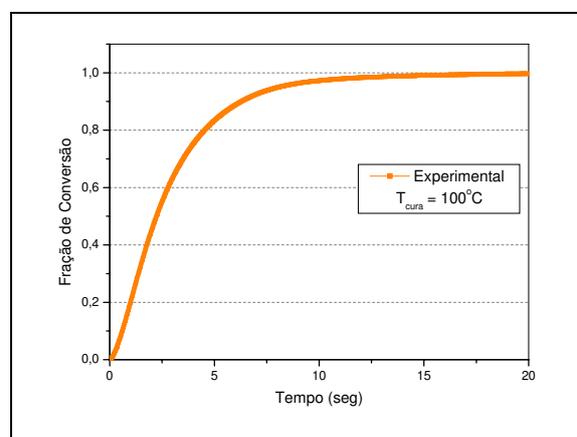


Figura 7. 3 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para Tcura=100°C – Experimental.

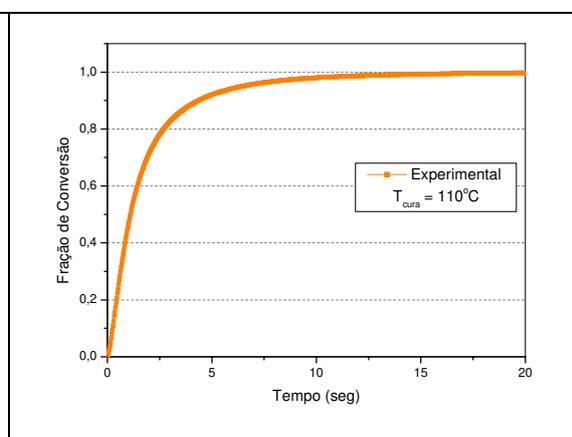


Figura 7. 4 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para Tcura=110°C – Experimental.

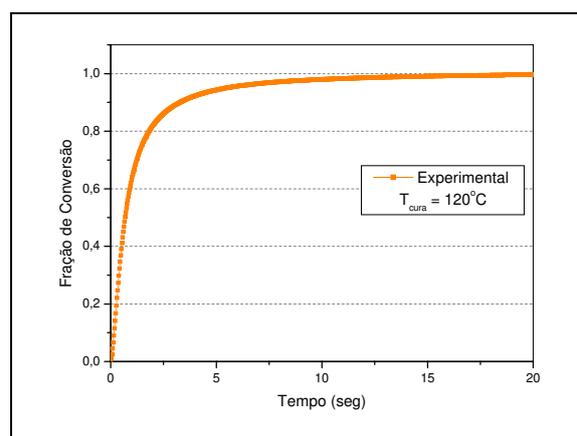


Figura 7. 5 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para Tcura=120°C – Experimental.

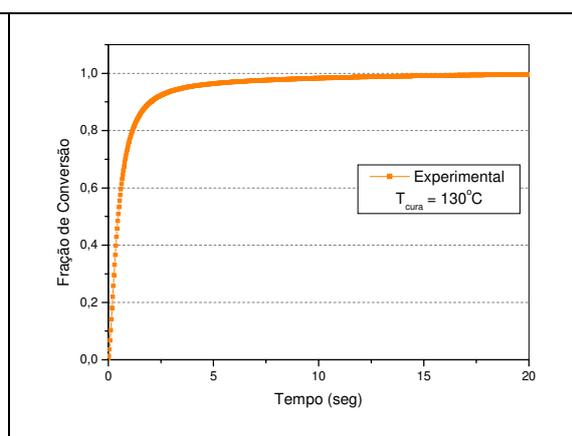


Figura 7. 6 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para Tcura=130°C – Experimental.

Os perfis de cura indicados nas Figuras 7.1 a 7.6 revelam que, como esperado, para altas temperaturas, a fração de conversão aumenta rapidamente, seguida por um progressivo decaimento até o perfil de cura atingir um platô correspondente ao máximo valor da fração de conversão. Este progressivo decaimento ocorre devido à limitação de difusão na mobilidade das espécies reativas quando a densidade das ligações cruzadas aumenta. Quando a cura progride, o volume livre é consumido por reações químicas, diminuindo o movimento das cadeias participantes na formação da rede tridimensional. Consequentemente, a temperatura de transição vítrea do sistema aumenta, aproximando da temperatura de cura. Quando a T_g iguala a temperatura isotérmica de cura, o sistema vitrifica. Após a vitrificação a reação é muito lenta tornando-se controlada pelo fenômeno da difusão (a difusividade dos grupos reativos é drasticamente reduzida).

A Figura 7.7 mostra as Frações de Conversão obtidas com a variação de todas as temperaturas de cura.

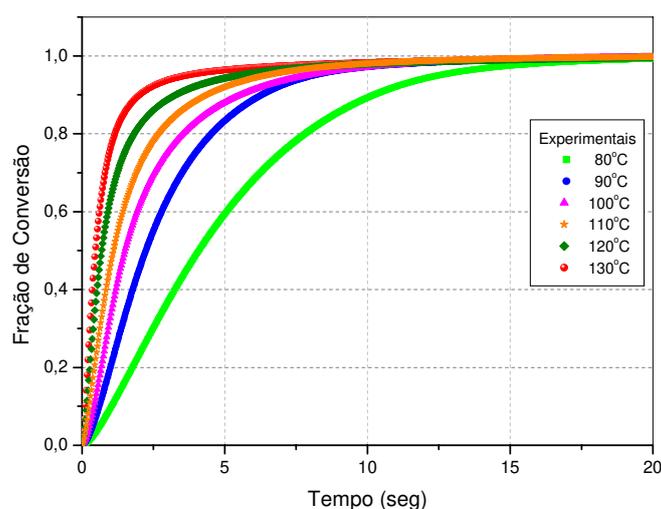


Figura 7.7 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas – Experimental.

É importante ressaltar na Figura 7.7, que a Fração de Conversão é contemplada mais rapidamente para as Temperaturas de Cura mais elevadas. Para a temperatura de 130°C, a curva de conversão é bastante íngreme atingindo um ponto médio de conversão em aproximadamente 0,4 segundos enquanto que, para a temperatura mais baixa, 80°C, este evento ocorre próximo de 4 segundos.

Para a cura completa, o ensaio a 130°C, necessita de um tempo de 2,72 segundos para a sua conversão total. Em relação ao outro extremo de temperatura, 80°C, o tempo supera 30 segundos, sendo que em 16 segundos, apenas 89% desta amostra foi convertida. Em termos médios, à temperatura mais baixa, a amostra demora cerca de 11vezes mais tempo para se converter integralmente.

7.2.2 – A Taxa de Reação de Cura Experimental

A seguir, as Figuras 7.8 a 7.14 apresentam graficamente os resultados experimentais da Taxas de Reação.

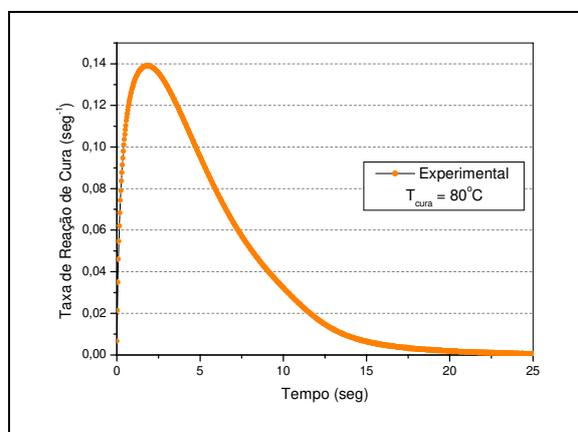


Figura 7. 8 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}C$ – Experimental.

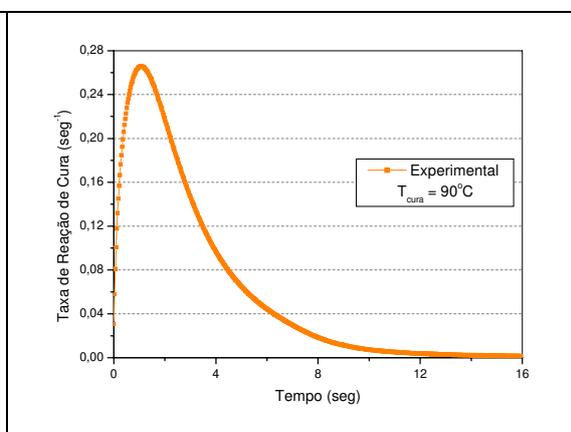


Figura 7. 9 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}C$ – Experimental

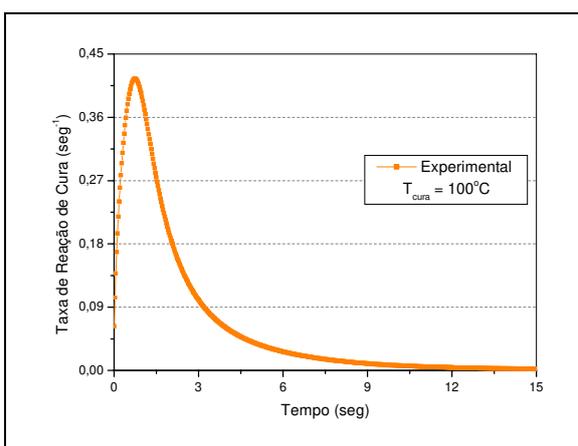


Figura 7. 10 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}C$ – Experimental.

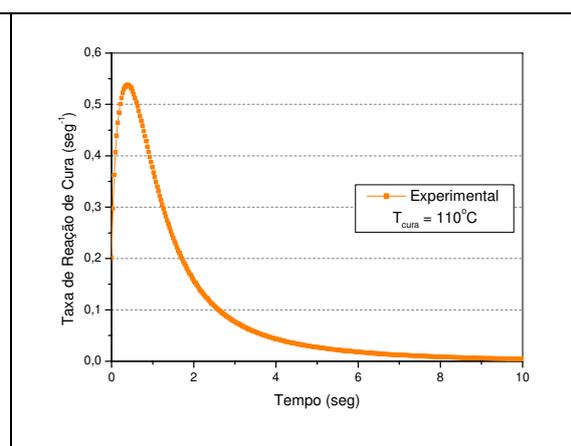
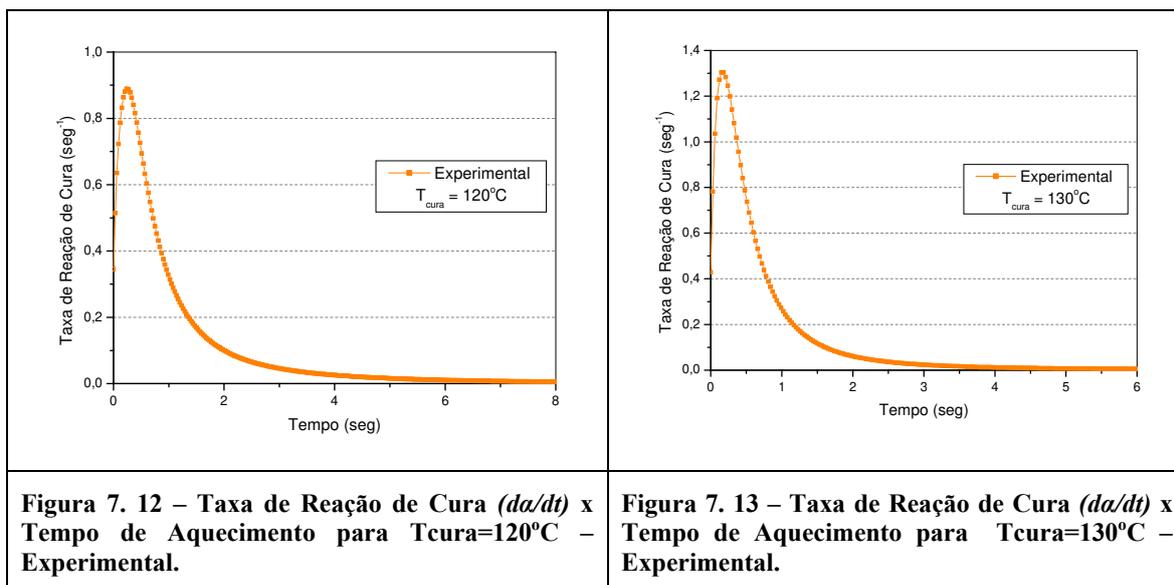


Figura 7. 11 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=110^{\circ}C$ – Experimental.



A velocidade da reação é tão mais rápida quanto mais alta for a temperatura de cura. Para temperaturas mais baixas, o tempo para ocorrer a reação é bastante acentuado. Enquanto para $T_{cura} = 130^{\circ}\text{C}$, a taxa de reação alcança um valor máximo aproximado de $1,3\text{ s}^{-1}$ em $0,15\text{ s}$, para a $T_{cura} = 80^{\circ}\text{C}$, a taxa máxima é de $0,14\text{ s}^{-1}$ em $1,86\text{ s}$, ou seja, a maior temperatura de cura atinge uma taxa de reação 9 vezes maior que a menor temperatura.

A Figura 7.14 ilustra as Taxas de Reação obtidas com a variação de todas as temperaturas de cura.

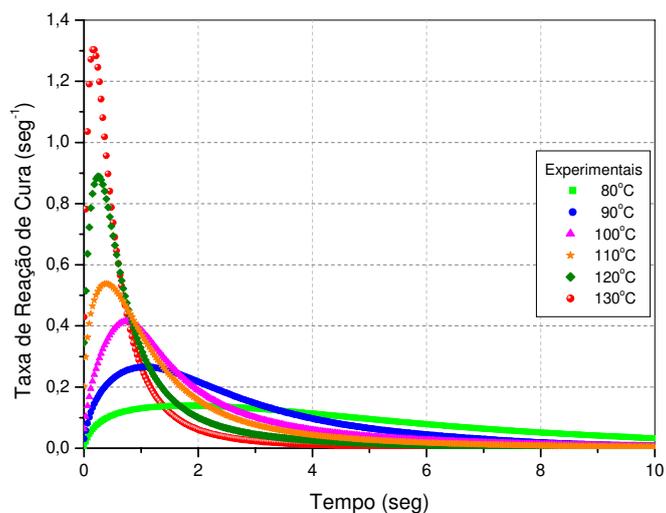


Figura 7. 14 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas – Experimental.

7.2.3 – Fração de Conversão x Taxa de Reação de Cura Experimental

A Figura 7.15 ilustra o perfil entre a Fração de Conversão e a taxa de Reação para o caso experimental.

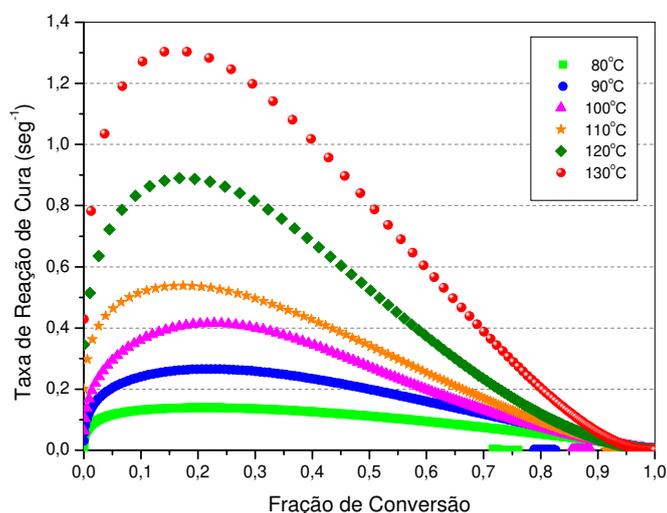


Figura 7. 15 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Fração de Conversão para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas – Experimental.

A Tabela 7.3 aponta os valores máximos da taxa de reação para as diferentes temperaturas de cura e os respectivos tempos gastos.

Tabela 7.3 – Sumário dos valores máximos das taxas de cura.

Temperatura de cura (°C)	$(d\alpha/dt)_{\text{máx}}$ (s ⁻¹)	Tempo (s)
80	0,14	1,86
90	0,27	1,05
100	0,41	0,75
110	0,54	0,39
120	0,89	0,24
130	1,30	0,15

7.3 – Resultados Obtidos por Simulações no Modelo Cinético STLG-FEM

O Modelo Cinético STLG-FEM foi instrumento fundamental neste trabalho no que tange a análise das características cinéticas da composição adotada no presente estudo. Foram estudadas, basicamente, as variações das Temperaturas de Cura e a presença ou não do fenômeno da difusão na amostra.

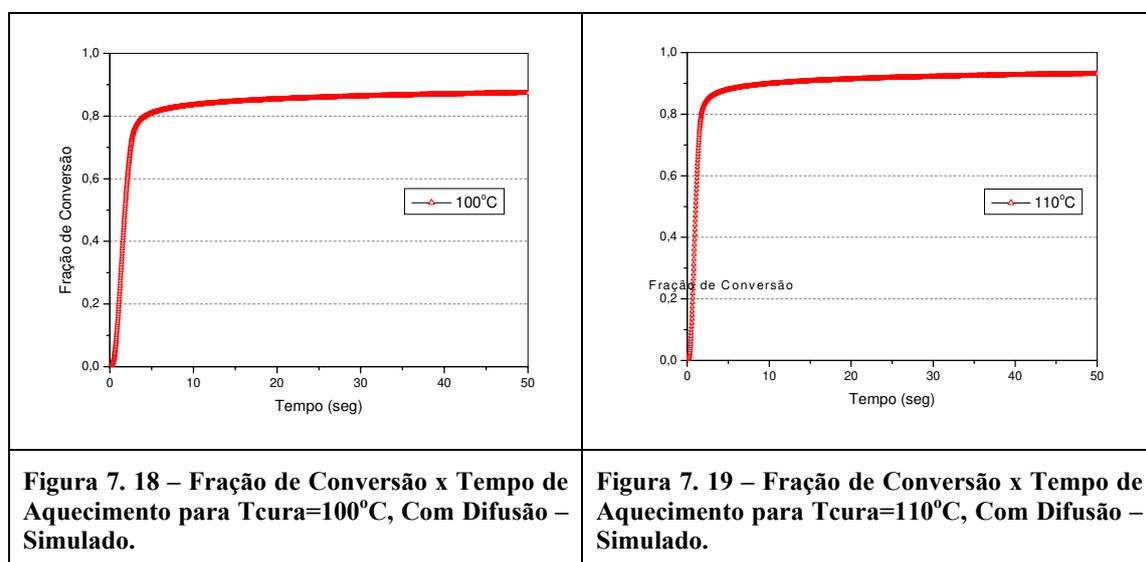
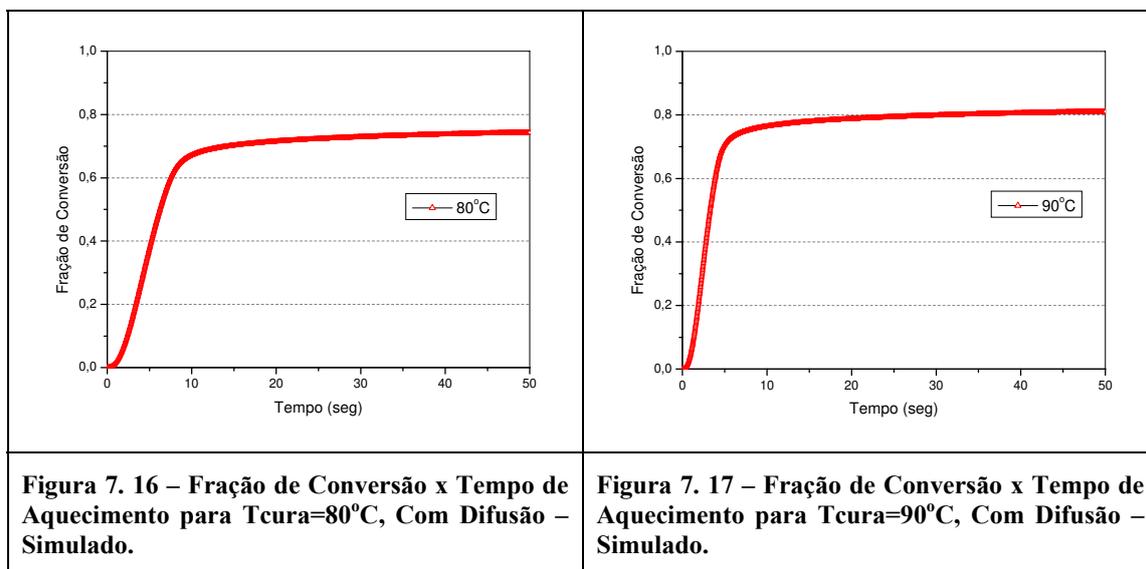
As simulações realizadas apresentam a relação entre a temperatura no interior de um volume da amostra para várias temperaturas externas ao sistema e a velocidade de cura da resina. O cenário geral das simulações está descrito na Tabela 7.4

Tabela 7.4 – Condições das Simulações.

Sistema Plano
Material sem Sílica
Malha 15x5 elementos e 96 nós
Análise Isotérmica
Efeito de Difusão
Temperatura inicial em todos os nós de 20°C

7.3.1 – Fração de Conversão por Simulação

As Figuras 7.16 a 7.22 mostram as frações de conversão obtidas através das simulações em função das temperaturas de cura.



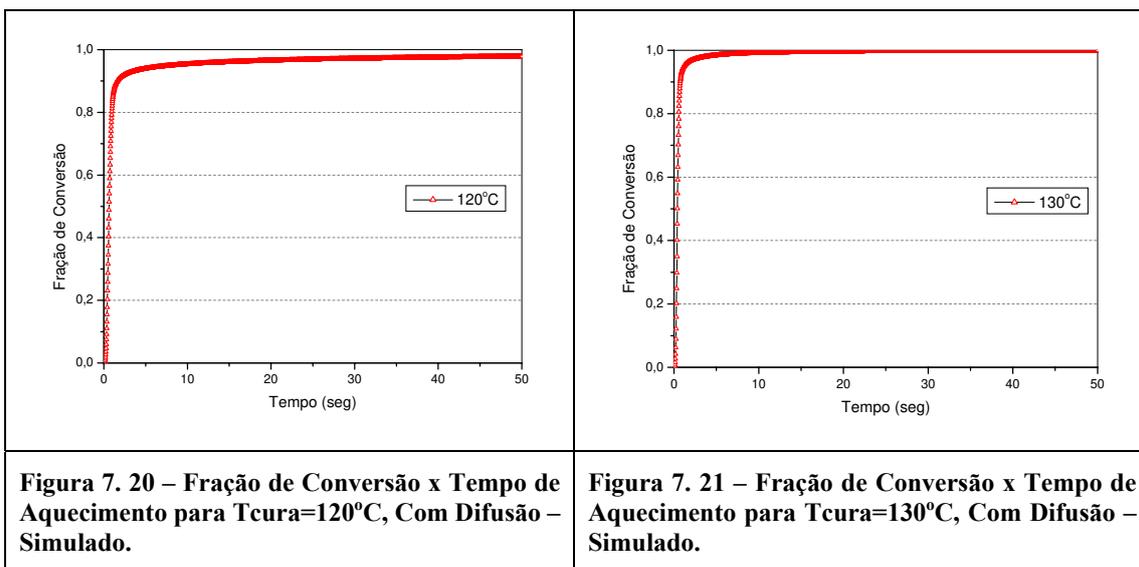


Figura 7. 20 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}C$, Com Difusão – Simulado.

Figura 7. 21 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}C$, Com Difusão – Simulado.

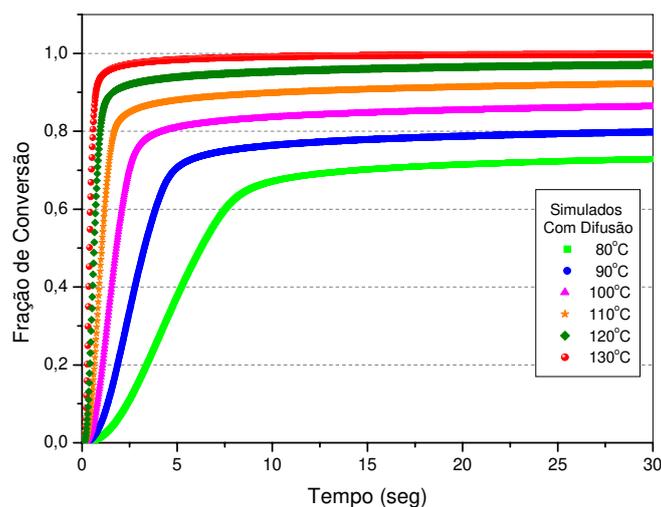


Figura 7. 22 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulado.

Seguindo a mesma tendência do caso experimental, as simulações mostram que quanto menor a temperatura, mais demorada é a conversão do material.

7.3.2 – Simulação da Taxa de Reação de Cura

As taxas de reação obtidas nas simulações são mostradas nas Figuras 7.23 a 7.29.

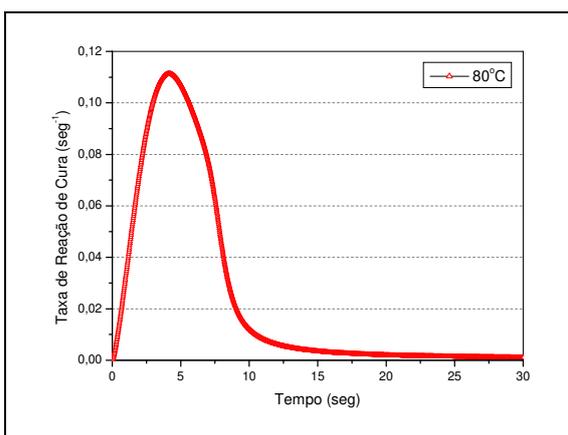


Figura 7. 23 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.

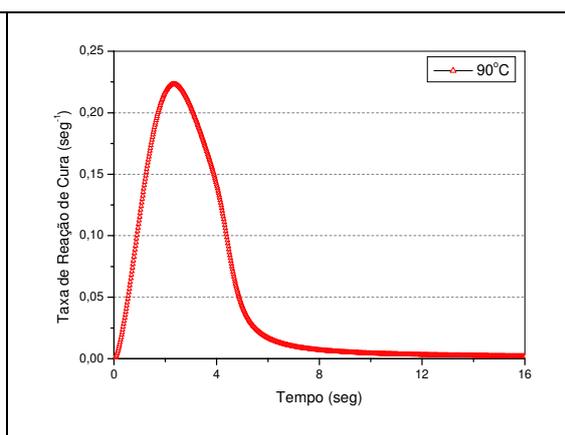


Figura 7. 24 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.

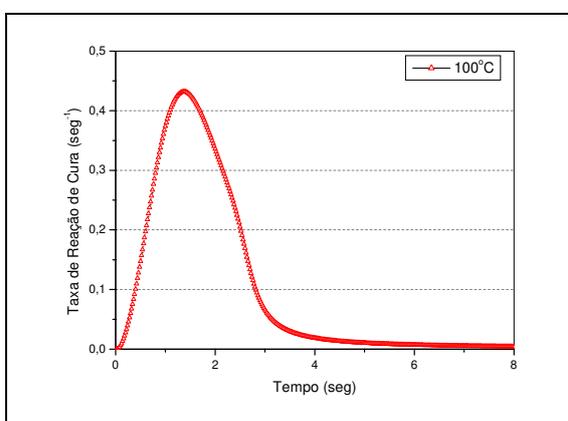


Figura 7. 25 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.

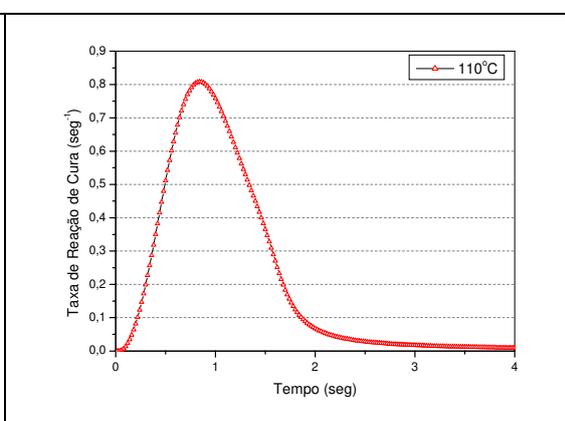


Figura 7. 26 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=110^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.

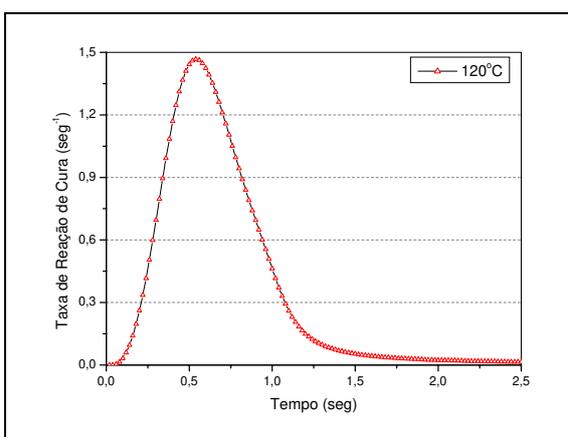


Figura 7. 27 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.

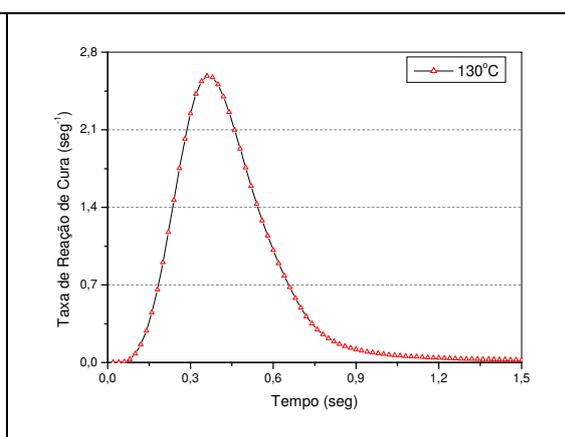


Figura 7. 28 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}\text{C}$, Com Difusão – Simulado.

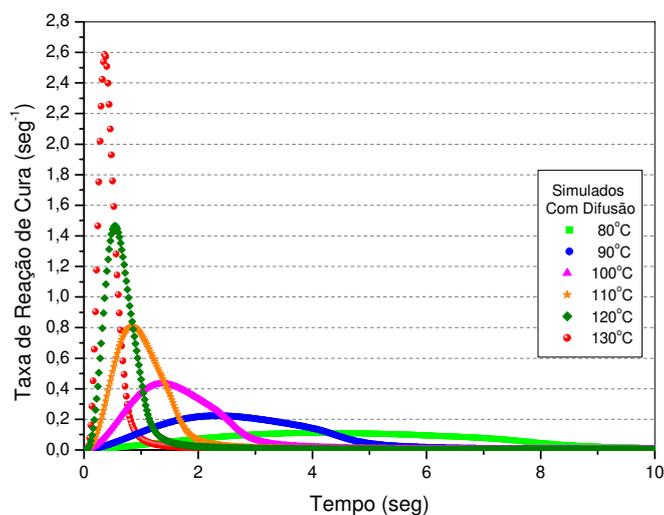


Figura 7.29 – Taxa de Reação de Cura ($d\alpha/dt$) x Tempo de Aquecimento para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulado.

Para $T_{cura} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, a taxa de reação alcança um valor máximo aproximado de $2,6\text{ s}^{-1}$ em $0,36\text{ s}$. Para $T_{cura} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, a taxa máxima é de $0,11\text{ s}^{-1}$ em $4,16\text{ s}$, o que corresponde que a temperatura de cura de $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ atinge uma taxa de reação 23 vezes maior que a menor temperatura.

A Tabela 7.5 apresenta os valores sumarizados das Taxas de Reação e de T_p (tempo gasto para que ocorram).

Tabela 7.5 – Sumário dos valores máximos simulados das Taxas de Reação de Cura e de T_p .

Temperatura de Cura ($^{\circ}\text{C}$)	$(d\alpha/dt)_{m\acute{a}x}$ (s^{-1})	T_p (s)
80	0,111	4,16
90	0,223	2,36
100	0,432	1,4
110	0,804	0,8
120	1,460	0,54
130	2,585	0,36

7.3.3 – Fração de Conversão x Taxa de Reação de Cura (Simulação)

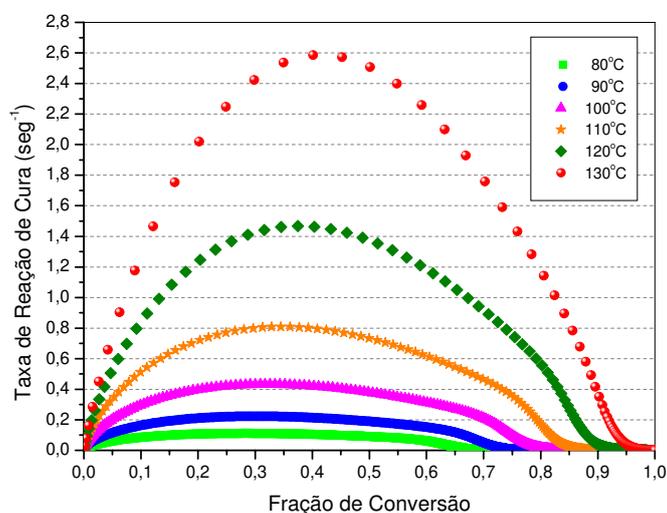


Figura 7. 30 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Fração de Conversão para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulação.

7.3.4 – Taxa de Reação de Cura Máxima x Temperaturas de Cura (Simulação)

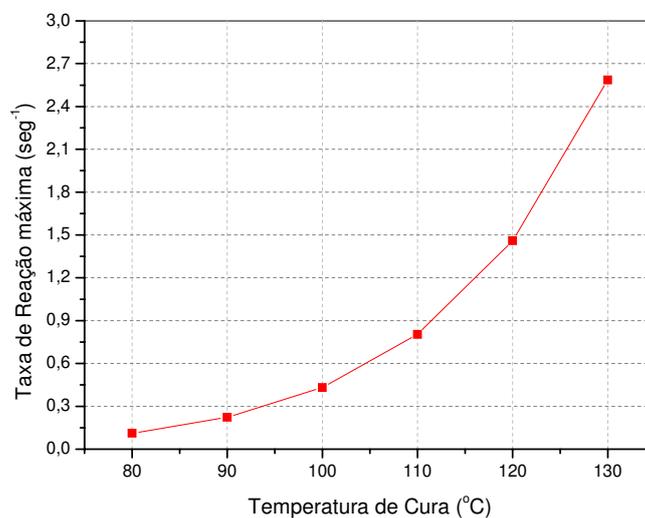


Figura 7. 31 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Temperatura de Cura para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulação.

Percebe-se pela Figura 7.31 que a elevação da temperatura de cura ocasiona uma maior taxa de reação de cura. Para os extremos tem-se que, a 80°C, a taxa de reação é correspondente a um valor de 0,111 s⁻¹ e, a 130°C, a mesma taxa é equivalente a 2,585 s⁻¹.

Para a faixa de temperaturas apresentadas na figura acima, a taxa de reação respeita um crescimento exponencial.

Estes resultados mostram claramente que a taxa de reação aumenta exponencialmente com o aumento de 10°C na temperatura de cura.

7.3.5 – Tempo Mínimo de Cura (T_p) x Temperaturas de Cura

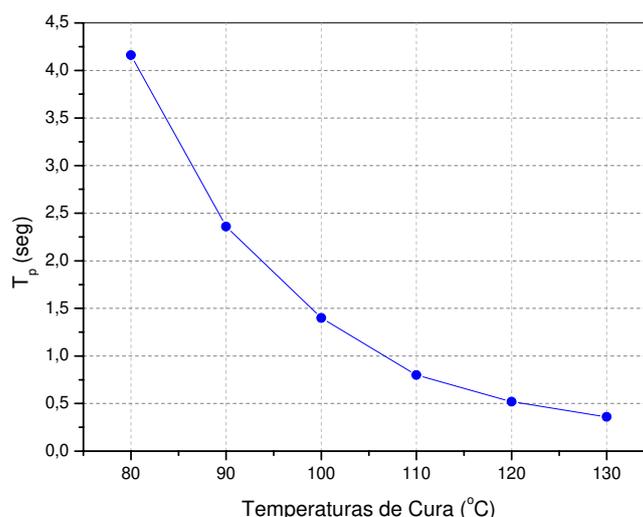


Figura 7. 32 – Tempo requerido para a Cura (T_p) x Temperatura de Cura para todas as Temperaturas Isotérmicas de Cura analisadas (Com Difusão) – Simulado.

onde T_p é o tempo necessário para se atingir o valor máximo da reação de cura.

Pode-se verificar na Figura 7.32 que o tempo requerido para se atingir a total reação de cura decresce, conforme a curva apresentada, à medida que os valores das temperaturas de cura aumentam.

A uma temperatura de 80°C, o tempo necessário para a reação de cura máxima é de 4,16 segundos, enquanto que, para o outro extremo, 130°C, leva-se um tempo de 0,36 segundos.

7.4 – Validação do Modelo Cinético

Os resultados experimentais realizados em experimentos prévios (SCARPARO *et al.*, 1995) são, agora, utilizados para a validação das simulações de predição do Modelo Cinético, o qual descreve o comportamento da reação de cura da resina epóxi, através de comparações, entre os resultados experimentais e computacionais, dos respectivos perfis obtidos com a variação das Temperaturas de Cura.

Estes parâmetros foram investigados para validação do modelo considerando os resultados experimentais previamente obtidos. Os valores dos parâmetros do material utilizado nestas simulações são indicados na Tabela 7.1. Alguns destes valores foram determinados experimentalmente (a profundidade de absorção óptica e a condutividade térmica), contudo outros foram obtidos de fontes literárias (o calor específico e a densidade de massa).

Neste caso, o programa STLG-FEM foi usado para descrever o tempo necessário para obter uma cura completa para uma camada de resina epóxi contendo 1,4% (em peso) de termo iniciador (dietilenotriamina), a qual foi aquecida por diferentes temperaturas externas. Em cada simulação, prevaleceram as mesmas condições, alterando as temperaturas de aquecimento externa. Uma camada simples de 20 elementos retangulares foi utilizada para modelar o problema (a dimensão de cada elemento foi: dimensão horizontal = 0.01 cm e dimensão vertical = 0.0025 cm). Finalmente, o transiente de análise foi estimado considerando 1500 incrementos de 0.02 s.

As Figuras 7.33 a 7.44 comparam os valores das frações de conversão prevista pelo modelo cinético da equação 6.8 com aquelas obtidas experimentalmente como função do tempo de aquecimento. Como observado, uma boa concordância é obtida durante os estágios iniciais da reação de cura, com desvios significantes para temperaturas mais baixas.

A simulação apresentada no item 7.4.1 não prevê efeito de difusão.

7.4.1 – Fração de Conversão

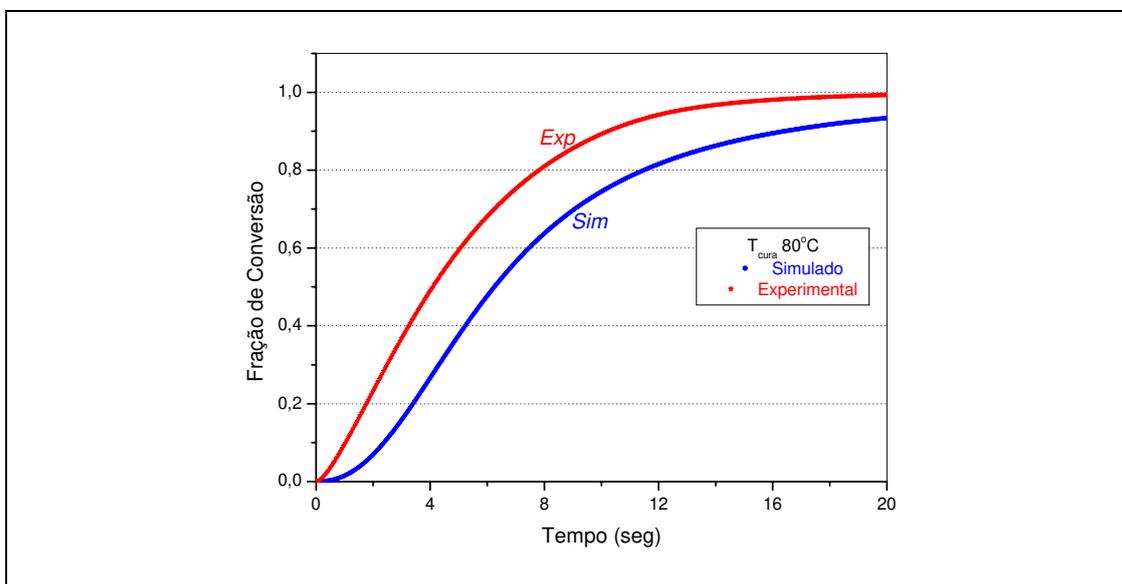


Figura 7. 33 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

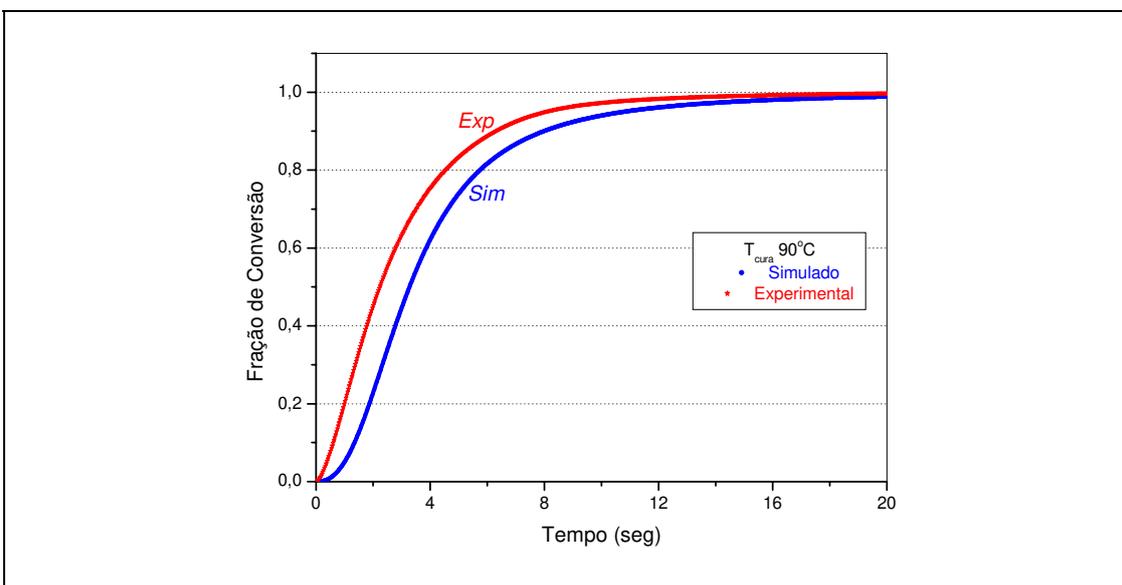


Figura 7. 34 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

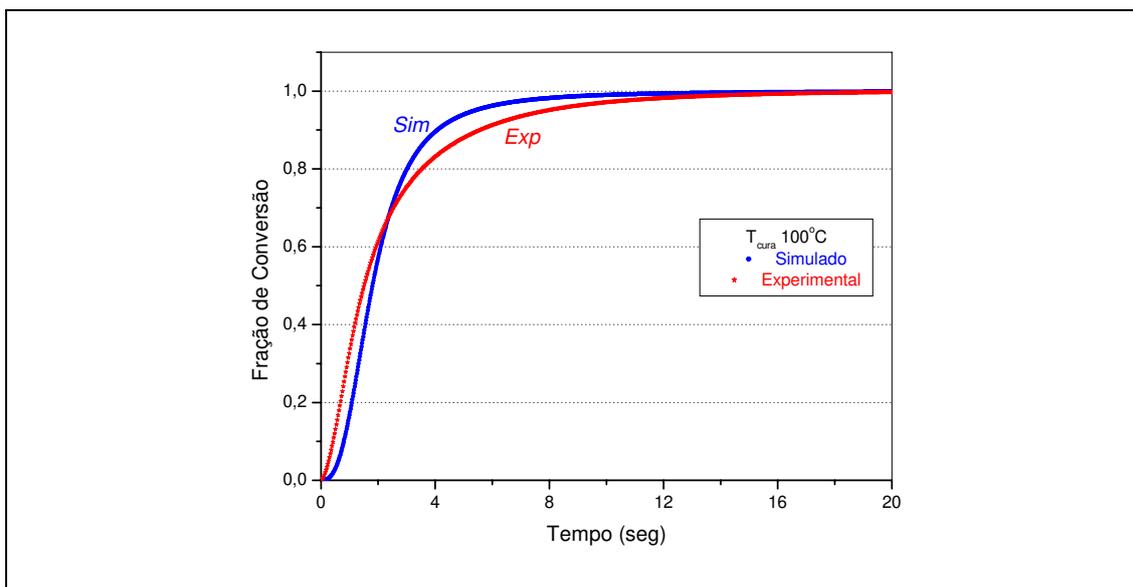


Figura 7. 35 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

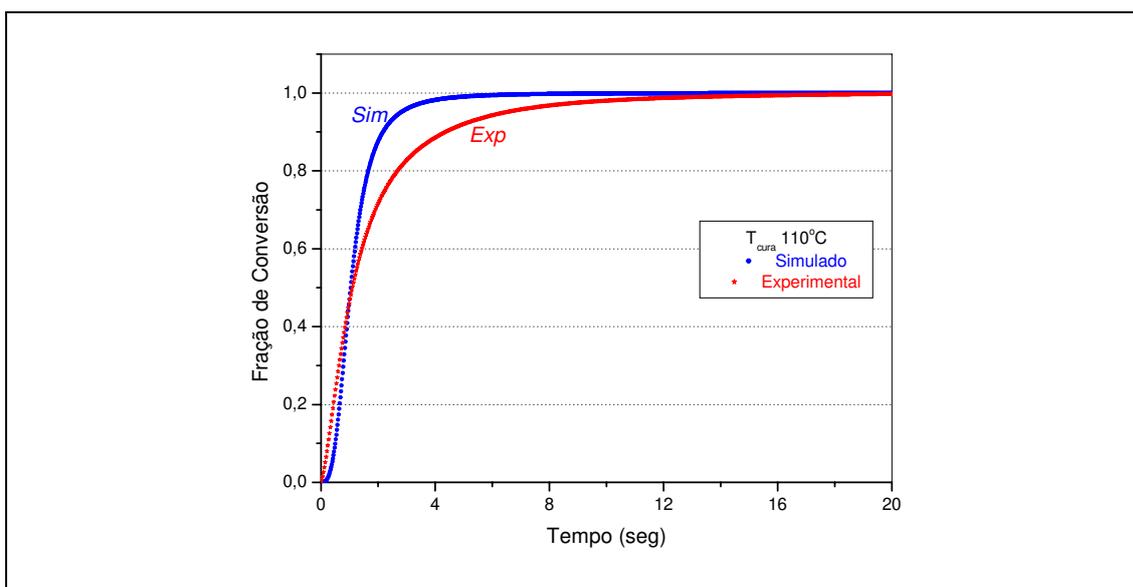


Figura 7. 36 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=110^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

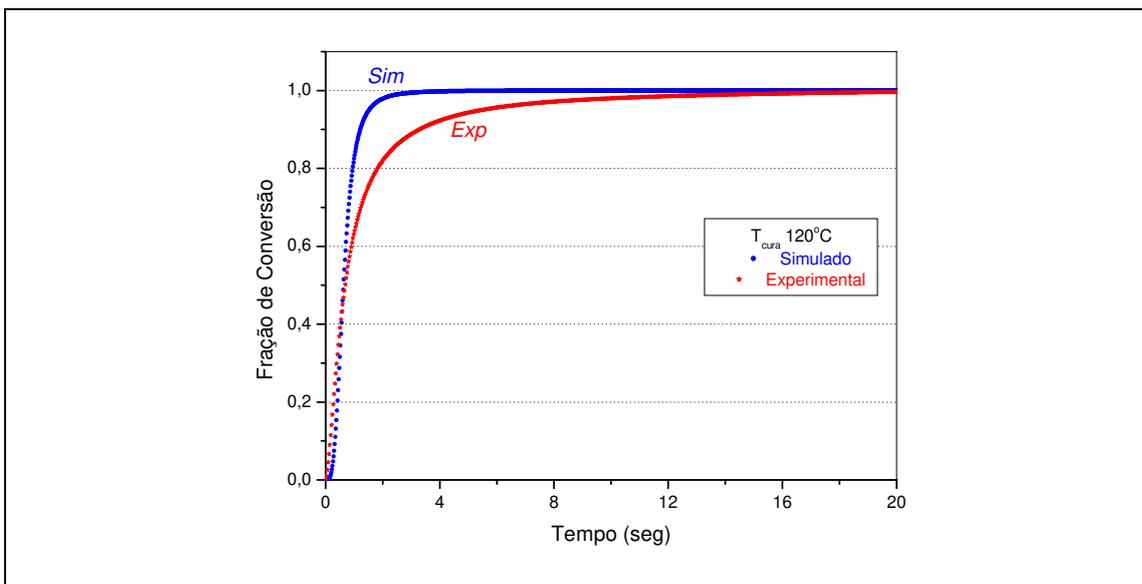


Figura 7. 37 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

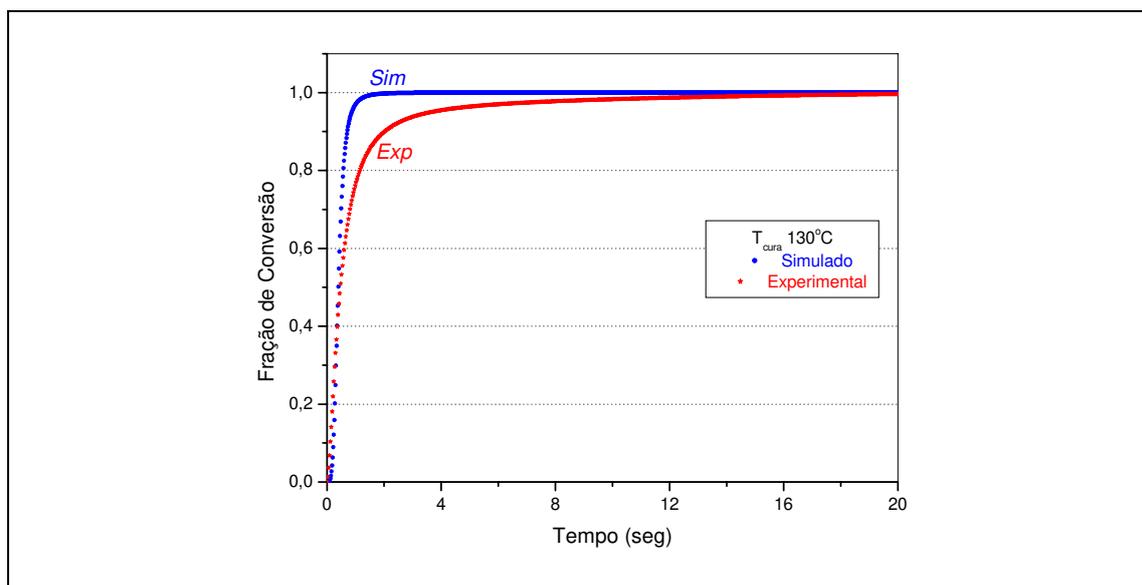


Figura 7. 38 – Fração de Conversão x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

Para os casos das temperaturas de cura de 80°C e 90°C , a fração de conversão experimental para estes casos é mais rápida que a simulada. A partir de 100°C inclusive, há uma inversão nesta tendência, em que as frações de conversão simuladas são mais rápidas.

7.4.2 – Taxa de Reação de Cura

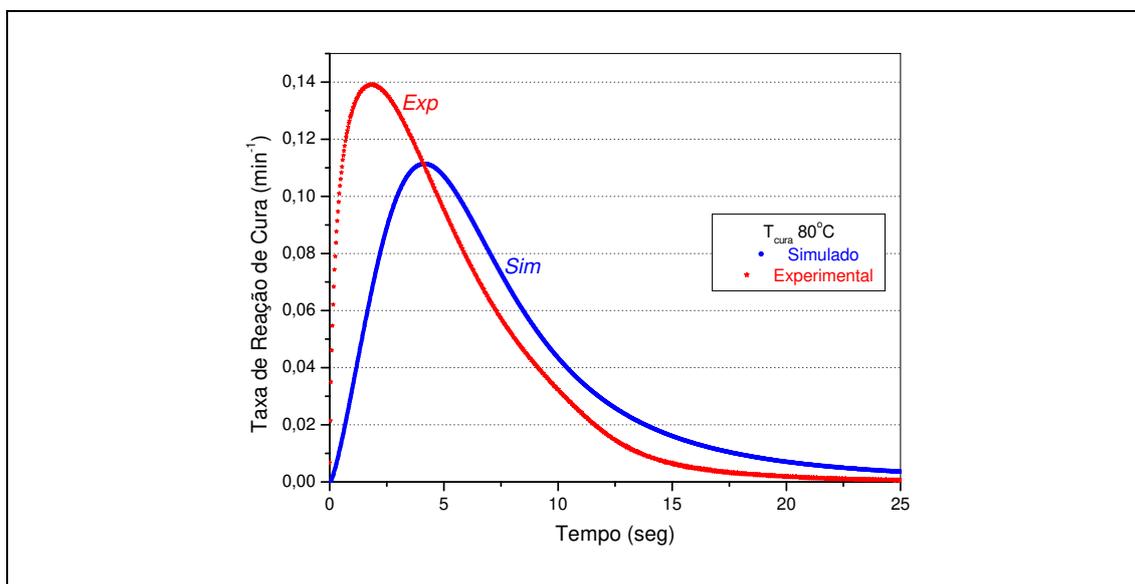


Figura 7. 39 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=80^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

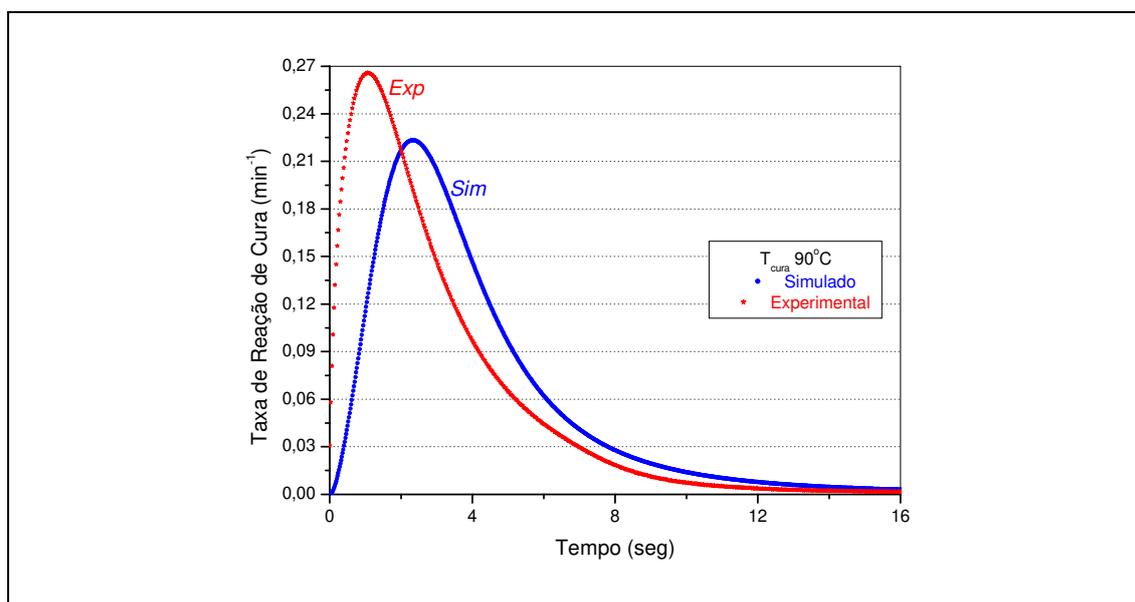


Figura 7. 40 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=90^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

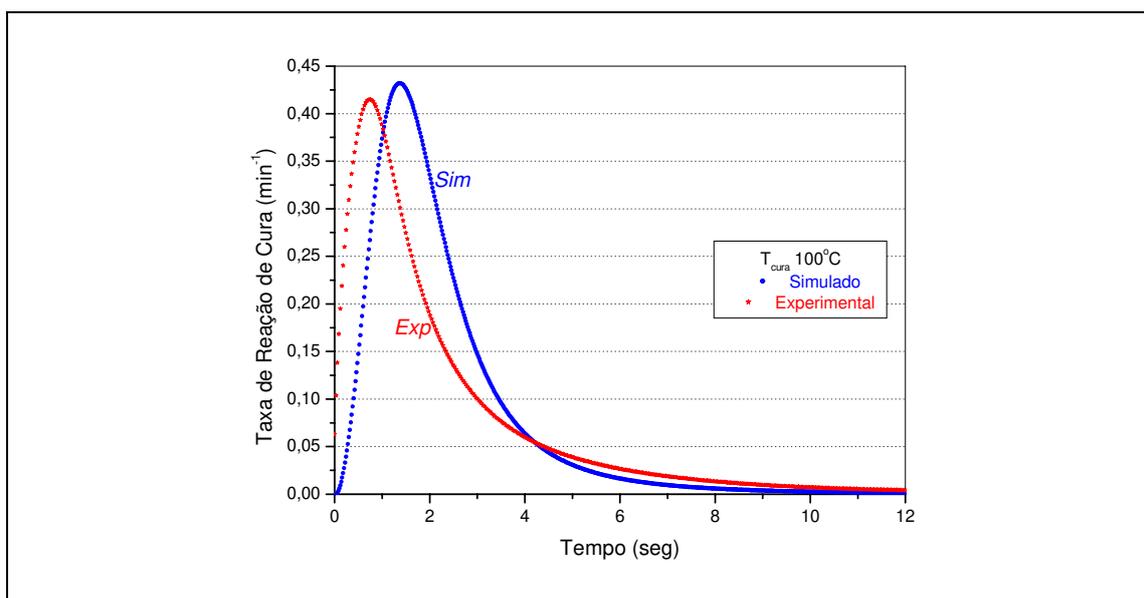


Figura 7. 41 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=100^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

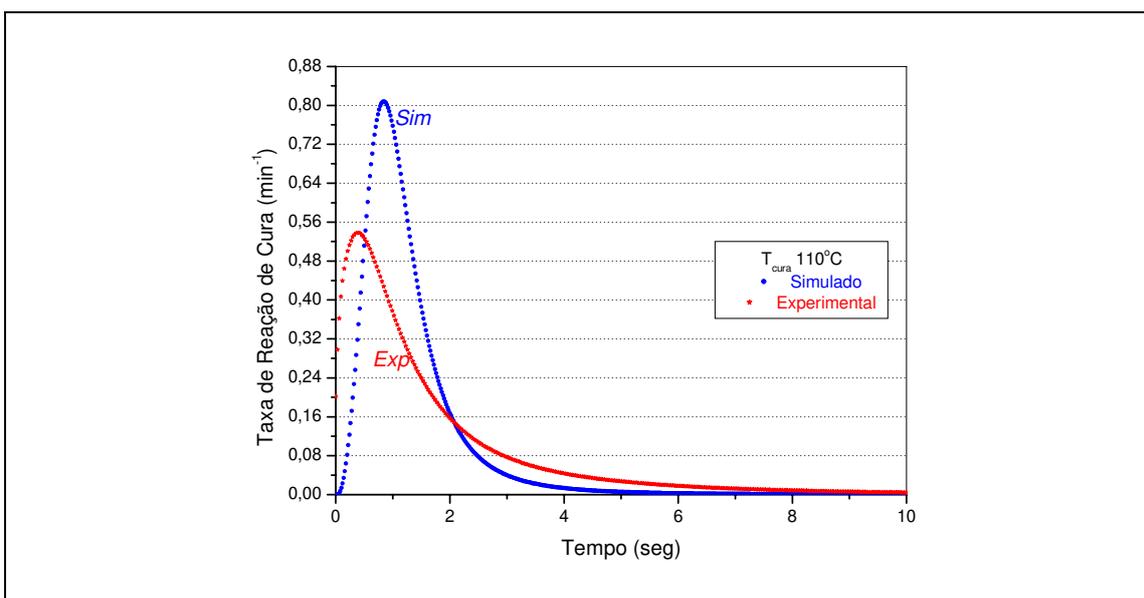


Figura 7. 42 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura} =110^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

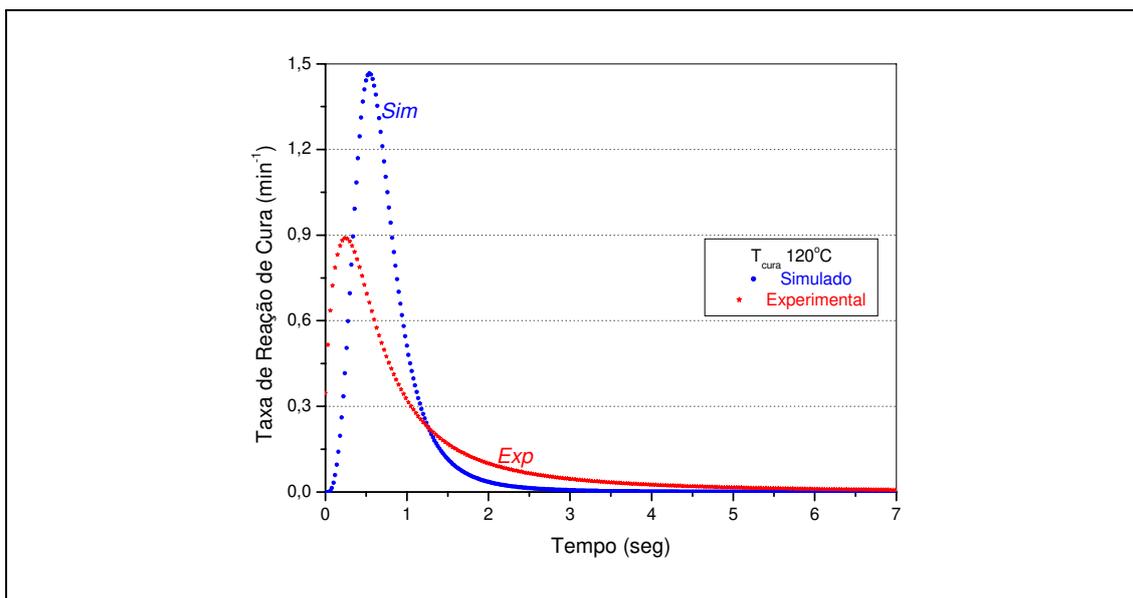


Figura 7. 43 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=120^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

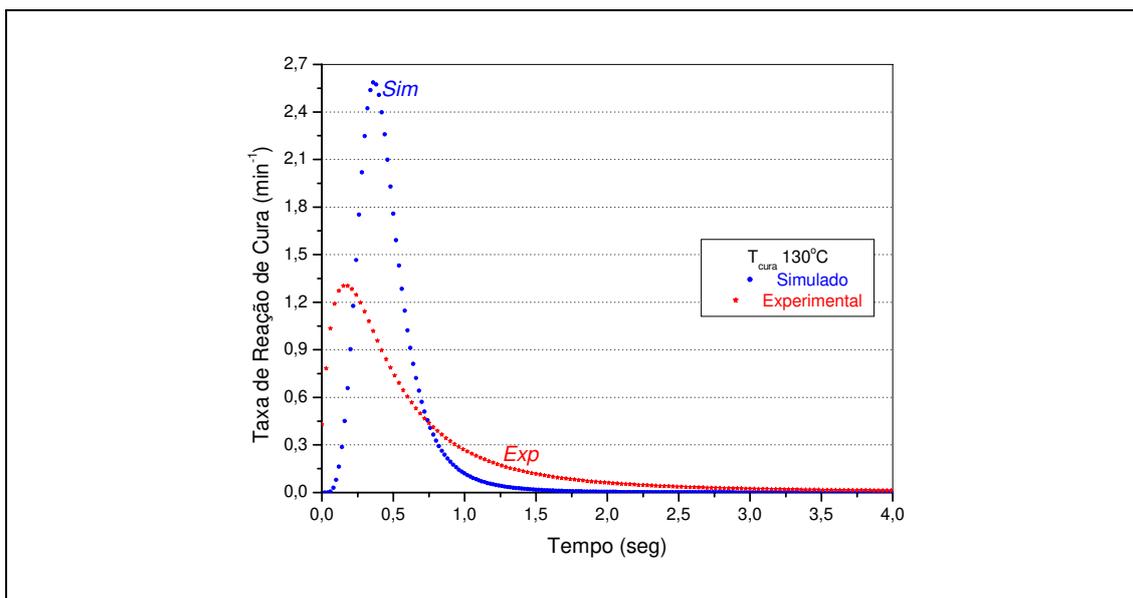


Figura 7. 44 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para $T_{cura}=130^{\circ}\text{C}$ – Experimental vs Simulado sem difusão.

Para temperaturas de cura de 80°C e 90°C , a velocidade da reação experimental máxima é mais rápida que a simulada. A partir de 100°C inclusive, esta tendência inverte-se, ou seja, as taxas de reação simuladas máximas passam a ser mais elevadas.

A Tabela 7.6 lista os valores das Taxas de Cura e de T_p obtidos experimentalmente e por simulação.

Tabela 7. 6 – Valores máximos das taxas de cura.

Temperaturas (°C)	Valores			
	Experimentais		Simulados	
	$(d\alpha/dt)_{\text{máx}}$ (s ⁻¹)	T_p (s)	$(d\alpha/dt)_{\text{máx}}$ (s ⁻¹)	T_p (s)
80	0,14	1,86	0,111	4,16
90	0,27	1,05	0,223	2,36
100	0,41	0,75	0,432	1,4
110	0,54	0,39	0,804	0,8
120	0,89	0,24	1,460	0,54
130	1,30	0,15	2,585	0,36

A Figura 7.57 ilustra a relação entre a taxa de reação e as temperaturas de cura entre os dois casos (experimental e simulado). Em 100 °C, a inversão de tendência é notória e, ao final, em 130 °C, a velocidade da reação experimental é praticamente o dobro da simulada.

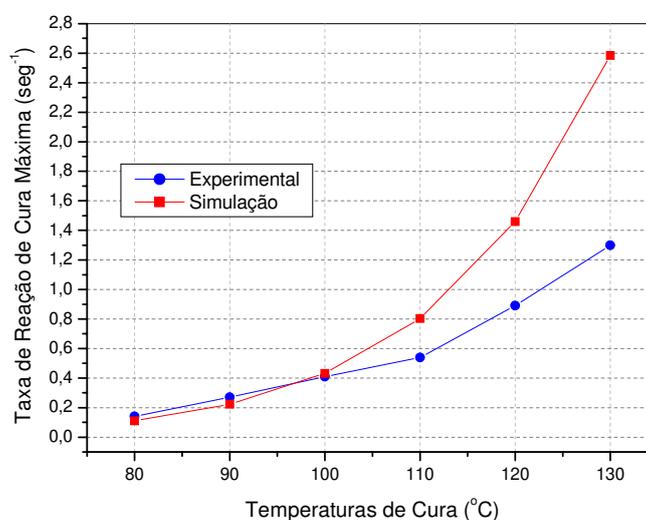


Figura 7. 45 – Taxas de Reação de Cura Máxima x Temperaturas Isotérmicas de Cura para os casos Experimental e Simulado.

A Figura 7.58 ilustra a relação entre o tempo para a cura máxima e as respectivas temperaturas de cura. Os tempos para os casos experimentais são sempre maiores que os do caso simulado.

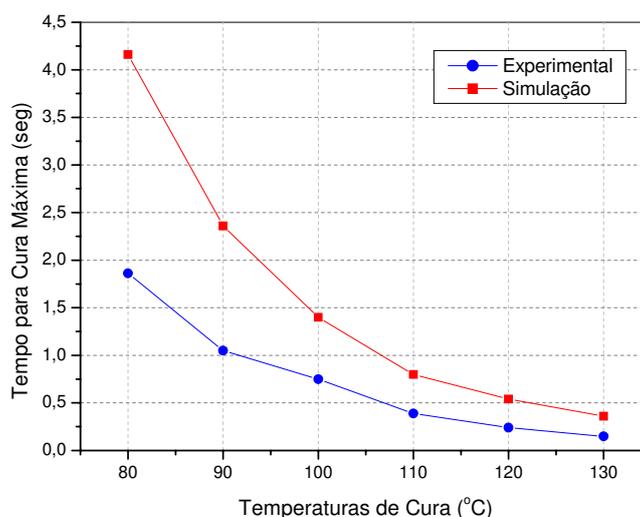


Figura 7. 46 – Tempos para Cura Máxima x Temperaturas Isotérmicas de Cura para os casos Experimental e Simulado.

7.5 – O Efeito de Difusão na Amostra

Durante a reação de cura de um material termossensível, as espécies moleculares originam ligações cruzadas para formar a rede tridimensional. Inicialmente, esta reação é quimicamente controlada, quando a taxa da reação depende somente da reatividade e concentração das espécies do sistema. Contudo, quando a reação prossegue, a viscosidade do meio aumenta e a taxa de cura torna-se altamente dependente não somente da reatividade, mas também da difusividade das espécies presentes no sistema. Entretanto, a reação move-se para um regime onde a taxa é controlada por uma difusão limitada.

O efeito da difusão controlada é usualmente incorporado na equação 6.1 com o termo cinético geral que inclui ambos o controle químico e o controle de difusão:

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_q} \quad 7.1$$

onde k_e é a taxa constante global, k_d é a taxa constante por difusão controlada e k_q é a taxa constante quimicamente controlada. Normalmente, a constante da taxa k_d é

somente uma função da temperatura e conversão, entretanto, a taxa quimicamente controlada é uma função da temperatura, concentração do iniciador, e intensidade de luz ou calor irradiado.

Diferentes equações são propostas para descrever a constante da taxa de difusão controlada (WISANRAKKIT e GILHAM, 1990; 1991). O termo k_d é relacionado com a mobilidade molecular, e envolve o termo $(T - T_g)$: k_d torna-se mais importante quando a temperatura de transição vítrea T_g aproxima e eventualmente ultrapassa a temperatura de cura T .

Outra abordagem (HUGUENIN e KLEIN, 1985) para modelar a difusão dependente da cura de resinas epóxi e aminas com base na teoria de volume livre:

$$k_d = \frac{D_o}{k_{do}} \exp \left\{ b_D \left(1 - \frac{1}{f_g + \beta_f (T - T_g)} \right) \right\} \quad 7.2$$

onde D_o , k_{do} e b_D são constantes, β_f é uma constante que inclui o volume livre crítico necessário para difusão, e f_g é a fração de volume livre.

Consequentemente, vários outros autores decidiram derivar para mais simples modelos fenomenológicos que permitem simular ambas as reações químicas e por difusão controlada. Alguns destes (GONZALEZ-ROMERO e CASILLAS, 1989; KENNY e TRIVISANO, 1991) propuseram a seguinte equação cinética para simular o efeito de difusão controlada em matrizes epóxi de alto desempenho:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_o \exp \left(\frac{-E}{R \cdot T_{abs}} \right) \cdot (\alpha_{max} - \alpha)^n \quad 7.3$$

onde α_{max} representa a conversão final durante a reação de cura.

Outro modelo (BÁRTOLO, 2001) estabelece uma relação entre k_e e k_q do modelo de Rabinowitch (RABINOWITCH, 1936) que considera:

$$k_e = \psi k_q \quad 7.4$$

onde:

$$\psi = \frac{1}{1 + \exp[\xi\alpha - \alpha_d]} \quad 7.5$$

é a função de difusão controlada.

Introduzindo a taxa de reação global obtida no modelo preditivo, a seguinte relação que apresenta uma reação termo-iniciada é obtida:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{1 + \exp[\xi(\alpha - \alpha_d)]} k_o \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T_{abs}}\right) \alpha^m (1 - \alpha)^n \quad 7.6$$

onde ξ é a constante de difusão, α_d é o valor crítico da fração de conversão correspondente ao início do efeito de difusão controlada sobre a reação de cura. A validação deste modelo será discutida no próximo capítulo.

7.5.1 – Fração de Conversão: Efeito da Difusão

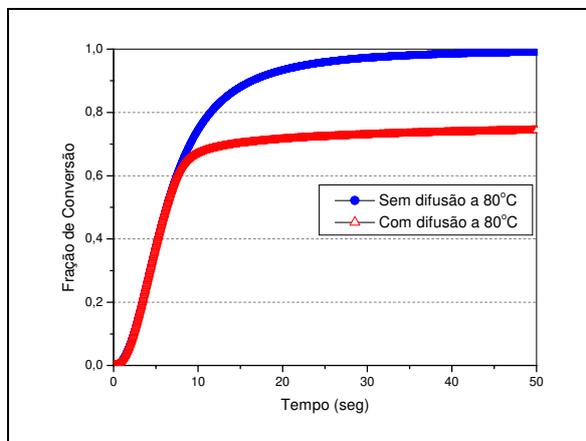


Figura 7. 47 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 80°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

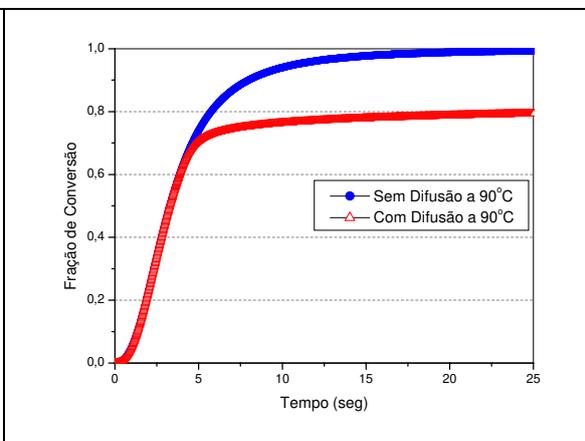


Figura 7. 48 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 90°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

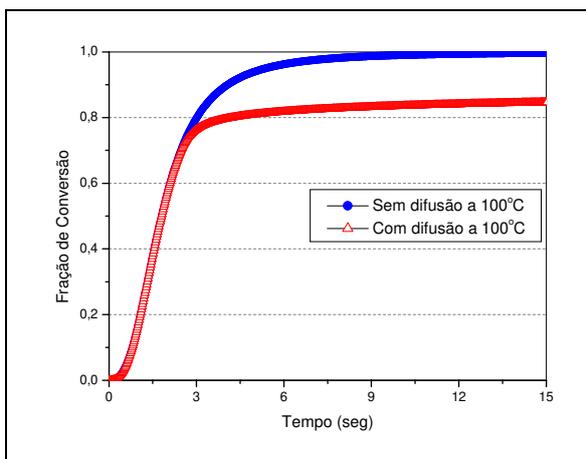


Figura 7. 49 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 100°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

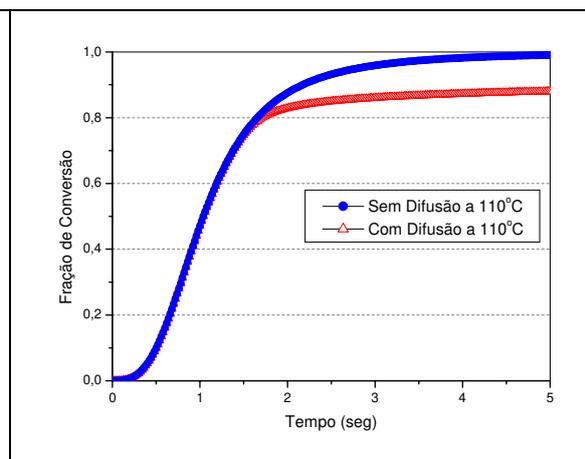


Figura 7. 50 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 110°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

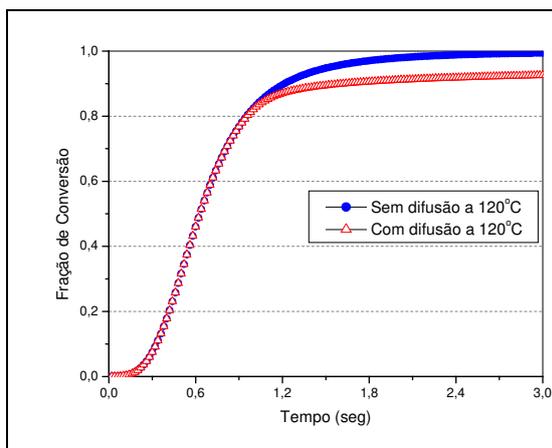


Figura 7. 51 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 120°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

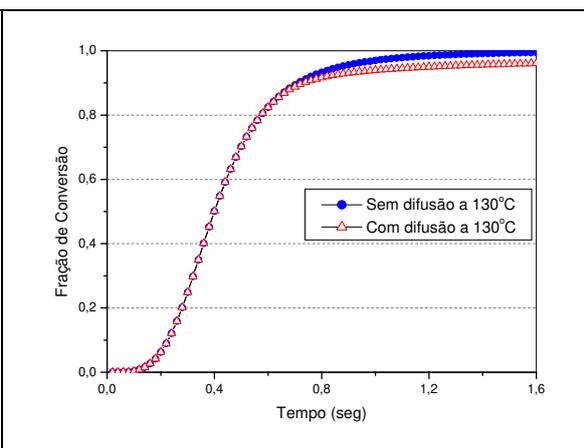


Figura 7. 52 – Fração de Conversão (α) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 130°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

7.5.2 – Taxa de Reação de Cura

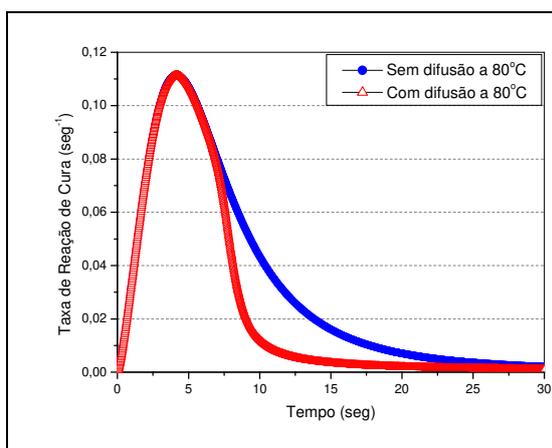


Figura 7. 53 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 80°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

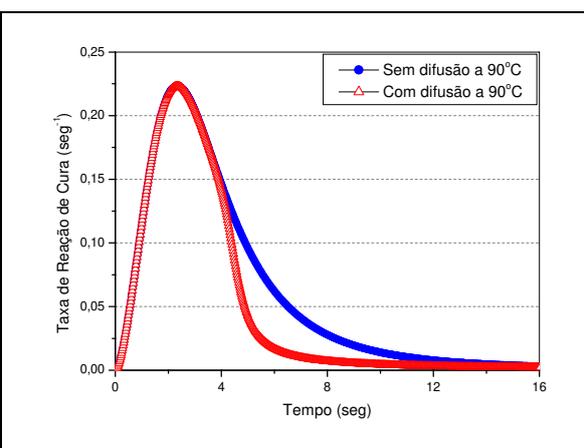


Figura 7. 54 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 90°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

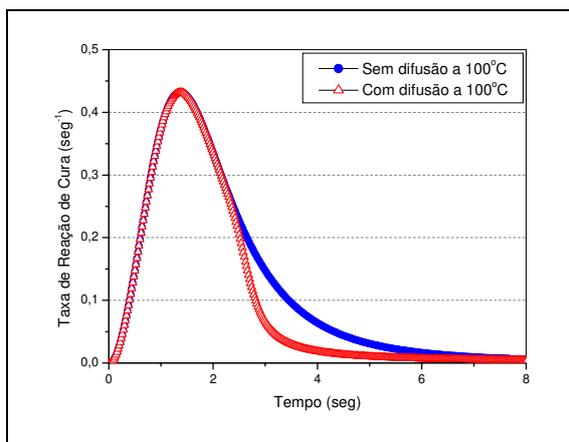


Figura 7. 55 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 100°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

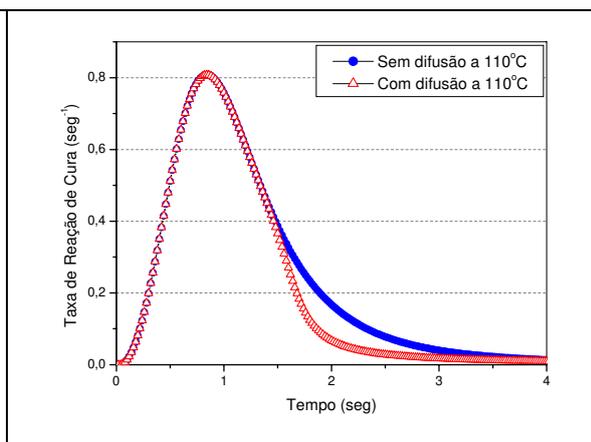


Figura 7. 56 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 110°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

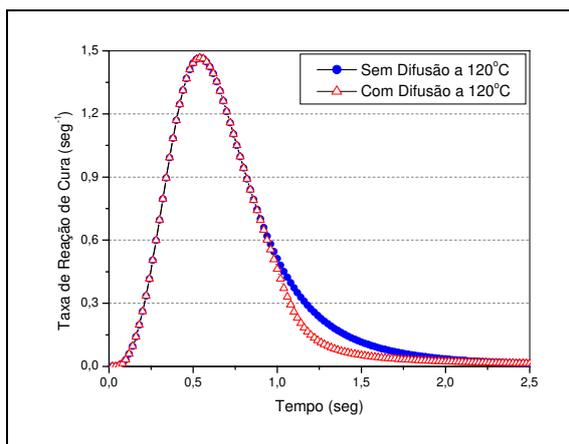


Figura 7. 57 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 120°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

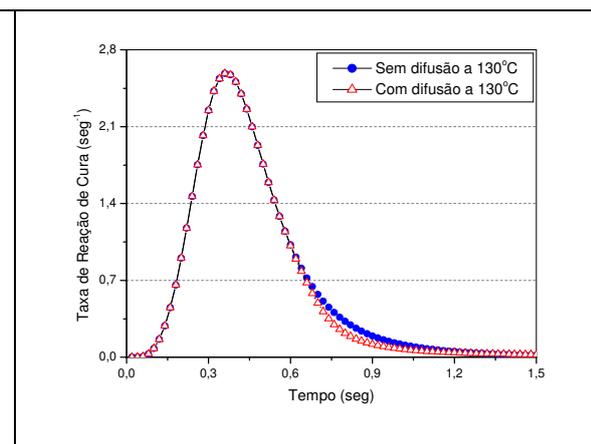


Figura 7. 58 – Taxa de Reação de Cura (da/dt) x Tempo de Aquecimento para uma Temperatura Isotérmica de Cura de 130°C, Sem e Com Difusão – Simulado.

Como a difusão é um resultado direto do movimento Browniano das partículas no sistema, que é um efeito puramente térmico, aumentando a temperatura isotérmica de cura aumenta a mobilidade das espécies reativas presentes no sistema. Entretanto, aumentando-se a temperatura de cura, aumenta-se também a taxa de iniciação, isto é, o período de indução. Conseqüentemente, o valor máximo da taxa de cura aumenta, como pode ser visto nas Figuras 7.65 a 7.70.

7.6 – Conclusões

O Modelo Cinético, apresentado neste capítulo, proporcionou análises sobre a cinética de cura do material polimérico, tais como a Fração de Conversão e a Taxa de Reação (ou velocidade de reação). Foi verificado também o efeito da presença e da ausência de difusão no processo reacional. O Modelo Cinético computacional pôde também ser validado de acordo com resultados experimentais (realizados anteriormente e apresentados no presente trabalho). Foi construída uma malha, com elementos e nós, a qual foi submetida a diferentes Temperaturas de Cura. Todas as simulações foram feitas variando-se a Temperatura de Cura para os valores 80, 90, 100, 110, 120 e 130°C, de acordo com o que foi executado experimentalmente.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1 – Conclusões

O desenvolvimento de qualquer tecnologia nova exige muitos estudos e planejamentos, o que não é diferente para o novo processo de termolitografia discutido neste trabalho.

O produto final da Prototipagem Rápida, independente do processo utilizado, precisa apresentar boa qualidade e baixo custo, principalmente. Neste sentido, toda e qualquer melhoria no processo é sempre bem-vinda.

No processo Termolitográfico, ainda em aperfeiçoamento, vários parâmetros foram analisados e testados, em ambientes experimental e simulado. A interação entre os resultados obtidos destas duas formas de estudo proporciona o ajuste e otimização dos melhores valores para cada variável do sistema.

Primeiramente, foram realizados trabalhos experimentais para caracterização da composição padrão e para caracterizações térmicas e ópticas. A partir dos resultados experimentais obtidos, realizou-se o presente trabalho de simulação dos parâmetros do sistema.

Com relação às propriedades físicas da amostra e de acordo com os resultados obtidos, dentre todas as quantidades de sílica analisadas, a faixa entre 35 e 90 partes de sílica na amostra, foi a região que apresentou o maior confinamento de energia, traduzido em temperatura. Este fato confirma os resultados experimentais já que esta faixa compreende os valores de quantidade de sílica no entorno de 7 partes como verificado nos experimentos.

Os parâmetros operacionais do *laser*, por sua vez, simulados, foram o diâmetro do feixe, a velocidade de varredura e a potência. As análises são feitas em função das temperaturas finais alcançadas, ou seja, no décimo e último pulso irradiado.

Comprovou-se que o aumento do diâmetro do *laser* ocasiona decréscimo nos valores das temperaturas finais no centro e na borda da superfície da região da amostra irradiada pelo *laser*.

A respeito da velocidade de varredura, o seu aumento implica também em redução da temperatura nas regiões analisadas.

O aumento da Potência acarreta aumento no valor das temperaturas no centro e na borda da superfície da resina.

Outro fato importante neste trabalho é a validação do Modelo Cinético STLG-FEM em que resultados de simulações através deste modelo foram comparados com os resultados experimentais realizados no DSC. Percebeu-se que ainda são necessários ajustes nas equações do modelo para o caso de resinas epóxi (termossensíveis), principalmente no termo de difusão. O modelo é voltado para materiais como o poliéster (fotossensível) o que pode ter sido a razão das diferenças nas frações de conversão e nas taxas de reação. O mais relevante é que houve a confirmação das mesmas tendências para os dois tipos de resultados.

O Modelo Teórico (Ansys) possibilitou análises temporais e espaciais, enquanto que, o Modelo Cinético (STLG-FEM), análises temporais. Porém, a união destes dois modelos é essencial para um estudo mais completo do comportamento da resina sob irradiação do *laser* infravermelho de CO₂.

8.2 – Trabalhos Futuros

A partir do presente trabalho, há várias sugestões para futuros desenvolvimentos. A continuidade dos estudos realizados até agora é fundamental para o aperfeiçoamento do processo termolitográfico.

- Desenvolvimento de um modelo que una o Ansys e o STLG-FEM;
- Avaliação do efeito das interações cruzadas entre os parâmetros operacionais e termofísicos usando técnicas estatísticas de análise;
- Proposta de novo modelo cinético que leve em conta a difusão através da composição linear de modelos controlados quimicamente e por difusão;
- Estudo mais preciso da faixa de quantidades de sílica na amostra obtida nas simulações;
- Trabalhos experimentais com o processo IRTL para estudo de parâmetros físicos da amostra e operacionais do *laser* dentro das melhores faixas de valores obtidas nas simulações. Possíveis estudos:
 - Variação da Potência do *Laser*
 - Variação da Velocidade de varredura
 - Variação do diâmetro do *laser* através do seu foco (cintura do feixe)
 - Variação das composições das amostras
 - Variação do tipo de resina epóxi e de sílica.
- Estudos para valores menores da temperatura ambiente (25°C) adotada neste trabalho;

- Aplicação do Modelo Teórico em outra interface como, por exemplo, o software FEMLAB;
- Estudo da influência dos efeitos de difusão axial e “lateral” na amostra sobre a vizinhança e sobre as camadas vizinhas;
- Estudo da Temperatura de vitrificação do processo considerando-se a fase de gelificação;
- Estudo das ordens de reação no Modelo Cinético;
- Realização de experimentos e simulações com n camadas;
- Comparação de modelos fabricados com o processo IRTL e com outros processos, como o 3DP;
- A utilização de arquivos de entrada gerados por escaneadora 3D;
- Início de estudo da Termolitografia na ordem de dimensão micrométrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C., LAFRATTA, F.H.; BEAL, V.E. Desenvolvimento e Perspectivas do Uso de Técnicas de Rapid Tooling por Estereolitografia na Obtenção de Moldados por Injeção. *Congresso PlastShow, São Paulo, Brasil, 2002.*

ALVES, N.; BÁRTOLO P.; FERREIRA J. Image-based modelling for reverse engineering of large object. *Rapid Response Solution to Product Development*, Published ImechE, ICMA, 2002.

ANDRADE, S.R. *Simulação Numérica do Processo de Solidificação de Placas Finas com Redução da Espessura com Núcleo Líquido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. Tese (Doutorado).

ANDRADE, S. R.; JARDINI, A. L.; REZENDE, R. A.; MACIEL FILHO, R.; SCARPARO, M. A. F. Heat sink silica effect: A new approach using ANSYS program simulation in Thermal Stereolithography (TSTL) process. *Proceedings of The 2ND International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 519-525, 28 September-01 October, 2005, Leiria, Portugal.

ARTIS. Disponível em < <http://www.artis.com.br/> >. Último acesso em 17 de fevereiro de 2006.

ANSYS Manual guide, 8 ed., New York: SAS IP, Inc., Cap. 1: Ansys thermal analysis guide, Cap. 6: Ansys theory reference, 1998.

BARROS, M. L. *Estudo, Desenvolvimento e Obtenção de Peças Plásticas Tridimensionais através da Litografia Térmica com Laser de CO₂*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1993. Tese (Mestrado).

BÁRTOLO P. J. *Optical approaches to macroscopic and microscopic engineering*, University of Reading, UK, 2001. PhD Thesis.

BÁRTOLO P., MENDES, A., JARDINI, A. Bio-prototyping. *Proceedings of Second International Conference on Design and Nature*, M.W.Collins & C.A.Brebbia Editors, pp.535-544, 28-30 June, 2004, Rhodes, Greece.

BEAMAN, J.J.; MARCUS, H.L.; BOUREL, D.L.; BARLOW, J.W.; CRAWFORD, R.H. *Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing*, Dordrecht London: Kluwer Academic Publishers, 1997.

BEAMAN, J. J. *Rapid Prototyping in Europe and Japan*. World Technology Evaluation Center Report, cap.3, 1997. Disponível em <http://www.wtec.org/loyola/rp/03_01.htm>. Último acesso em 17 de fevereiro de 2006.

BELUZE, L; BERTSCH, A.; RENAUD, P. Microstereolithography: a new process to build complex 3D objects. *Symposium on Design, Test and Microfabrication of MEMs/MOEMs, Proceedings of SPIE 3680 (2)*, pp.808-817.

BERNARD, A.; DEGLIN, A.; RIS, G. An Original approach for the memorisation and the generation of rapid product development processes. *Rapid Prototyping Journal*, vol.9, n.2, p.58-67, 2003.

BERTSCH, A., BERNHARD, P., VOGT, C. AND RENAUD, P.. Rapid prototyping of small size objects. *Rapid Prototyping Journal*, 6 (4), 259-266, 2000.

BILLMEYER, F. W. *Textbook of Polymer Science*, 3^a ed., New York, John Wiley & Sons, 1984.

BOHM, G.G., TVEEKREM, J., *Rubber Chemical Technological*, v. 55, 575, 1982.

BOLT, R.; Carroll, J.G. *Radiation Effects on Organic Materials*, Academic Press, Inc., New York, 1963.

BRANCO, S.O. *Especificação de um Sistema de Prototipagem Rápida de Interfaces Homem-Máquina*, Paraíba: Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 1990. Tese (Mestrado).

BURNS, M. *Automated fabrication - improving productivity in manufacturing*, Prentice-Hall, New Jersey, pp 14-84, 1993.

CARVALHO, Jonas de. Disponível em <
http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/prototipagem.html>. Último acesso em 17 de fevereiro de 2006.

CASPI, S.; CHIESA, L.; FERRACIN, P.; GOURLAY, S. A.; HAFALIA, R.; HINKINS, R.; LIETZKE, A. F; PRESTEMON, S. Calculating Quench Propagation With ANSYS. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, v. 13, 2, 2003.

CASTLE, M. P.; SADHIR, R. K. *Lasers in polymer science and technology applications*, v. 3, 1990.

CERVERA, G.B.M.; LOMBERA, G. Numerical prediction of temperature and density distribution in selective *laser* sintering process. *Rapid Prototyping Journal*, v.5, 1, pp.21-26, 1999.

CHOI, S.H.; SAMAVEDAM, S. Visualisation of Rapid Prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, vol.7, n.2, p.99-114, 2001.

CHRYSSOLOURIS, G.; STAVROPOULOS, P.; TSOUKANTAS, G.; SALONITIS, K.; STOURNARAS, A., 2003. Nanomanufacturing process: a critical review. *Proceedings of 1st International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pp. 535-543, 01 -04 October, 2003, Leiria, Portugal.

CHUA, C.K; LEONG, K.F. *Rapid prototyping principles and application in manufacturing*. Singapore. John Wiley and Sons, 1997.

COMINI, G.; GIUDICE, S. D.; NONINO, C. *Finite element analysis in heat transfer*. Taylor & Francis, London, 1994.

CONDE, J.C.; LUSQUINOS, F.; GONZALEZ P.; SERRA J.; LEON B.; DIMA A.; CULTRERA L.; GUIDO D.; ZOCCO, A.; PERRONE, A. Finite element analysis of the initial stages of the *laser* ablation process, *Thin Solid Films* 453 –454, pp. 323–327, 2004.

DAY, A. *Digital Building*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.

DHATT, G.; TOUZOT, G.; CANTIN, G. *The Finite Element Method Displayed*. New York : John Wiley & Sons, 509 p.,1985.

FERREIRA, J. M. G. C.; ALVES, N. M. F.; MATEUS, A. J. S.; CUSTÓDIO, P. M. C. Desenvolvimento integrado de produtos e ferramentas por metodologias de engenharia inversa e técnicas de prototipagem rápida, 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, 25-27 Setembro, 2001, Florianópolis, Santa Catarina.

FLORY, P.J. *Principles of polymer chemistry*. Cornell University Press, Ithaca, New York, pp. 356-361, 1953.

GIBSON, I; KVAN, T.; LING, W. M. Rapid Prototyping for Architectural Models. *Rapid Prototyping Journal*, v.8 , n. 2, pp 91-99, 2002.

GONZALEZ-ROMERO, V. M.; CASILLAS, N. *Polym. Eng. Sci.*, 29, 295, 1989

GORNI, A. A. Disponível em < <http://www.gorni.eng.br/protrap.html> >. Último acesso em 20 de janeiro de 2006.

GUANGCHUN, W.; HUIPING, L.; YANJIN, G.; GUOQUN, Z. A rapid design and manufacturing system for product development applications, *Rapid Prototyping Journal*, v. 10, n. 3, pp. 200-206, 2004.

HUANG, Y.M.; JENG, J.Y.; JIANG, C.P. Increased accuracy by using dynamic finite element method in the constrain-surface stereolithography system. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 140, pp. 191–196, 2003.

HUGUENIN, F.G.A.E.; KLEIN, M.T., *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev* , 24, 166, 1985

IMBERT, J., F. *Analyses des structures par elements finis*, Cepadues ed., France, 1979.

JANG, W. A review of DSC kinetic methods. *Du Pont Instruments*, 1981.

JARDINI, A. L. M. *Cura Localizada da Resina Termossensível utilizando o Laser de CO₂ como Fonte Seletiva de Calor*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. Tese (Mestrado).

JARDINI, A .L. M.; WAGNER, P. R. S.; IERARDI, M. C. F.; KIEL, A. E.; SCARPARO, M. A. F.; Optical and Thermal parameters characterization in CO₂ laser application in thermosensitive resins using stereolithography process. *Journal of Mechanical Engineering Science*, v. XX (2), p. 146-154, 1998.

JARDINI, A .L. M.; SCARPARO, M. A. F.; MARINHO, G.; SALLES, D.S.; ALLEN S.D. New infrared stereolithography: control of the parameters of the localized curing in thermosensitive materials, SPIE, *Laser Application in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing V*, USA, 2000.

JARDINI, A .L. M. *Desenvolvimento de um Sistema de Estereolitografia Térmica na Construção de Protótipos em Três Dimensões usando o Laser de CO₂*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. Tese (Doutorado).

JARDINI, A. L. M.; MACIEL FILHO, R.; SCARPARO, M. A. F.; ANDRADE, S. R., MOURA, L. F. The Development in Infrared Stereolithography using Thermosensitive Polymers. *Proceedings of The 1st VRAP International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 273-277, 01-04 October, 2003, Leiria, Portugal.

KAMAL, M. R.; RYAN, M. E. *Adv. Polym. Technol.* v. 4, pp. 323, 1984.

KENNY, J. M.; TRIVISANO, A. *Polymer Eng. Sci.*, 31, 1426, 1991.

KODAMA, H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 52, n.11, 1981.

LEE, H; NEVILLE, K. *Handbook of epoxy resins*. New York, St. Louis, 1967

LEWIS, R. W.; MORGAN, K., THOMAS, H. R.; SEETHARAMU, K. N. *The finite element method in heat transfer analysis*, John Wiley & Sons, Chichester, 1996.

LIMA, C. B. *Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida – Estudos de Casos*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. Tese (Mestrado).

LU, F.; YAO, S.; LOU, S.; LI, Y. Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool, *Computational Materials Science*, 29, pp. 371–378, 2004.

MANO, E.B. *Introdução a Polímeros*, São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda, 111 p, 1985.

MELO, D. N. C. *Estratégia de Otimização em Duas Camadas: Aplicação para Processos de Hidrogenação em Reatores Catalíticos Trifásicos*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, 2005. Tese (Doutorado).

MSOE. Disponível em <http://www.rpc.msoe.edu/machines.php> . Último acesso em 19 de fevereiro de 2006.

NAKAMOTO, T.; YAMAGUCHI, K.; ABRAHA, P.A.; MISHIMA, K. Manufacturing of three-dimensional microparts by UV laser induced polymerization. *Journal Micromech. Microeng.*, 6 (2), 240-253, 1996.

NOVO, P.; BARTOLO, P.; ROCHA, A.; MATEUS, A. Composite Materials in Aeronautics: the Skyguardian Case. *Revista Molde*. Ano 18, n.67, Portugal, Setembro, 2005.

POPESCU, C; SEGAL, E. *Int. J. Chem. Kinet.*, 30, 313. 1998.

PRIME, R.B. In: *Thermal characterization of polymeric materials*, vol. 2, Edited by A. Turi, Academic Press, London, 1997.

PUTCIOGLUE, S.Y.; FRICKE, A.L.; HASSLER, J.C., *J. Appl. Poly. Sci.*, 24, 937, 1979.

RABINOWITCH, E. *Trans. Faraday Soc.*, 32, 1225, 1936.

RANGE LASER. Disponível em: <http://www.range.com.br/index.asp>. Último acesso em 25 de fevereiro de 2006.

REDDY, J. N. *Introduction to the finite elements method*, McGraw Hill, New York, 1993.

REZENDE, R. A.; JARDINI, A. L. M.; MACIEL FILHO, R.; SOUZA, E. N. Design Of Polymer Models By Rapid Prototyping System. *7th World Congress of Chemical Engineering*, 10-14 July, 2005, Glasgow, Scotland.

ROBTEC, 2006. Disponível em < <http://www.robtec.com.br/> >. Último acesso em 17 de fevereiro de 2006.

ROSOCHOWSKI, A.; MATUSZAK, A. Rapid tooling: the state of the art. *Journal Materials Processing Technology*. 106, 191-198, 2000

SCARPARO, M.A.F.; BARROS, M.L.; GERCK, E. Estereolitografia a *Laser*: Uma Nova Técnica. *Anais do V Simpósio Estadual de Lasers e Aplicações*, 1992.

SCARPARO, M.A.F; BARROS, M. L.; GERCK, E.; KIEL A., HURTACK, J. J. Stereolithography with Thermosensitive Resins Using a CO₂ *Laser*, *Journal of Applied Polymer Science*, v. 54, 1575-1578, 1994.

SCARPARO, M. A. F.; CHEN, Q. J.; MILLER, C. J.; ZANG, J. H.; ALLEN, S.D. Mechanisms of Carbon Dioxide *Laser* Stereolithography, *Applied Surface Science*, v. 106, pp. 275-281, 1995.

SCARPARO, M. A. F; KIEL, A. ; ZHIAO, Z.; FERRARI, C. A.; CHEN, Q. J.; MILLER, J. H.; ALLEN, S.D. Study of Resin Based Materials Using CO₂ *Laser* Stereolithography, *Polymer*, v. 38, n. 9, pp. 2175-2181, 1996.

SEACAM, Disponível em < <http://www.seacam.com.br> >. Último acesso em 24 de fevereiro de 2006.

SELLI, E.; BELLOBONO, I. R. In: Radiation curing in polymer science and technology, v. 3: Polymerisation mechanisms, *Elsevier Science Publishers*, London, 1993.

SRINIVASAN, R. Interaction of *Laser* Radiation with Organic Polymers. *Laser Ablation, Springer Series in Materials Science*, v. 28, 1994.

STRONG, A. B. *Plastics-materials and processing*, Prentice-Hall, New Jersey, 1996.

SWAMINATHAN, C.R.; VOLLER, V.R. A General enthalpy method for modeling solidification processes. *Metallurgical Transaction B*, v. 23, pp. 651-664, 1992.

SZILVÁSI-NAGY, M.; MÁTYÁSI, G. Analysis of STL files. *Mathematical and Computer Modelling*. 38, 945-960, 2003.

TURRO, J.N. *Molecular Photochemistry*, Columbia University, W.A. Benjamin, Inc., Chapter 1, pp. 1-9, 1965.

USACEHR. Disponível em < <http://usacehr.amedd.army.mil/Index.html> >. Último acesso em 21 de fevereiro de 2006.

VASCO, J.; ANDRÉ, N.; BÁRTOLO, P. Micro-fabrication: The state-of-the-art, *Proceedings of The 2ND International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria, Portugal, 483-490, 2005.

WAH, W. H., 1999. < http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/old_files/STL_introduction.htm#Common%20errors >
Último acesso em 21 de fevereiro de 2006.

WATERMAN, N. A.; DICKENS, P. Rapid Product development in the USA, Europe and Japan, *World Class Design to Manufacture*, vol.1, n.3, pp.27-36, 1994.

WILLARD, P.E. Determination of Cure of Diallyl Phthalate Using Differential Scanning Calorimetry, *Polymer Engineering and Science*, March, vol.12, n. 2, 1972.

WISANRAKKIT, G.; GILHAM, J.K.; *J. Appl. Polym. Sci.*, 42, 2453, 1991.

WISANRAKKIT, G.; GILHAM, J.K.; *J. Appl. Polym. Sci.*, 41, 2885, 1990.

WOHLERS, T. *Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry*, Annual Worldwide Progress Report, 2004.

YAGUI, S.; KUNNI, D. Studies on effective thermal conductivities in packed beds. *J. Aiche.*, v.3, 3, pp. 373-381, 1989.

YAN Y.; ZANG R.; LIN F. Research and application on bio-manufacturing. *Proceedings of The 1st VRAP International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 23-29, 01-04 October, 2003, Leiria, Portugal.

YOUNG, M. *Óptica e Lasers*, Editora da Universidade de São Paulo, 1998.

YOUSEFI, A.; LAFLEUR, P.G.; GAUVIN, R. *Polymer Compos.*, 18, 157, 1997.

ZIENKIEWICZ, O. C.; PAREKH, C. J.; WILLS, A. J. The application of finite element method in heat conduction problems involving latent heat. *Rock Mechanics*, 5, p. 65-76, 1976.

ZIENKIEWICZ, O. C. *The finite element method*, McGraw Hill, London, 1977.

ZIENKIEWICZ, O. C.; PAREKH, C. J. *Int. J. Num. Meth. Engng.*, v. 2, 61, 1970.

APÊNDICE A – O *Laser* de CO₂

Existem vários tipos de *lasers*, os quais variam em potência, eficiência e utilidade. Talvez o mais utilizável dentre todos seja o de dióxido de carbono, inventado pelo indiano Kumar Patel em 1964.

Na indústria, o *laser* de CO₂ é usado em muitas formas de soldagem, corte e perfuração, incluindo aquelas em níveis micromecânicos. Na medicina, a utilidade mais comum é na realização de cirurgias, incluindo remoção de tumores e vários procedimentos sem contato e não-invasivos. No ambiente, é usado para analisar composições químicas da alta atmosfera, cooperando com as previsões do clima e especificamente para detectar poluentes existentes sob concentrações muito baixas. Nas comunicações, o *laser* de CO₂ é base para subsistemas opto-eletrônicos como detecção acústica por infravermelho.

O *laser* de CO₂ molecular oscila no infravermelho em 10,6 μ m. A transição ocorre entre os níveis de energia vibracionais da molécula de CO₂. Os *lasers* de dióxido de carbono podem ser contínuos, por pulsos ou com o fator Q (energia radiante em Joules) variável. Tratando-se de um *laser* contínuo de CO₂, até um modelo pequeno consegue emitir uma fração de watt e aquecer quase todos os materiais à incandescência em pouco tempo. Especificamente na Prototipagem Rápida com *laser* infravermelho de CO₂, como é o presente caso de estudo, é necessário um dispositivo que, na mudança de trajeto ou direção do feixe, bloqueie a irradiação da luz, denominado *shutter*. O *shutter* utiliza material que não libera contaminantes perigosos no ar, em particular o óxido de berílio).

A descarga elétrica que excita quase todos os *lasers* a gás é uma descarga luminescente ou um arco mantido por um anodo e um cátodo colocados nas extremidades de um tubo comprido e fino que se chama tubo de descarga ou tubo de plasma. Alguns *lasers* são excitados por uma descarga de rádio frequência; todos os *lasers* deste tipo funcionam com pressão de gás muito inferior à pressão atmosférica.

Existem outros *lasers* a gás que formam a classe dos *lasers* de pressão atmosférica excitados transversalmente (ou *lasers TEA*, do inglês *transversely excited atmospheric*

pressure). O *laser* TEA sempre é pulsado e, como o nome sugere, é excitado por uma descarga de arco mantida a uma pressão quase igual a pressão atmosférica. A corrente formada no arco passa perpendicularmente ao eixo do *laser*.

Muitos *lasers* de CO₂ também são *lasers* TEA, e, como precisam de um sistema relativamente simples de manipular o gás, são baratos e de fácil construção. Podem ser pulsados repetitivamente e como os outros *lasers* de CO₂ apresentam uma potência de pico elevada ou uma potência média elevada.

Qualquer amador que tiver intenção de construir um destes *lasers* precisa saber que não convém subestimar o perigo que eles oferecem. A Figura A.1 apresenta diferentes tipos de *laser* e seus respectivos comprimentos de onda (YOUNG, 1998).

Espécie	Hospedeiro	Comprimento de onda	Modos de oscilação mais comuns
Cr ⁺³	Al ₂ O ₃ (rubí)	694 nm	P, Q
Nd ⁺³	vidro	1,06 μm	P, Q, ML
Nd ⁺³	YAG	1,06 μm	CW, PR, ML
Er ⁺	fibra de sílica	1,55 μm	B
Ti ⁺³	safira	680 nm–1,1 μm	CW, ML, P
Ne	He	633nm; 1,15 μm, 3,39 μm	CW
Cd	He	325 nm, 442 nm	CW
CO ₂	—	10,6 μm	CW, Q, PR
Ar ⁺	—	488 nm, 515 nm	CW, P, ML
Kr ⁺	—	647 nm	CW, P
GaAs	substrato de GaAs	840 nm	CW,P
GaAlAs	GaAs	850 nm	CW,P
GaP	GaAs	550-560 nm	CW,P
GaInAsP	InP	0,9 - 1,7 μm	CW,P
Rodamina 6G	etanol, metanol, água	570-610 nm	PC, CW, ML
Fluoresceína de sódio	etanol, água	530-560 nm	PC, CW
Vapor de água	—	119 μm	P, CW
HCN	—	337 μm	P, CW
HF, DF	—	2,6 - 4 μm	P
N ₂	—	337 nm, 1,05 μm	P
Excímer (KrCl, KrF, XeCl, XeF)	—	222, 248, 308, 351 nm	P
Vapor de cobre	—	511, 518 nm	P

P, pulsado; PR, pulsado repetitivamente; PC, pulso curto; CW, de onda contínua; Q,"Q-switched"; MR, com modo "locado"; B, bombeado por *laser* de diodo.

Figura A.1 – Tipos de *laser* e respectivos comprimentos de onda.

APÊNDICE B – Construção de Peças Tridimensionais

As tentativas de se obter os melhores parâmetros do *laser* na obtenção da cura localizada, inicialmente produzindo peças 2D com geometria retangular, foram repetidas sistematicamente. Para todos os experimentos, decidiu-se fixar a potência do feixe *laser* em 20W e o diâmetro do feixe *laser* em 0,80mm, variando o tempo de irradiação (*Dwell-Time*) e o número de revoluções do feixe *laser* na superfície da amostra. Os testes foram positivos no sentido de fornecerem uma comparação entre diferentes condições da cura localizada e auxílio para se estabelecer os parâmetros adequados de operação.

No resultado, mostrado na Figura B.1, a cura localizada no modelo confeccionado foi obtida com *Dwell-Time* de 638 μ s e número de revoluções de 12 passadas. Para este caso de aplicação, nota-se que o modelo confeccionado apresentou um padrão de identificação próximo ao modelo previsto definido pelo diâmetro do feixe *laser* (0,80mm), o que concordou com a geometria estabelecida. Observa-se também, que não ocorreu o fenômeno de contração da amostra com a aplicação do *laser*, portanto comprovando uma das vantagens do novo processo discutido nesta dissertação.

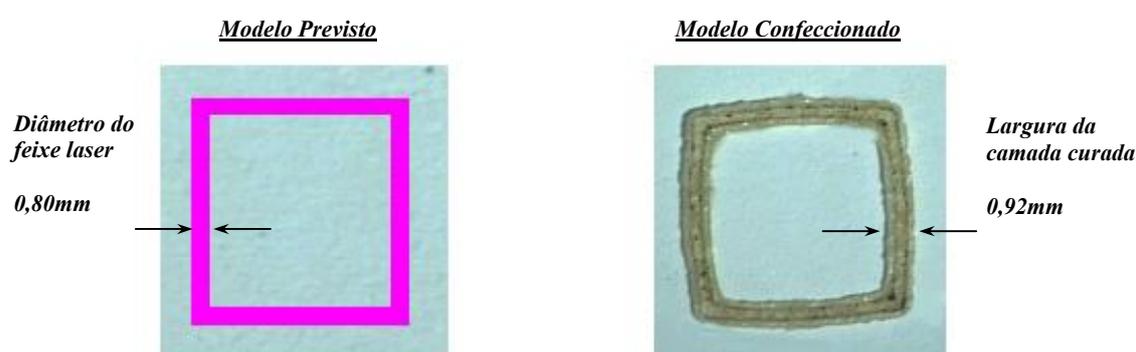


Figura B.1 – Comparação entre o modelo previsto e o modelo confeccionado.

A análise do resultado da cura localizada em peças 2D, trouxe inicialmente o conhecimento da faixa de número de revolução e do *Dwell-Time*, determinando desta

forma, um intervalo de valores para estes parâmetros, além dos valores fixos da potência e do diâmetro do feixe *laser*.

Para comprovar a eficiência e viabilidade da máquina piloto experimental para construir protótipos tridimensionais e com boa resolução espacial, foram confeccionadas peças 3D com geometria variada, e assim, pôde-se observar a estabilidade dimensional dos protótipos físicos, com cura completa, sem haver a necessidade de tratamento adicional pós-cura. Os parâmetros operacionais do *laser* encontram-se na Tabela B.1, bem como exemplos de protótipos construídos com geometria diferente (Figura 3.14).

Outro fator importante a ser considerado, como já mencionado anteriormente, é o tipo da sílica usada na mistura da amostra. Por exemplo, a resolução espacial dos protótipos apresenta uma considerável diferença no processo de cura quando testadas no Protótipo A (L90) e o Protótipo B (TS-720), como mostrado na Tabela B.1. A sílica tratada é uma sílica de alta pureza que é revestida no tratamento com fluido de silicone. Ambas agem diferentemente no processo de construção do protótipo, provavelmente devido à interferência do fluido de silicone na absorção da energia do *laser* na amostra.

Nota-se também na Figura B.2, que a construção do protótipo camada por camada resultou em diferentes resoluções espaciais o produto final. Outros parâmetros como mencionados na Tabela B.1 também atuam como importante chave na resolução espacial do protótipo obtido.

Durante a fabricação, a superfície da sílica não tratada é revestida com o fluido silicone. A sílica tratada é a TS-720. Isto altera a natureza da superfície da sílica de hidrofílica (L90) para extremamente hidrofóbica (TS-720). Pelo que aparenta ser, o fluido silicone dificulta a reação dos componentes da amostra e restringe a adesão entre as camadas, razão pela qual se considera a sílica não tratada L90 (hidrofílica) melhor que a tratada TS-720 (hidrofóbica). Como mostrado na Figura B.2, o protótipo A e o protótipo B foram construídos com a utilização dos mesmos parâmetros, mas com valores diferentes, por exemplo, a velocidade de varredura, o número de passadas e a composição estequiométrica. O protótipo A mostrou melhor resolução espacial que o protótipo B. No protótipo A o confinamento da cura na dimensão lateral é de 18% (0,90 mm) maior que o diâmetro do *laser* (0,80 mm), apresentando grande diferença para o protótipo B que é 58% (1,20 mm) maior que o diâmetro do feixe *laser*.

Tabela B.1 – Parâmetros do *laser*, tipo do material e resolução espacial.

VARIÁVEIS	PARÂMETROS	GEOMETRIA	
		Protótipo A	Protótipo B
<i>CO₂ Laser</i> ($\lambda=10,6\mu\text{m}$)	Energia $E_p = P \cdot t_d$ [m J]	10,06	8,66
	Potência P [W]	20	20
	Diâmetro do feixe <i>laser</i> 2ω [mm]	0,80	0,80
Sistema opto-eletrônico	Velocidade de varredura v [mm/s]	1595,0	1755,0
	Tempo de interação t_i [μ s]	503	456
	Taxa de repetição [ms]	35	35
	Número de passadas <i>laser</i> [x passas]	12	15
Composição da amostra	DER 383 (diglicidil eter of bisfenol A) [partes]	10	10
	DEH*20 (dietileno triamina) [partes]	1,4	1,4
	Sílica em pó [partes]	0,70	0,54
	Tipo de Sílica	L-90	TS-720
Resolução espacial (produto final)	Espessura da camada [μ m]	140	140
	Largura da camada [mm]	0,90	1,20
	Altura da peça [mm]	5,5	5,8
	Comprimento da peça [mm]	16,0	13,5

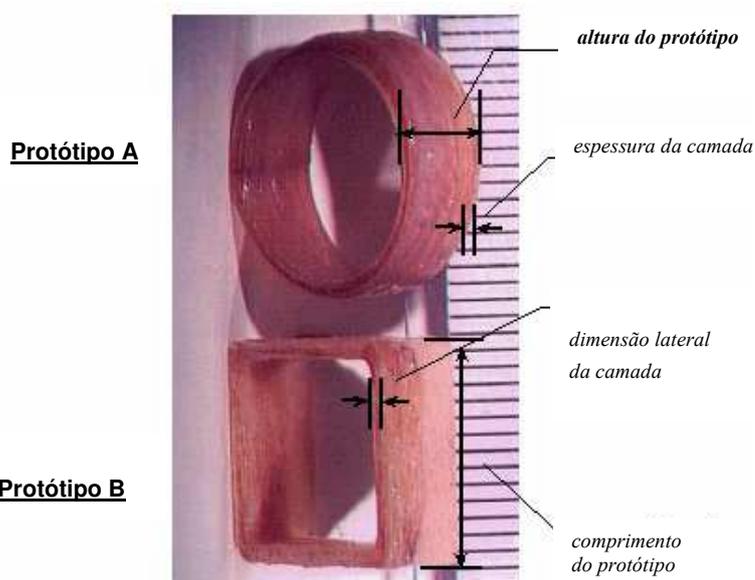


Figura B.2 – Construção de protótipos 3D camada a camada.

APÊNDICE C – Caracterização Térmica do Processo IRTL

Neste experimento, considera-se, inicialmente, que o sistema seja composto da mistura DGEBA + DETA + Sílica. Esta amostra de composição orgânica tem a resina epóxi (DGEBA) como material Termossensível básico, o dietilenotriamina (DETA) como agente de cura e a sílica como o moderador do fluxo de calor na reação com o *laser*. No fornecimento de uma quantidade de calor a este sistema, obtêm-se como resultado final, após algum tempo, uma quantidade de resina curada. O balanço correto das quantidades envolvidas na mistura é necessário, para que o resultado final seja uma massa homogênea, curada em todo o seu volume. A influência do excesso de um dos três componentes do sistema será discutida em outro ponto deste trabalho, no item Definição da Cura Localizada.

JARDINI (2001) mostrou, em estudos anteriores, que a reação de cura é mais rápida quanto maior for a temperatura ambiente (externa ao sistema). Neste trabalho, será mostrada a relação entre a temperatura no interior de um volume da amostra para várias temperaturas externas ao sistema e a velocidade de cura da resina.

Estes dados foram obtidos com uma montagem experimental envolvendo: *laser* de HeNe, tipo especial de termopar a baixa temperatura, detector para faixa visível do espectro, registrador de temperatura, osciloscópio com placa de aquisição de dados e o sistema óptico necessário. Nesta montagem experimental, um pequeno volume da amostra de alta viscosidade, foi aquecido em um recipiente envolvido por uma cinta térmica de aquecimento, e assim pôde-se monitorar, através do termopar, a temperatura no volume da amostra em função do tempo, aplicando diferentes temperaturas externas.

O experimento tem o duplo objetivo de monitorar a variação da temperatura da amostra em função do tempo de cura e determinar o início da cura na amostra utilizando o princípio da transmissividade do *laser*. Estas medidas foram fundamentais, indicando a intensa variação de energia interna do sistema. Este estudo permitiu fazer-se a estimativa do

processo de cura e a verificação do comportamento da amostra durante o processo de cura, em função da temperatura e do tempo (Figura 3.3).

Os resultados da Figura C.1, representam este comportamento da resina durante o processo de cura, onde algumas amostras são submetidas a temperaturas externas constantes 44°C, 57°C, 63°C, 73°C e 80°C, partindo de uma mesma temperatura inicial que é a temperatura ambiente.

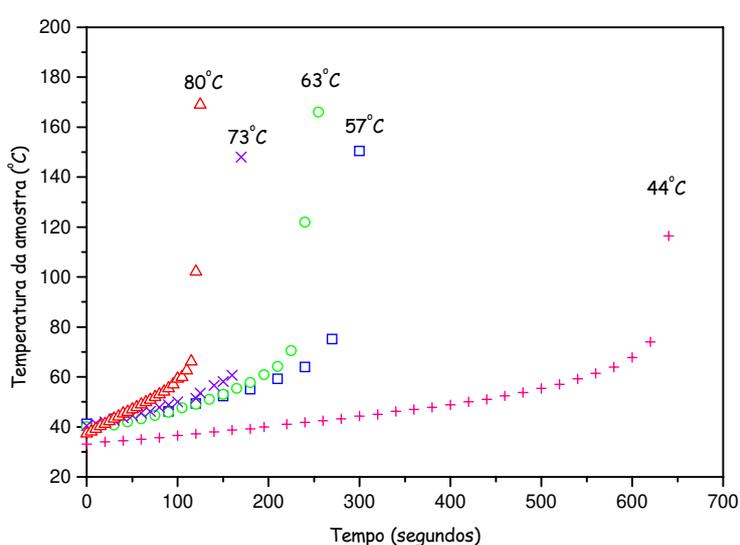


Figura C.1 –Evolução da temperatura interna da amostra para várias temperaturas externas de aquecimento.

Nota-se na figura acima, que as amostras iniciam a cura para uma faixa da temperatura entre 60 a 100°C e a partir deste início da cura as amostras apresentam um acréscimo da temperatura interna, indicando a presença de uma fonte de calor no interior do volume das mesmas. Este calor gerado é proveniente da formação de ligações químicas entre os radicais do grupo epóxi e as aminas. Uma possível explicação para o fenômeno é que quando se fornece calor ao sistema a partir de uma fonte externa de calor, a quantidade de calor absorvida pelo sistema é convertida na ligação entre os dois componentes do sistema (DGEBA + DETA) na formação das ligações cruzadas.

Este processo, aparentemente simples, envolve reações que consomem calor, como a quebra de ligações covalentes do oxigênio do grupo epóxi e a quebra de ligações do hidrogênio da amina. Além disso, ocorrem também reações que liberam energia, tais como a formação do radical hidroxila (ligação entre o hidrogênio proveniente da amina com o oxigênio do grupo epóxi) e a ligação entre a amina com um grupo epóxi.

C.1 – Velocidade de Reação de Cura

De acordo com o exposto anteriormente, um fator importante que se deve levar em consideração durante o processo de cura da resina é a *velocidade de reação de cura* como função da conversão de cura, da temperatura e do tempo. Sabe-se que a temperatura a qual uma reação química ocorre, afeta grandemente a velocidade de reação e de, maneira muito menos sensível, a frequência de colisões de moléculas. Como se pode observar na Figura C.1, a reação de cura ocorre muito mais rapidamente quanto maior for a temperatura externa ao sistema, embora exista a liberação de calor durante o processo de cura para todas as temperaturas externas. Este fato sugere que a velocidade de reação está associada a energia total das moléculas, ou seja, a reação ocorre mais rapidamente a medida que mais moléculas atingem um valor mínimo de energia para saírem de um estado inicial e atingirem o estado final. Esta energia é a *energia de ativação* E_A , que é a energia mínima de movimento relativo necessária para que ocorra uma reação. A energia de ativação é a energia necessária para formar o complexo ativado a partir dos reagentes e é um fator de maior importância na determinação de uma velocidade de reação.

Um dos objetivos deste trabalho é determinar experimentalmente a energia de ativação da reação de cura da resina Termossensível estudada. O método utilizado para a determinação da energia de ativação é o *Differential Scanning Calorimetry (DSC)* ou Calorimetria Diferencial de Varredura. O estudo da amostra com o DSC visa a determinação da energia de ativação a partir do conhecimento da taxa de cura para diferentes temperaturas.

Existem dois métodos básicos para a obtenção das medidas desejadas. No primeiro, denominado método dinâmico é gerada uma curva Fluxo de calor x Temperatura, onde a temperatura medida corresponde à temperatura da amostra durante o processo de cura. Para tanto, a amostra é colocada em uma célula de aquecimento cuja temperatura é aumentada segundo uma taxa constante, preestabelecida (normalmente usam-se taxas de 5°C/min a 20°C/min) (WILLARD,1972).

O sistema escolhido para este estudo foi a amostra padrão na composição de resina epóxi (10grs) + dietilenotriamina (1,4grs) + sílica (0,7grs) como amostra principal, básica, que cura de maneira localizada com a aplicação do *laser*, e que permite, através da superposição das camadas curadas, construir o protótipo físico (sólido).

As análises foram realizadas em equipamento DSC 200, da Netzsch, com a colaboração do Departamento de Materiais, na Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp. A condição empregada nos ensaios foi atmosfera inerte (N₂), com aquecimento da temperatura ambiente até 350°C com taxa de aquecimento de 10°C/min.

Como mostrado na Figura C.2, a temperatura da amostra é comparada com a temperatura de uma amostra não-reativa (em geral, usa-se como amostra não-reativa a alumina). Desta forma duas linhas de temperatura são geradas, uma da amostra da resina durante o processo de cura e outra da amostra não-reativa. Durante o processo de cura, a amostra de resina libera calor (reação exotérmica) e a área compreendida entre as duas curvas geradas no intervalo de tempo entre o início do processo de cura com o desvio da linha base em 40°C, alcançando a temperatura de pico em 100°C, e o final deste processo em 180°C, corresponde à entalpia ΔH , que representa a quantidade de calor total liberado pela resina durante todo o processo de cura.

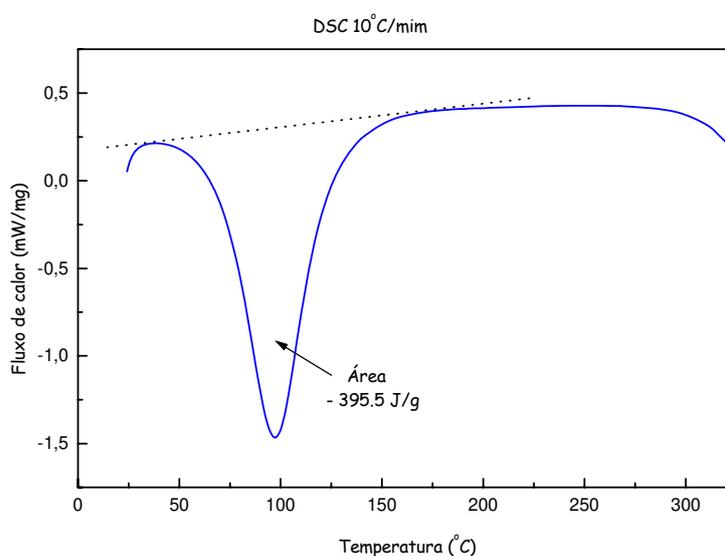


Figura C.2 – Resultado com método dinâmico que revela a entalpia para o processo de cura é aproximadamente $\Delta H = -395,5 J / g$

No segundo método, denominado isotérmico, a amostra de resina a ser curada é colocada na célula pré-aquecida a uma temperatura desejada e novamente em cada instante é registrada a diferença de temperatura entre a amostra não-reativa e a amostra de resina durante o processo de cura. Neste segundo método, o equipamento constrói, automaticamente, a curva de Fluxo de calor x tempo de reação, tanto para a amostra não-reativa como para amostra de resina.

Nesta série de experimentos, o método isotérmico foi empregado para a amostra padrão também, onde foi monitorado o fluxo de calor nas amostras em função do tempo para diferentes temperaturas mantidas constantes durante a reação. Pequenas quantidades de amostras foram parcialmente curadas em células do DSC. Um exemplo destes resultados é mostrado na Figura C.3, onde o aumento inicial no fluxo de calor representa a energia requerida para aquecer as amostras até atingir a temperatura desejada. O fluxo de calor para amostra não reativa equilibra rapidamente, e na amostra reativa, contudo, o fluxo de calor mostra uma variação induzida pela liberação de energia no processo de cura. Integrando a

diferença entre as duas curvas do instante de tempo $t = 0s$ até t obtém-se a quantidade de energia liberada pela reação no instante de tempo t . Eventualmente, quando $t \rightarrow \infty$, o calor liberado no método isotérmico é igual a ΔH .

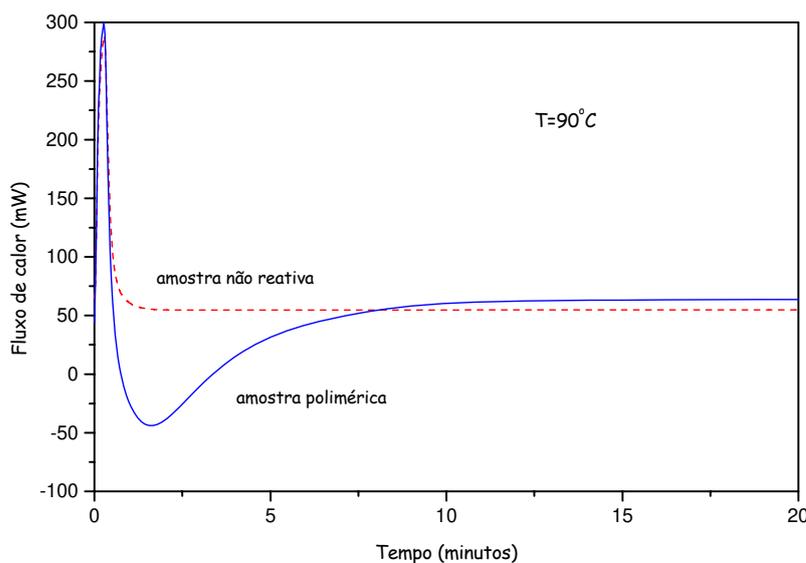


Figura C.3 – Resultado do método isotérmico e a comparação entre o fluxo de calor para a amostra polimérica e para a amostra não-reativa.

Das curvas geradas pelo método isotérmico, pode-se determinar a fração de conversão β pela razão do calor liberado em um dado instante de tempo t e o calor total liberado. Pode-se então, associar o calor liberado até o instante de tempo t proporcional a quantidade de ligações cruzadas presente na amostra ou fração de conversão β dos reagentes no instante de tempo t .

A Figura C.4 mostra as curvas da fração de conversão β x ln do tempo de cura para diferentes temperaturas aplicadas (80°C, 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C).

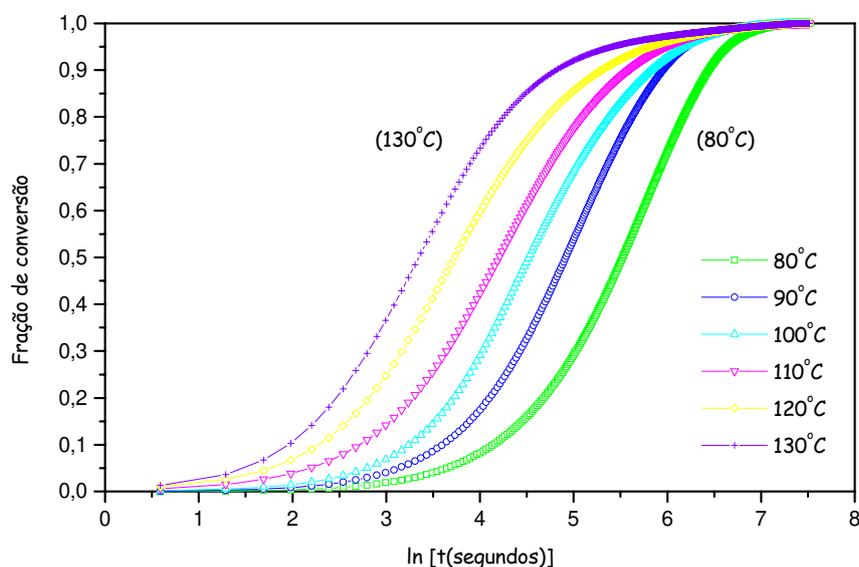


Figura C.4 – Fração de conversão completa da reação x ln (t) para várias temperaturas.

O método utilizado para a determinação da energia de ativação, como já mencionado, será a partir da taxa de cura para diferentes temperaturas utilizando-se da equação de Arrhenius cuja expressão é escrita como:

$$K = A \cdot e^{-E_A / R \cdot T} \quad (\text{C.1})$$

onde R é a constante dos gases (8,314 J/K.mol) e A é um fator denominado fator de frequência que está relacionado com a frequência de colisões e com a probabilidade destas colisões serem favoravelmente orientadas para a reação. Este fator é praticamente independente da temperatura.

Tomando-se o logaritmo natural da equação acima, tem-se:

$$\ln K = (-E_A / R \cdot T) + \ln A \quad (\text{C.2})$$

Se uma reação ocorre a uma temperatura T_1 com taxa de reação K_1 , e à temperatura T_2 a taxa de cura é K_2 , então pode-se escrever as expressões para as taxas de reação nas respectivas temperaturas, ou seja:

$$\ln K_1 = (-E_A / R \cdot T_1) + \ln A \quad (\text{C.3})$$

e

$$\ln K_2 = (-E_A / R \cdot T_2) + \ln A \quad (\text{C.4})$$

Subtraindo $\ln K_2$ de $\ln K_1$ e fazendo as simplificações necessárias, a equação resultante será:

$$\ln(K_1) - \ln(K_2) = \frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (\text{C.5})$$

A equação C.3 é muito útil, pois fornece uma maneira experimental de se obter energia de ativação de uma dada reação. Isto é, conhecendo-se as taxas de reação para duas temperaturas diferentes, pode-se construir uma curva $\ln K \times 1/T$. Como esta função é linear, o coeficiente angular da reta é numericamente igual a E_A/R .

A questão agora é como determinar as taxas de reação a diferentes temperaturas. Como o método *DSC* fornece a fração de conversão de uma quantidade conhecida de reagentes (material Termossensível não curado) em produtos (resina curada) em função do tempo de reação, basta utilizar a curva de fração de conversão $\beta \times \ln(t)$ (Figura C.4).

Considerando-se os instantes em que a reação atinge um mesmo valor de fração de conversão para duas temperaturas diferentes e a equação (C.3) pode-se, então, construir o gráfico de Arrhenius, que é o $\ln(1/t) \times 1/T$ para cada valor da fração de conversão β . A

Figura C.5 mostra o gráfico de Arrhenius onde cada linha representa uma fração de conversão específica em função da taxa de reação e da temperatura.

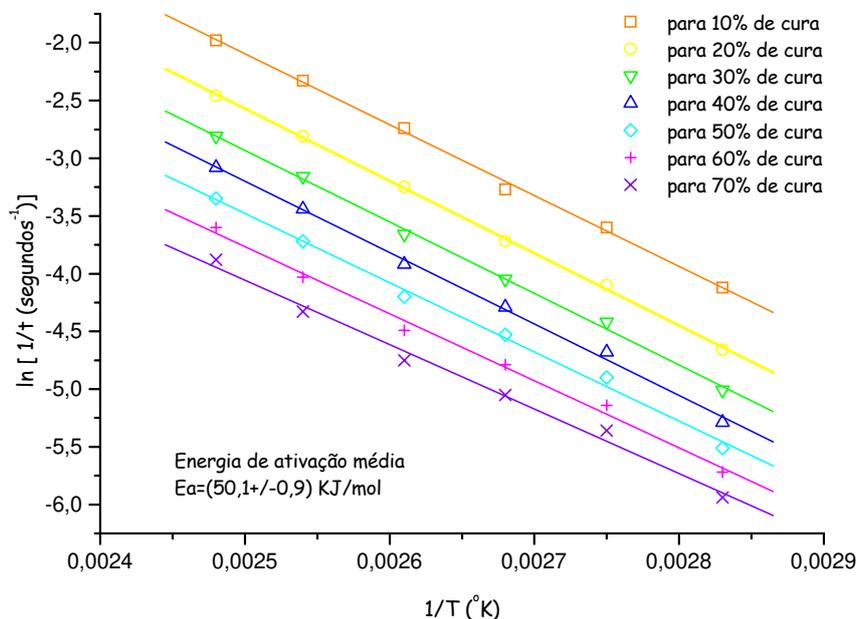
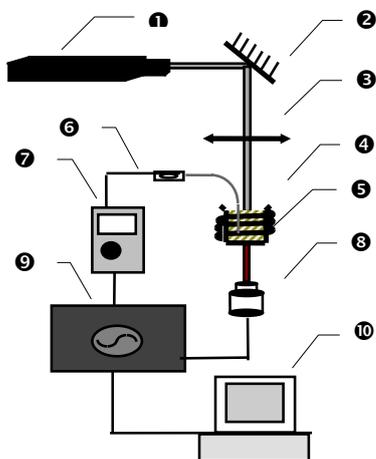


Figura C.5 – Gráfico de Arrhenius do processo de cura resultantes da Figura C.4.

Novamente, os resultados podem ser relacionados com uma reta e o coeficiente angular é igual a $-E_A/R$. A energia de ativação média para o processo de cura é:

$$E_A = (50,1 \pm 0,9) \text{ kJ / mol} \quad (\text{C.6})$$

Partindo da idéia inicial de que a taxa de reação a uma dada temperatura é a velocidade de conversão dos reagentes em produtos e, para o caso específico dos resultados da Figura C.5, para uma dada temperatura a taxa de reação é a velocidade de formação de ligações cruzadas ou ainda a velocidade de cura da resina.

Aparato Experimental***Descrição dos equipamentos***

- ① HeNe *laser* (632,8 nm)
- ② 100% reflective mirror
- ③ focusing lens (ZnSe) / $f=26\text{cm}$
- ④ beaker (diameter=10 cm, height=1,5 cm)
- ⑤ heat tape
- ⑥ thermocouple
- ⑦ keitley 175 thermometer
autoranging multimeter
- ⑧ detector for the visible / Model 818 F-SL
- ⑨ 600 MHz oscilloscope
- ⑩ data acquiring modulus

Figure C.6 – Aparato Experimental usado para a caracterização do processo de cura

APÊNDICE D – Caracterização Óptica do Processo IRTL

A Caracterização Óptica das propriedades das resinas termossensíveis depende da composição da amostra, a qual em condições apropriadas permite a obtenção de informação sobre a profundidade de absorção óptica δ . Consequentemente, estas análises são de grande utilidade para o estudo do comportamento das amostras em função da absorção de energia da sílica, uma vez que cada amostra é submetida a uma variação da quantidade de amostra na composição. A profundidade de absorção é essencial para a definição do volume de amostra curada. Se por um lado a profundidade de absorção determina a profundidade da radiação infravermelha na amostra, por outro lado, a quantidade de sílica na composição pode avaliar a dimensão do volume curado. Para a determinação da profundidade de absorção em cada amostra, uma amostra semi-líquida foi inserida entre dois cristais KBr (material bastante transparente à luz infravermelha), como está ilustrado na Figura D.1. Considera-se que, quando o feixe *laser* atinge a parede de cristais, a intensidade da radiação inicial experimenta uma ligeira reflexão na amostra semi-líquida JARDINI (1997).

Uma solução analítica, pela aplicação da Lei de Lambert-Beer ($I_T = I_0 \exp^{-x/\delta}$), proporcionou uma estimativa satisfatória para este parâmetro. Considerando-se que a intensidade de luz é parcialmente refletida e atenuada pelos cristais, é possível determinar a profundidade da energia de absorção pela amostra.

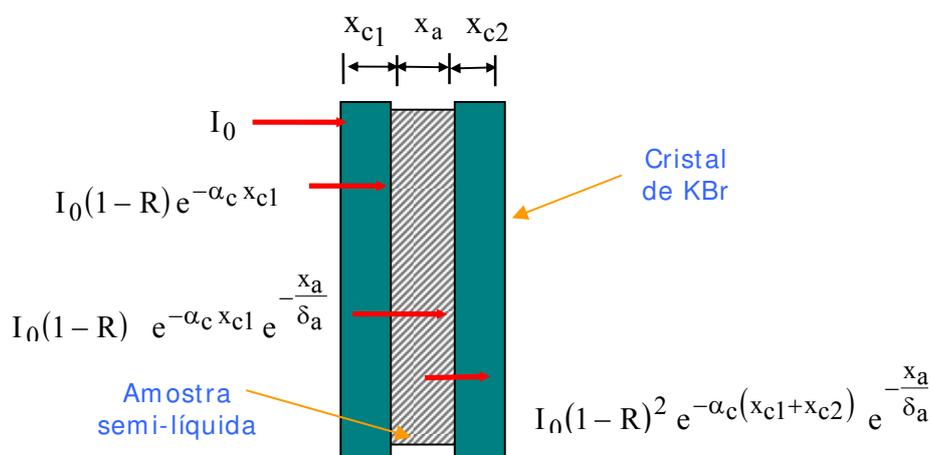


Figura D.1 – Amostra semi-líquida entre cristais de KBr

$$I_T = I_0 (1 - R)^2 \exp^{-\alpha_c(x_{c1} + x_{c2})} \exp^{x_s / \delta_s} \quad (D.1)$$

Onde, I_T/I_0 é a transmitância da amostra, R é a refletância do cristal KBr, x_c é a espessura do cristal, x_s espessura da amostra, α_c é o coeficiente de absorção óptica do cristal e δ_s é a profundidade de absorção da amostra.

onde: I_T/I_0 = transmitância da amostra

R = refletância do cristal KBr

x_c = espessura do cristal

α_c = coeficiente de absorção óptica do cristal

δ_s = profundidade de absorção da amostra

Se δ_s é isolado na equação D.1, este parâmetro pode ser determinado pela equação D.2 :

$$\delta_s = - \frac{x_s}{\alpha_c(x_{c1} + x_{c2}) + \ln \left[T \frac{1}{(1 + R)^2} \right]} \quad (D.2)$$

onde T representa a transmitância.

A Figura D.2 apresenta espectros da radiação do *laser* de CO₂ infravermelho em termos da variação de sílica na composição.

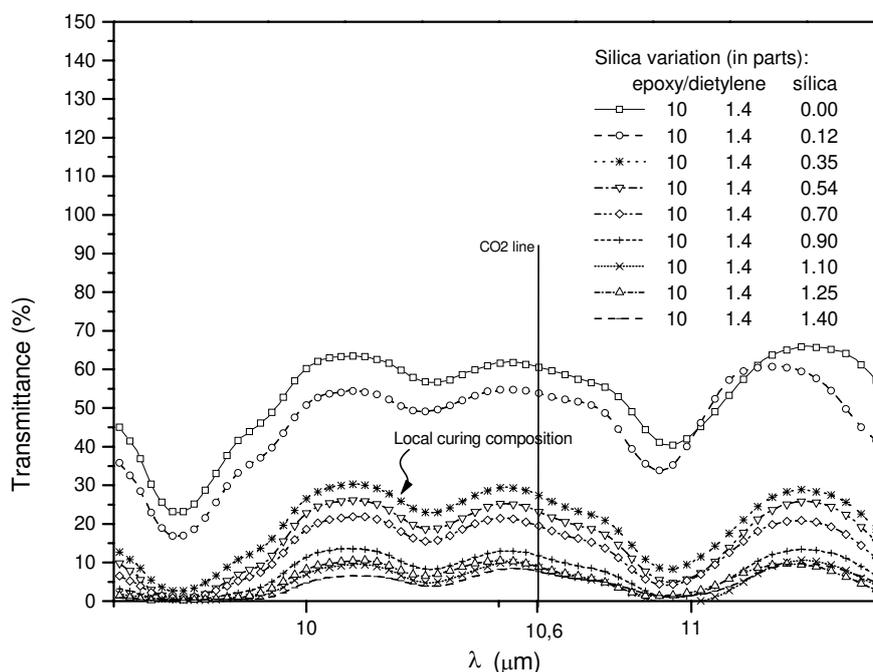


Figura D.2 – Espectros da radiação do *laser* infravermelho de CO₂ obtidos a partir de amostras semi-líquidas em função da variação de sílica na composição.

A Figura D.3, a partir do experimento realizado, mostra o estabelecimento da relação entre a variação da quantidade de sílica (tabela que pode ser visualizada no interior da figura) e a profundidade óptica de absorção.

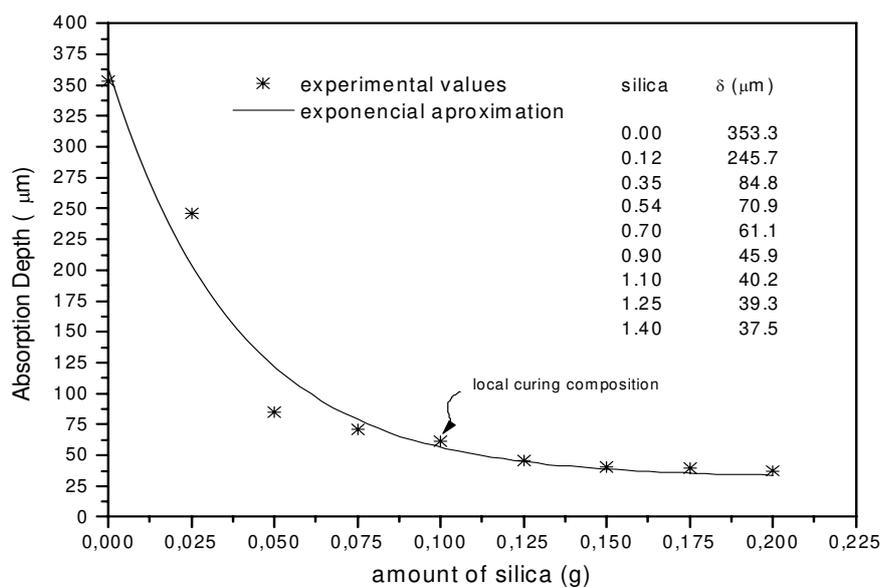


Figura D.3 – Profundidade da absorção óptica em função da variação de sílica.

A profundidade absorção foi mensurada a partir de medidas da transmitância de uma amostra de 85 μm de espessura, de material não-curado, sobre uma faixa de comprimento de onda relativa à do *laser* de CO₂ a 10.6 μm e, como resultado final, determinou-se que $\delta = 60\mu\text{m}$ para a composição padrão 100:14:7 (SCARPARO *et al.*, 1996).

O conhecimento do valor da profundidade de absorção óptica da amostra é da maior importância, para o caso específico deste trabalho, pois com este valor é possível prever, através da simulação numérica, a camada curada de resina após a aplicação do feixe *laser*.

APÊNDICE E – Método dos Elementos Finitos

A necessidade de técnicas para a aproximação de funções surge por diversas funções. Entre elas, a possibilidade de determinar uma solução aproximada de uma certa equação diferencial.

Um modelo matemático é uma série de equações algébricas ou diferenciais que descrevem um processo ou alguns aspectos deste (Figura E.1).

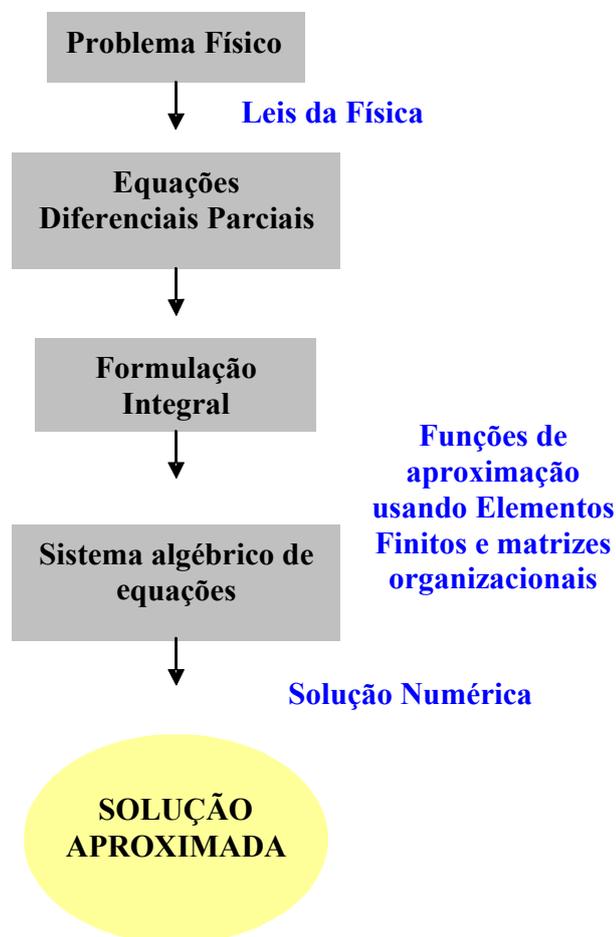


Figura E.1 – Transformação de equações em um problema físico.

Desde 1967 muitos livros têm sido escritos sobre o Método de Elementos finitos (FEM) (ZIENKIEWICZ *et al.*, 1976 e IMBERT, 1979) e modelagens numéricas utilizando este método têm sido realizadas em várias áreas de estudo como mecânica estrutural, mecânica dos fluidos, problemas de difusão, processos de transferência de calor e mudanças de fase (ANDRADE, 2003) etc. O principal objetivo do método de elementos finitos é resolver numericamente sistemas contínuos complexos para os quais não haja solução analítica possível.

A premissa básica do MEF é que uma região de solução pode ser analiticamente modelada ou aproximada através da substituição desta por um conjunto de elementos discretos. Estes elementos podem ser colocados juntos de formas variadas, formando uma malha de elementos (Figura E.2) que representa o domínio do seu problema sendo possível a representação de infinitas formas. Em um corpo contínuo, num problema de qualquer dimensão, as variáveis possuem infinitos valores, pois são funções de cada ponto da região de solução. A discretização através do MEF reduz o problema a um que contém um número finito de incógnitas dividindo a região em elementos e expressando as variáveis em termos das funções aproximadas (ou de interpolação) assumidas para cada elemento. Estas funções são definidas em termos das variáveis do problema em pontos específicos chamados nós que ficam preferencialmente nos contornos dos elementos e são conectados aos elementos adjacentes (ANDRADE, 2003).

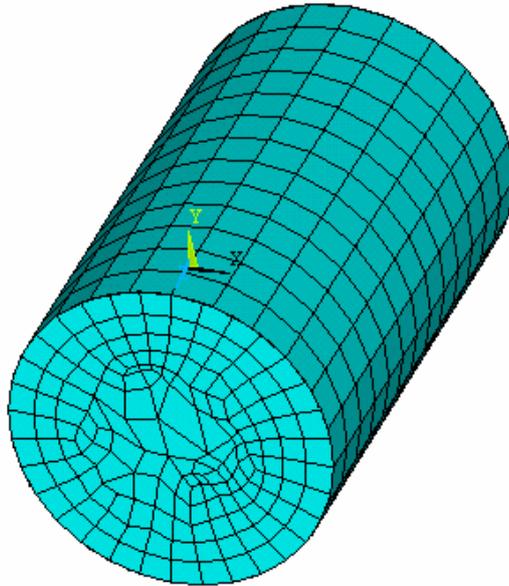


Figura E.2 – Exemplo de uma malha de elementos

Os elementos são classificados quanto a sua forma (triangular, quadrática etc.), números de nós (que estão sempre no contorno dos elementos), número de graus de liberdade, definição da variável nodal, grau de continuidade entre os elementos da malha. O tipo de elemento e a malha que representa o domínio do modelo desenvolvido neste trabalho estão detalhados no Capítulo 4.

No campo da prototipagem rápida, o MEF também tem sido utilizado na simulação de variados aspectos que envolvem os processos. CERVERA e LOMBERA (1999), em 1995 utilizaram o MEF na construção de um modelo numérico para prever as alterações de temperatura e densidade durante um processo de Sinterização Seletiva a *Laser* (SLS).

Neste processo uma fina camada de pó termofundível é depositada sobre uma superfície com a ajuda de um rolo. Um feixe *laser* de CO_2 sinteriza as áreas selecionadas causando a aderência do pó nas áreas varridas. Deposições sucessivas de camadas são feitas até que a peça esteja completa. O pó não sinterizado (fundido) pelo *laser* é removido

quando a peça estiver completa. Este serve como estrutura de suporte para partes salientes e desconectadas (BEAMAN *et al.*, 1997).

A transferência de calor na camada de pó durante a sinterização foi descrita pela equação clássica de transferência de calor (Equação E.1):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K_e \nabla T) + g(x, y, z, t) \quad (\text{E.1})$$

onde ρ , c , k_e são respectivamente a densidade, calor específico e condutibilidade da camada de pó, e $g(x,y,z,t)$ é uma função da geração de calor interna. Entretanto, neste trabalho, foi utilizada a formulação (Equação E.2) de YAGUI e KUNNI (1989) para o cálculo da condutibilidade efetiva da camada de pó:

$$k_e = \frac{\mu k_s}{1 + \phi \frac{k_s}{k_g}} \quad (\text{E.2})$$

onde k_s é a condutibilidade do material já solidificado, k_g é a condutibilidade do ar, μ é a fração de sólido e Φ é um coeficiente empírico dado por $\Phi = 0,02 \cdot 10^{2(0,7-\mu)}$.

O caminho de varredura do *laser* durante o processo de estereolitografia também tem influência sobre o objeto final. HUANG et al (2003) utilizam o Método de Elementos Finitos para otimização deste trajeto obtendo-se peças com menor distorção.

Inúmeros programas, voltados para simulações numéricas através do MEF, foram desenvolvidos para uso tanto industrial quanto acadêmico: NASTRAN, ANSYS, TITUS, ADINA. No modelo desenvolvido neste trabalho é utilizado o programa Ansys, que resolve problemas variados de engenharia, através do MEF é utilizado nas simulações dos processos de cura a *laser* sob o ponto de vista da transferência de calor que ocorre durante a cura. O Capítulo 4 descreve as equações que regem o processo, as hipóteses consideradas e o modelo numérico desenvolvido.

APÊNDICE F – O Programa STLG-FEM

Durante as simulações, foram criados arquivos de entrada com os dados solicitados pelo programa STLG-FEM. A Tabela F.1 apresenta um esquema deste arquivo de entrada.

Tabela F.1 – Exemplo de Cenário construído para simulação

CENÁRIO PARA SIMULAÇÃO		
VARIÁVEIS	VALORES	UNIDADES
SYST	0	-
NX	15	-
NY	5	-
DX(I)	0.16 0.16 0.16 0.16 0.16 0.16 0.16 0.16 0.16 0.16 0.16 0.16 0.16 0.16	-
DY(I)	0.04 0.04 0.04 0.04 0.04	-
CURE	0	-
DIFFUS	1	-
NPRNT	3	-
A10	0.000359	W/cm.°K ou W/cm.°C
A20	0.000359	W/cm.°K ou W/cm.°C
E	50.9	KJ/mol
DH	395.5	J/g
DENS	1.155	g/cm ³
CP	1.41	J/g°K ou J/g°C
NSPV	96	-

ISPV	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 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96	-
VSPV	20 20	°C
TEFFECT	0	-
TCURE	80	°C
ICONV	0	-
NTIME	5000	-
INTVL	1	-
DT	0.02	-
ALFA	0	-

A Tabela F.2 apresenta um arquivo de saída do STLG-FEM.

Tabela F.2 – Exemplo de arquivo de saída resultado de simulação

OUTPUT FROM PROGRAM STLG/FEM		version 1.1
A PLANE PROBLEM IS ANALYSED		
COEFFICIENTS OF THE AUTOCATALYTIC EQUATION:		
REACTION ORDER, N.....	=	0.1440E+01
REACTION ORDER, M.....	=	0.5606E+00
RATE CONSTANT, K.....	=	0.3648E+00
PHOTO-INITIATOR CONCENTRATION.....	=	0.0000E+00
CURE TEMPERATURE.....	=	0.8000E+02
ACTIVATION ENERGY, E.....	=	0.5090E+02
THERMAL CONDUCTIVITIES IN PLANE PROBLEMS:		
COEFFICIENT, KX.....	=	0.3590E-03
COEFFICIENT, KY.....	=	0.3590E-03
PARAMETERS OF THE TRANSIENT ANALYSIS:		
MASS DENSITY.....	=	0.1155E+01
SPECIFIC HEAT.....	=	0.1410E+01
HEAT OF REACTION.....	=	0.3955E+03
TIME INCREMENT USED, DT.....	=	0.2000E-01
PARAMETER, ALFA.....	=	0.0000E+00
NUMBER OF TIME STEPS USED, NTIME.....	=	5000
TIME STEP AT WHICH LOAD STARTS, INSTP=		0
TIME STEP AT WHICH LOAD IS REMOVED, NSTP=		0
TIME INTERVAL AT WHICH SOLN. IS PRINTED.=		1
FINITE ELEMENT MESH INFORMATION:		
NUMBER OF NODES PER ELEMENT, NNE.....	=	4
NUMBER OF ELEMENTS IN THE MESH, NEM.....	=	75
NUMBER OF NODES IN THE MESH, NNM.....	=	96
NUMBER OF EQUATIONS TO BE SOLVE, NEQ.....	=	96
HALF BANDWIDTH OF THE MATRIX GLK, NHBW....	=	18
MESH SUBDIVISIONS, NX AND NY.....	=	15 5
NO OF SPECIFIED TEMPERATURES.....	=	96
NO OF SPECIFIED LIGHT INTENSITIES.....	=	0

Na seqüência, diagramas de blocos que ilustram as funcionalidades do programa.

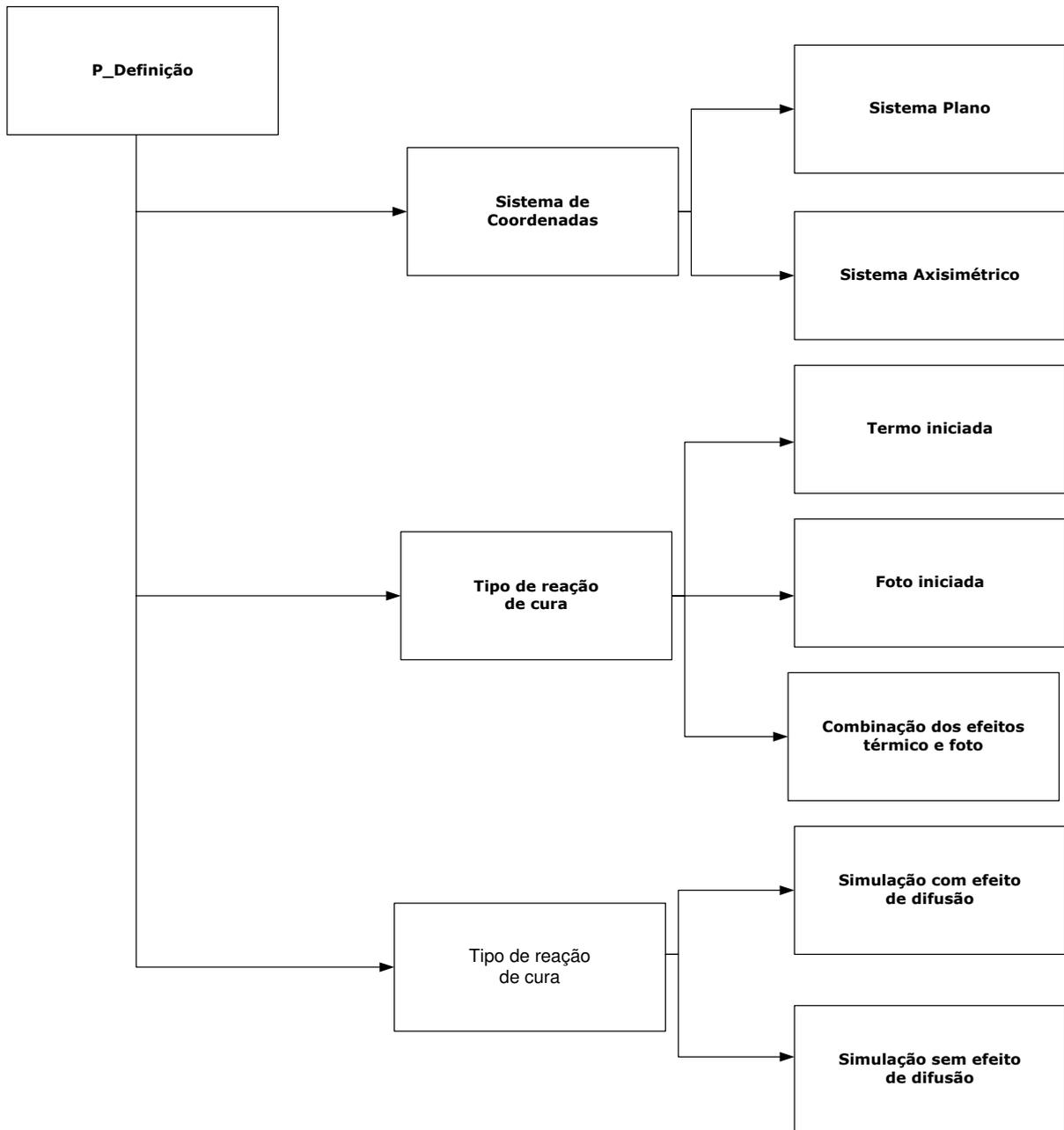


Figura F.1 – Menu P_Definição.

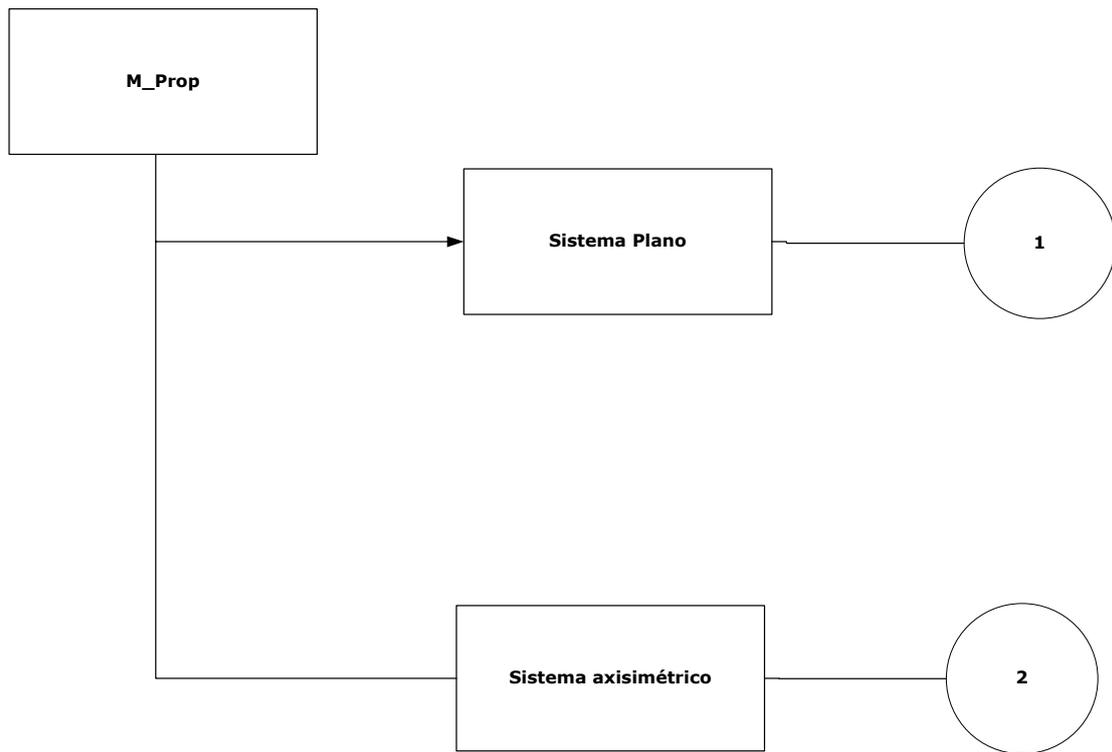


Figura F.2 – Menu M_Prop.

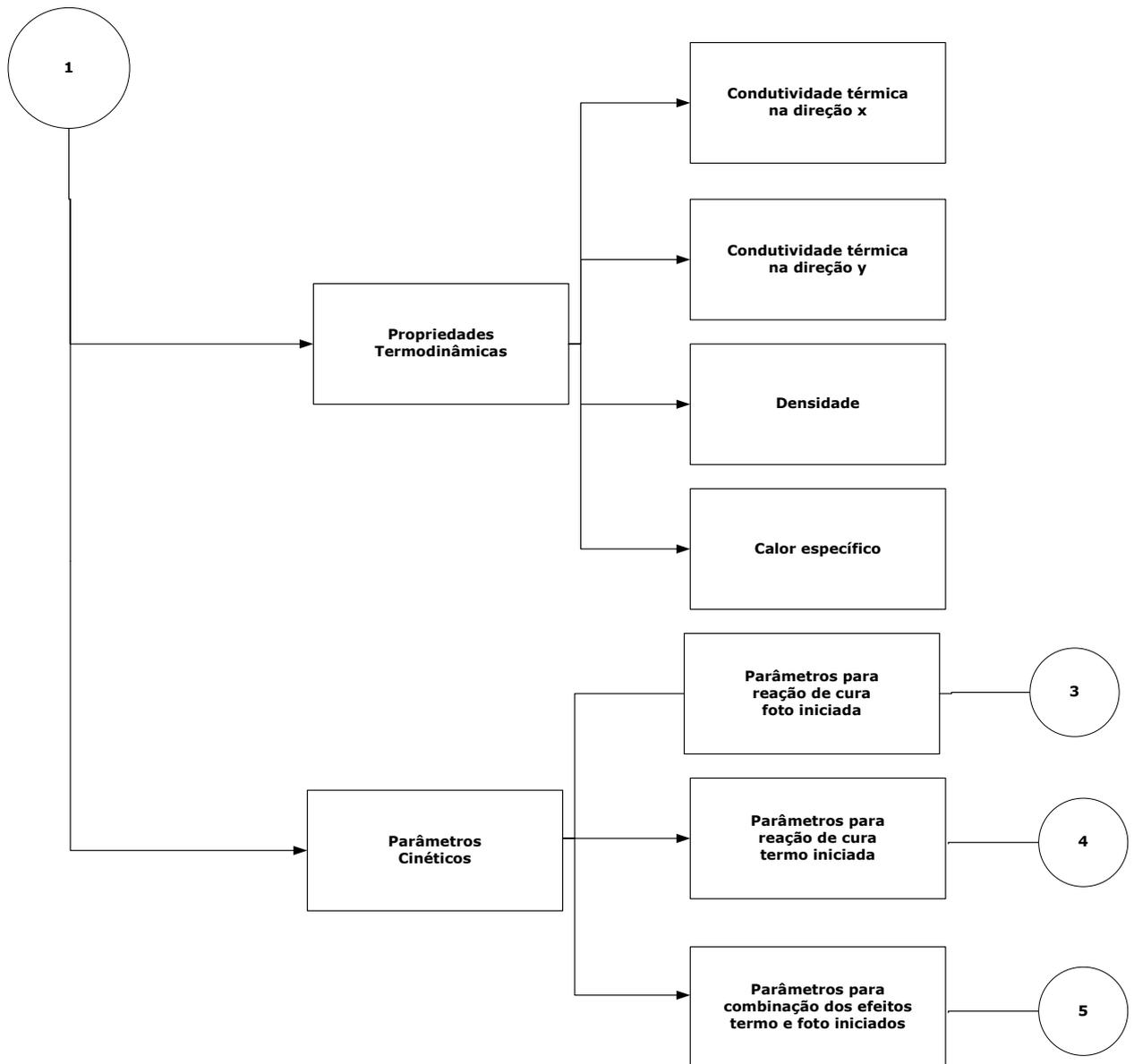


Figura F.3 – Menu M_Prop com opção para um problema com sistema cartesiano.

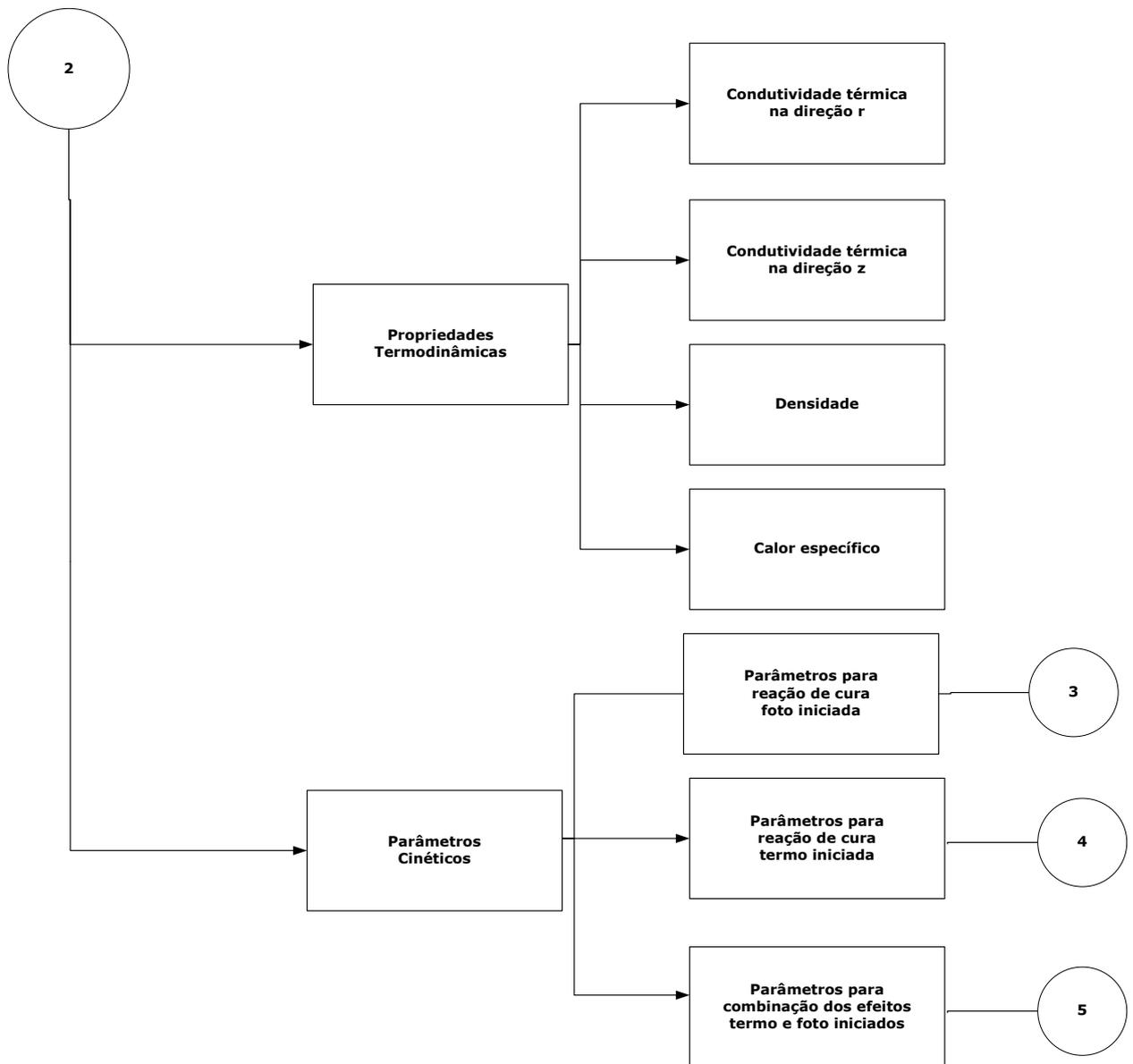


Figura F.4 – Menu M_Prop com opção para um problema com sistema axisimétrico.

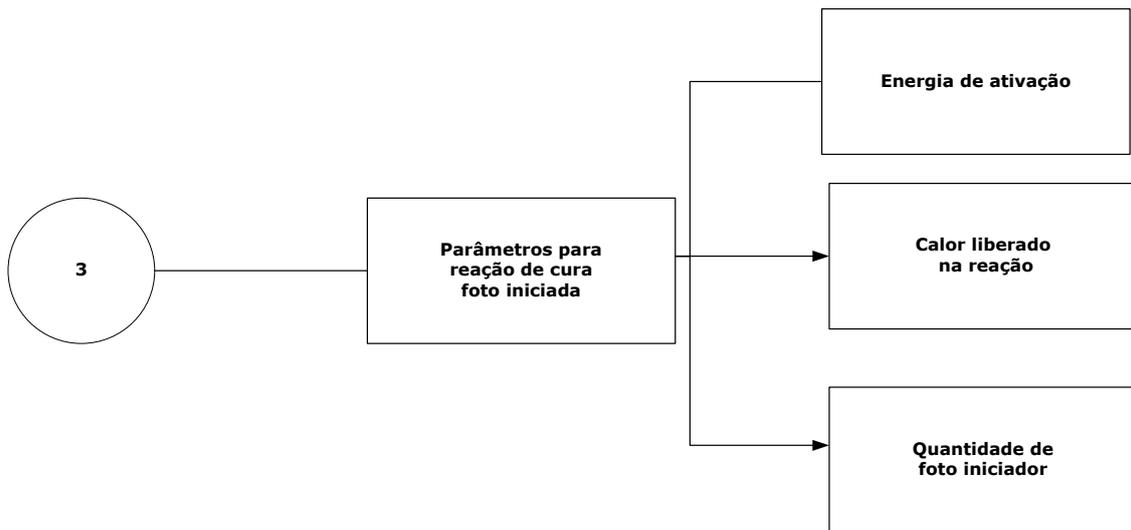


Figura F.5 – Os diferentes parâmetros para reações de cura foto iniciadas no Menu M_Prop.

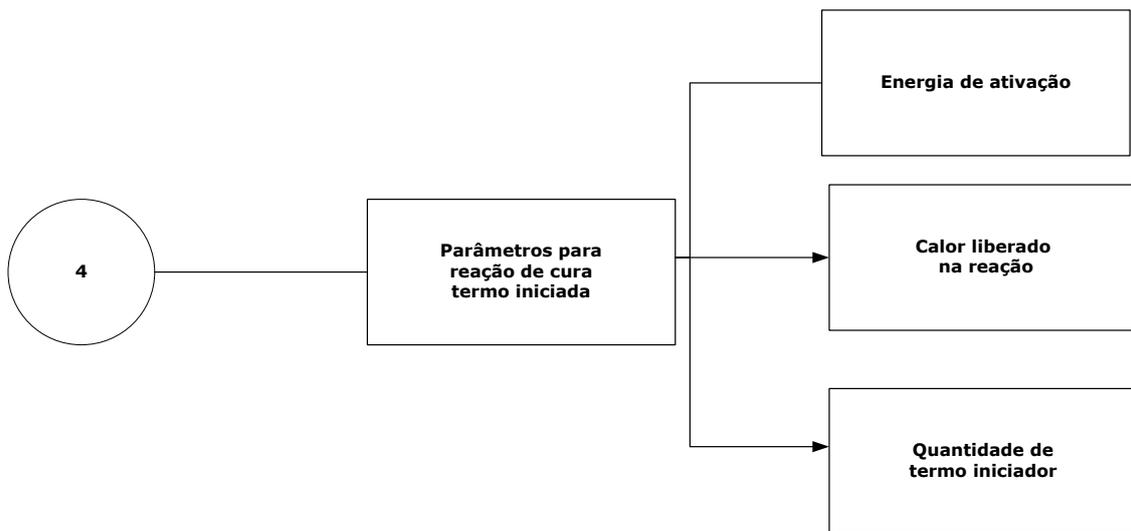


Figura F.6 – Os diferentes parâmetros para reações de cura termo iniciadas no Menu M_Prop.

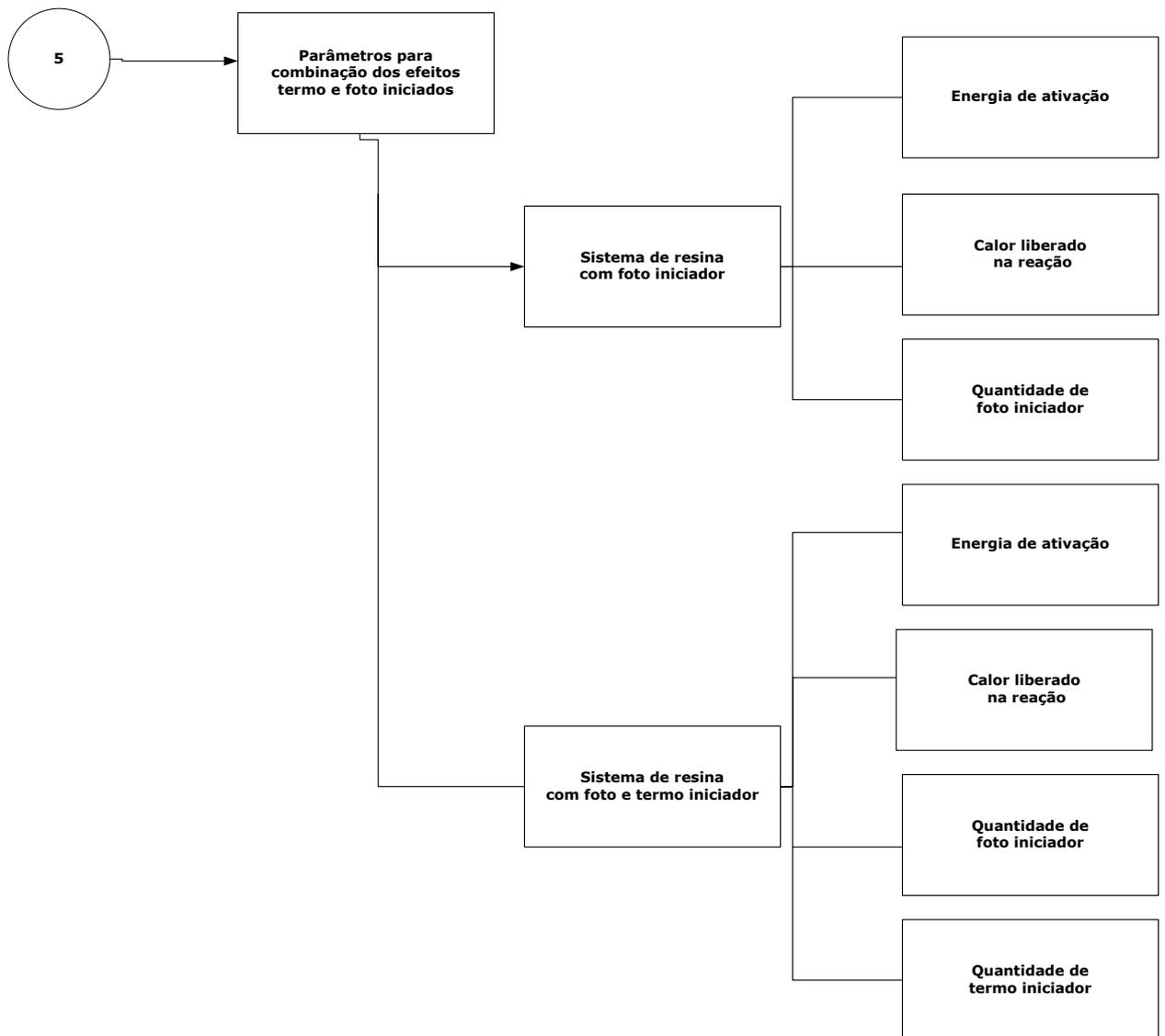


Figura F.7 – Os diferentes parâmetros para combinação dos efeitos termo e foto no Menu M_Prop.

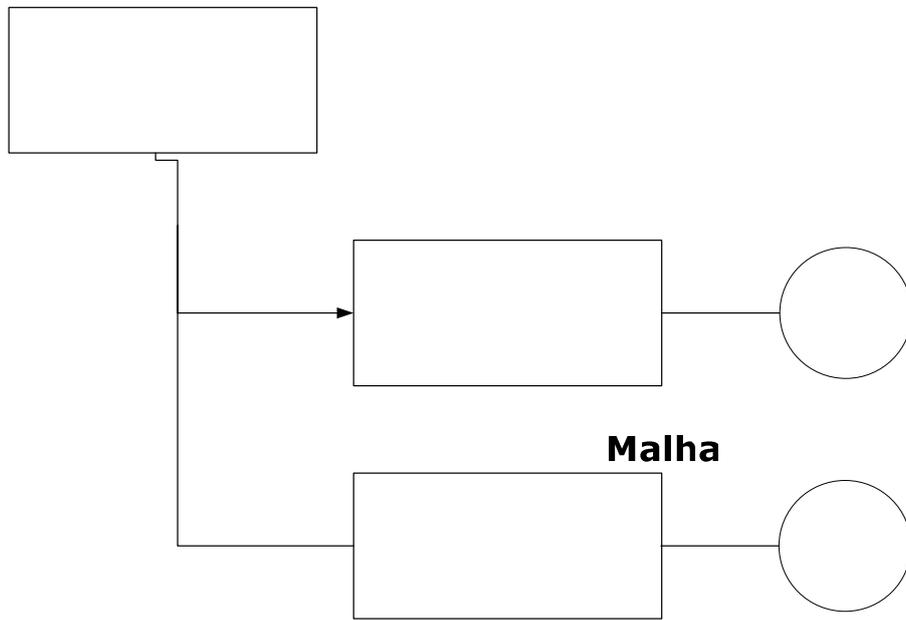


Figura F.8 – Menu Malha.

Ma

Malh

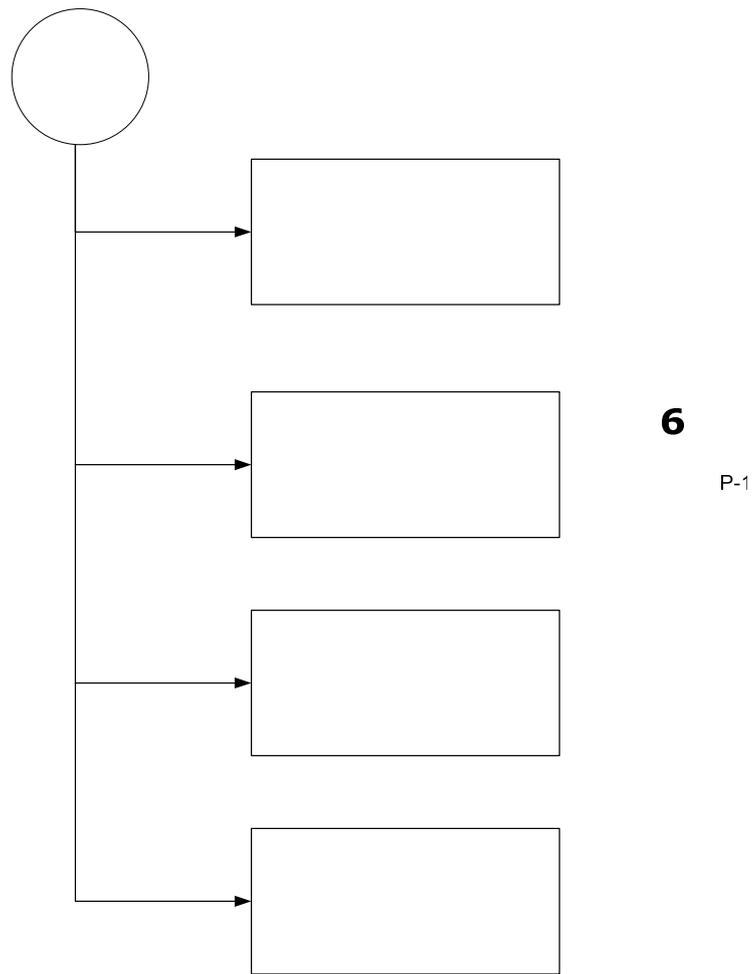


Figura F.9 – Diferentes parâmetros para geração da malha uniforme.

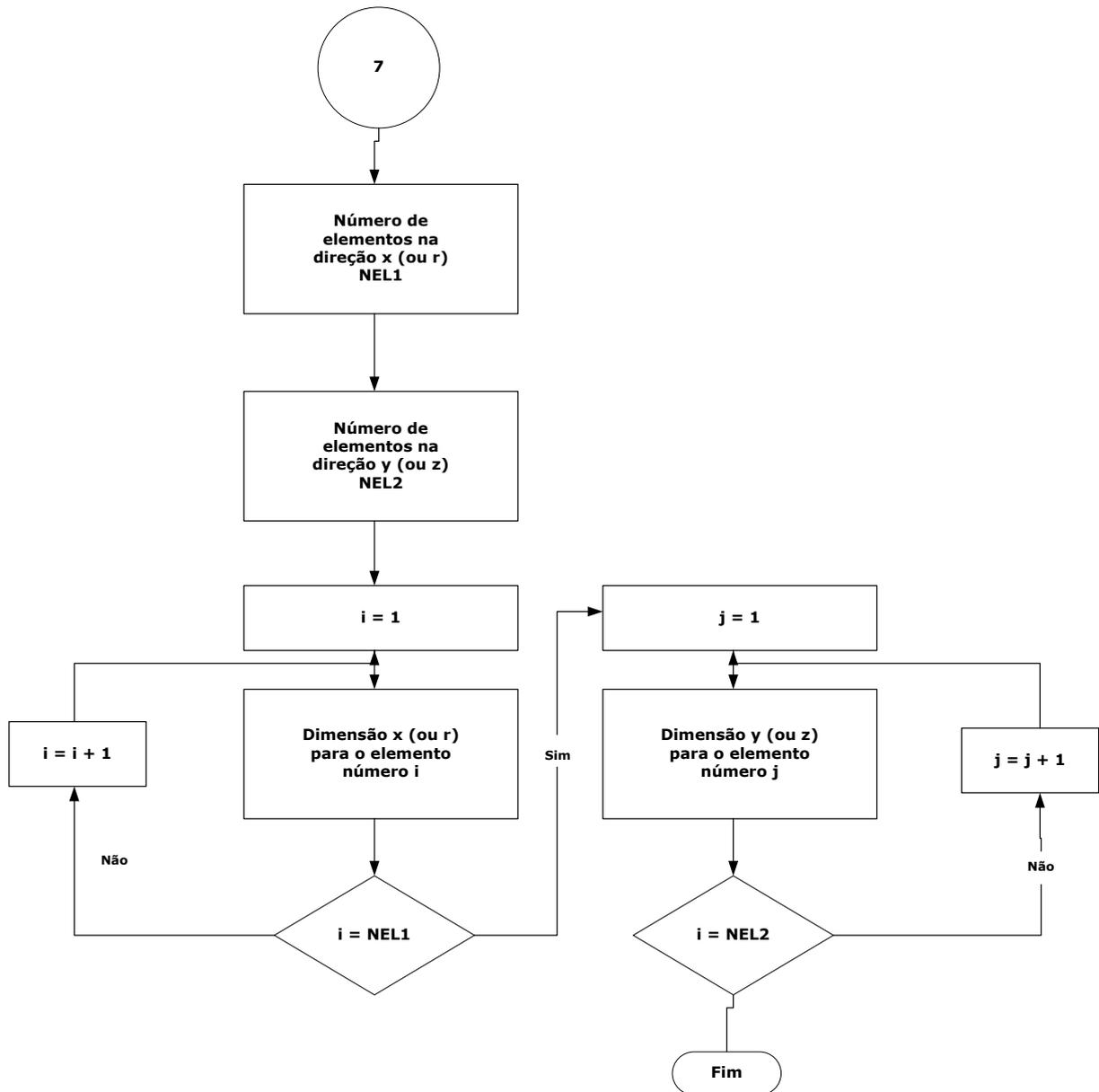


Figura F.10 – Geração da malha não uniforme.

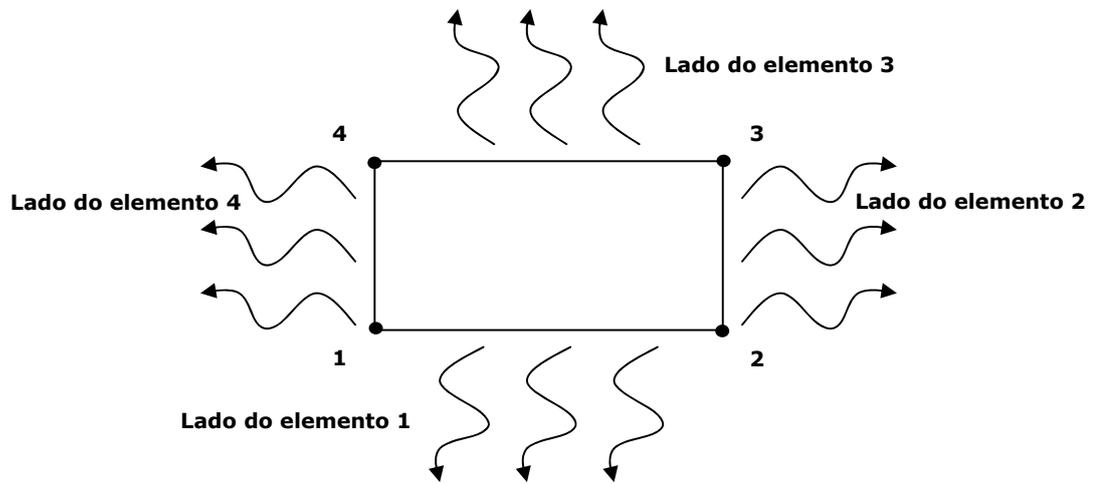
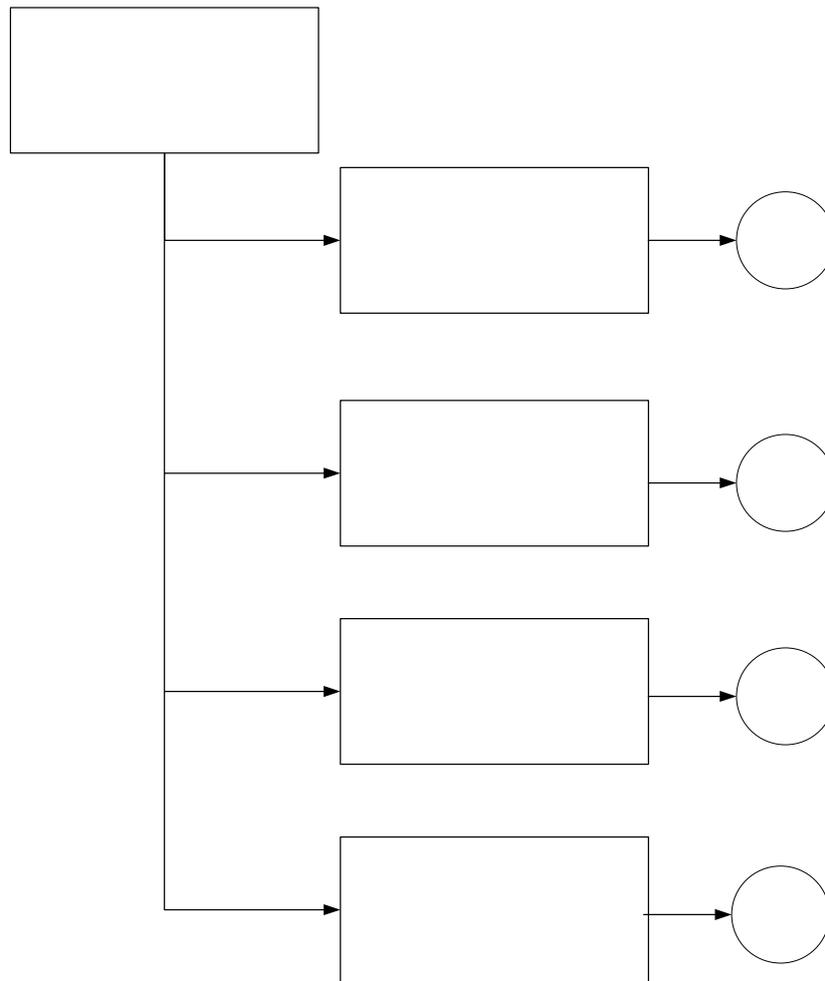


Figura F.11 – Esquema do lado dos elementos para definição da convecção.



B_Conds

Figura F.12 – Menu B_Conds.

P-1

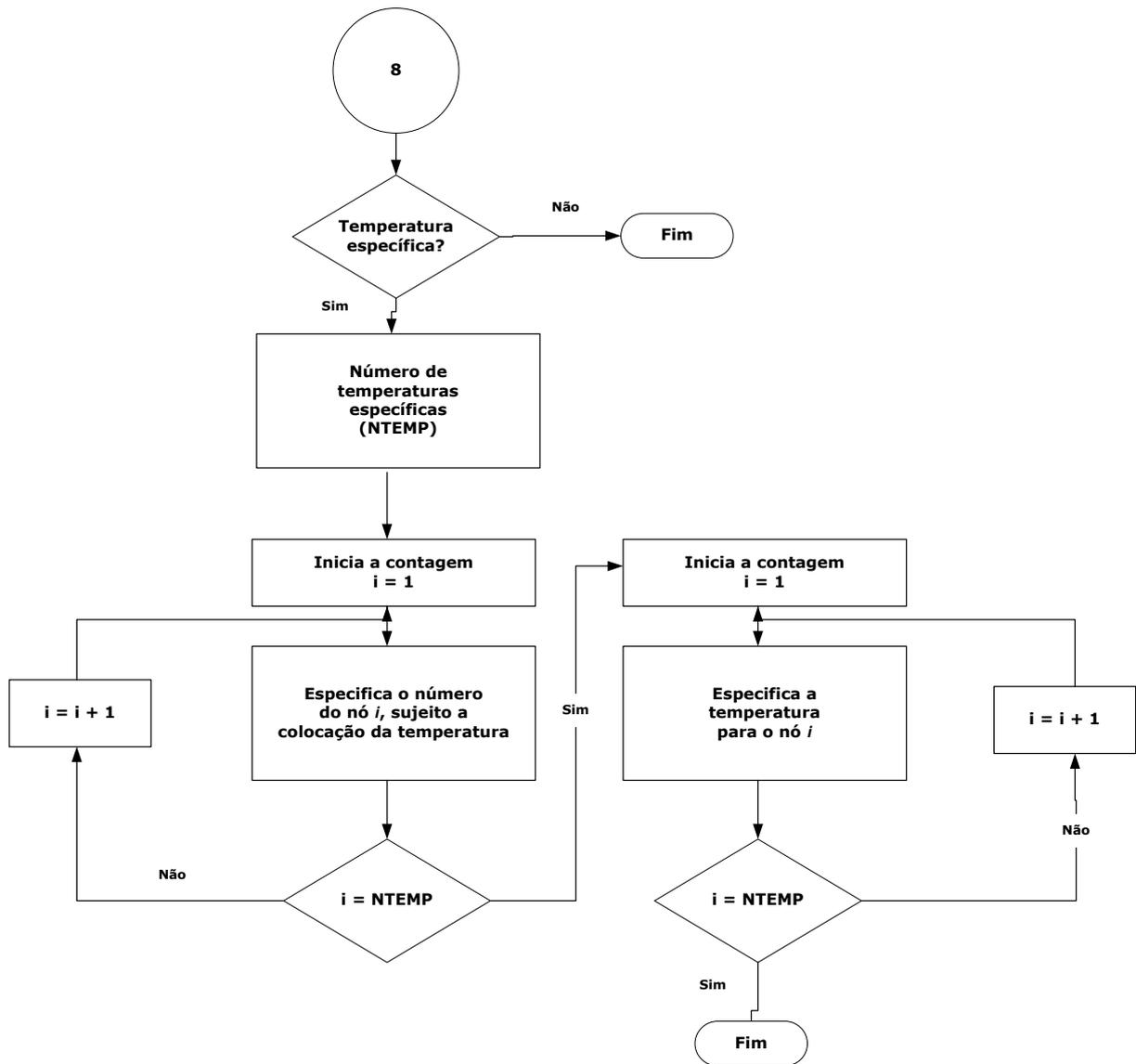


Figura F.13 – Definição da temperatura específica no Menu B_Conds.

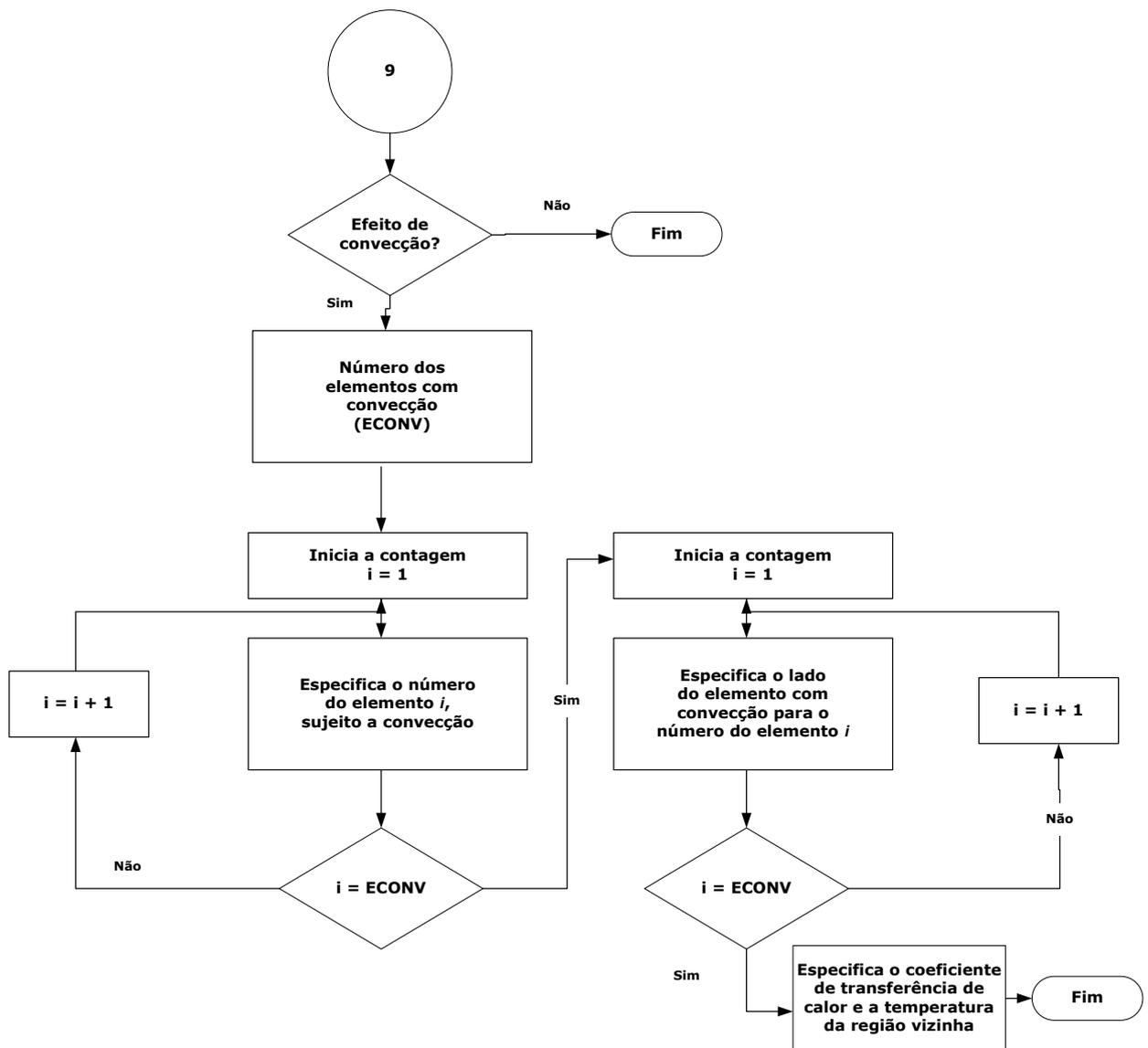


Figura F.14 – Definição da convecção no Menu B_Conds.

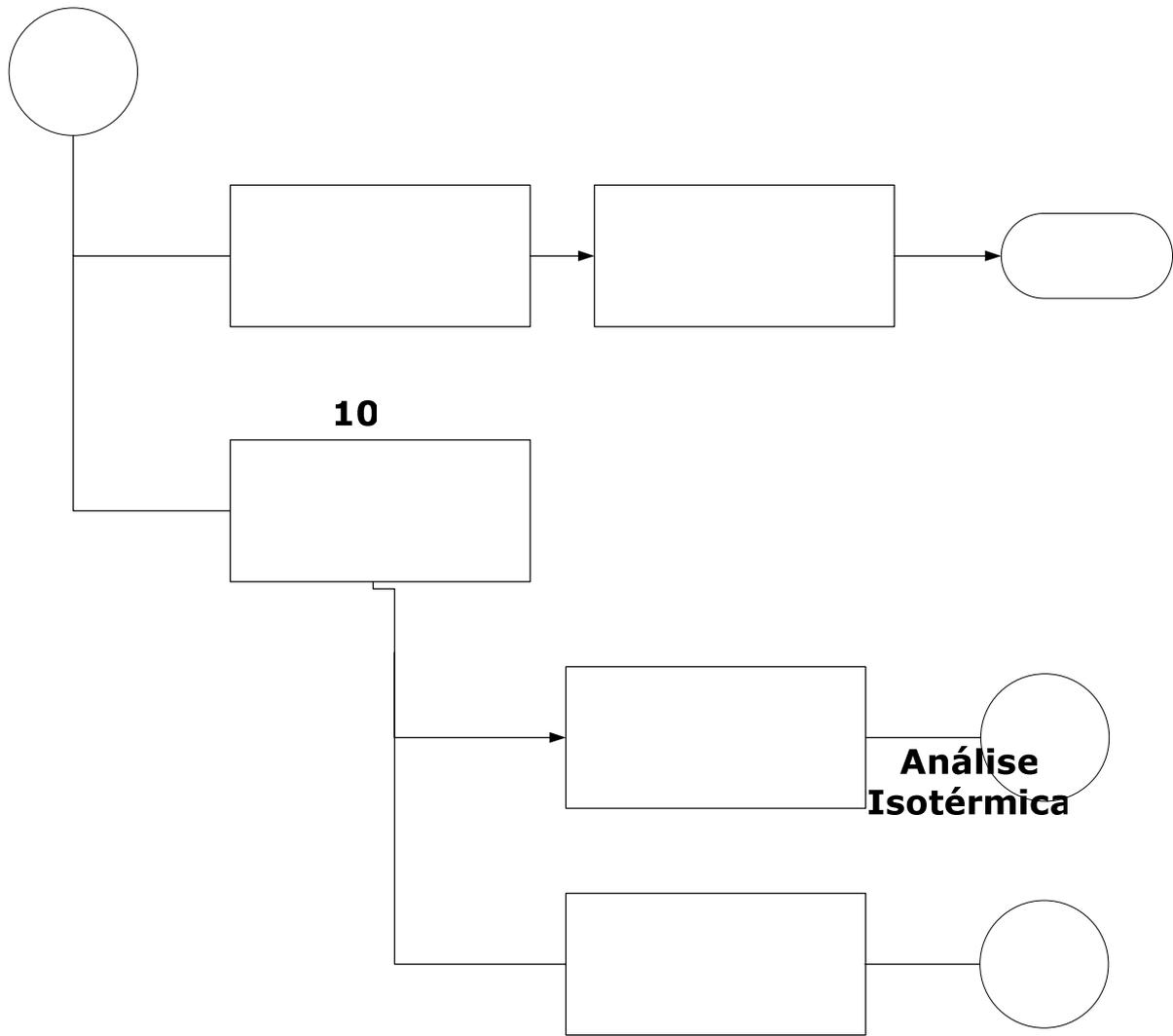


Figura F.15 – Definição das condições de fonte de calor no Menu B_Conds.

**Irradiação
Laser Infravermelho**

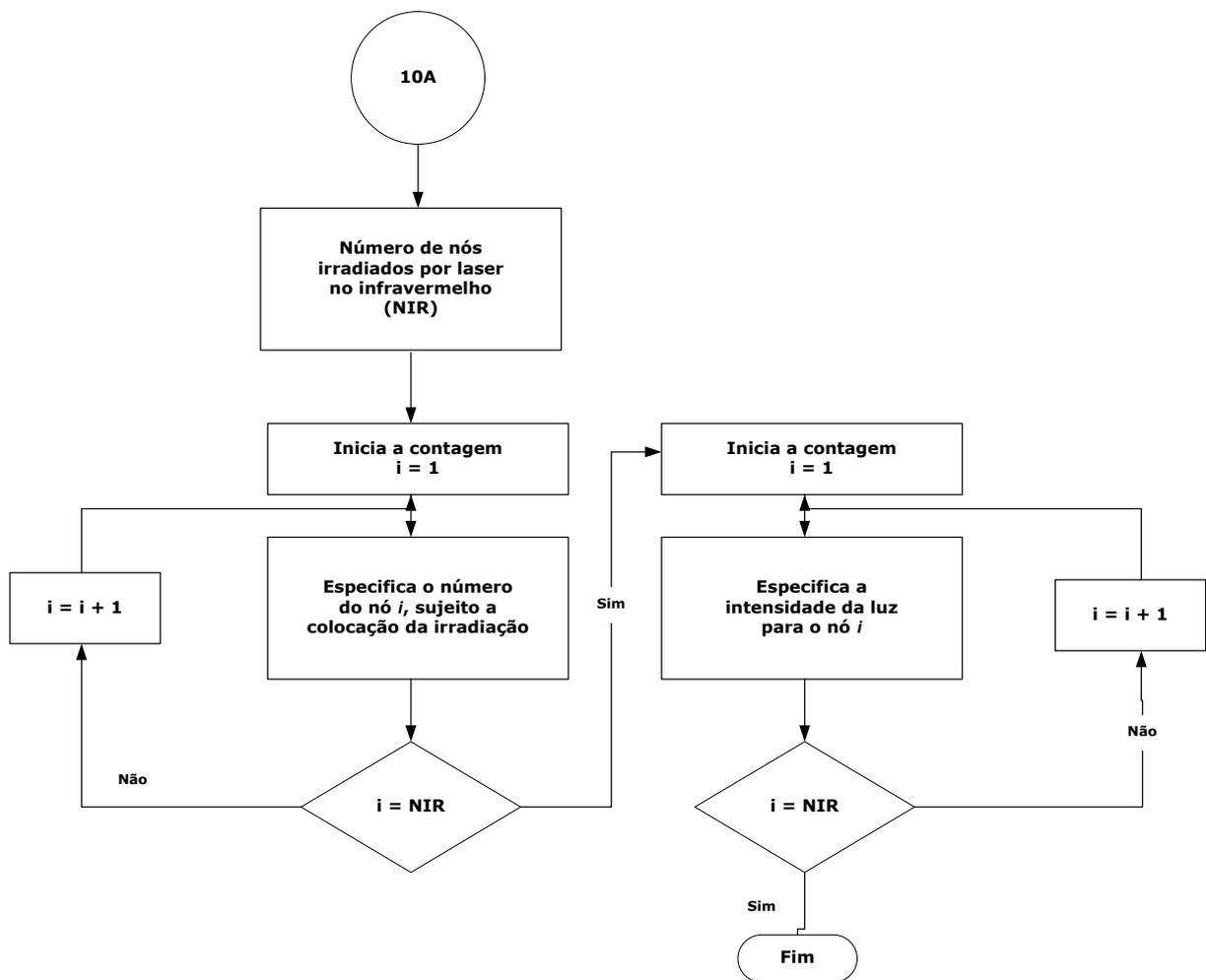


Figura F.16 – Definição da fonte *laser* IV estacionária no Menu B_Conds.

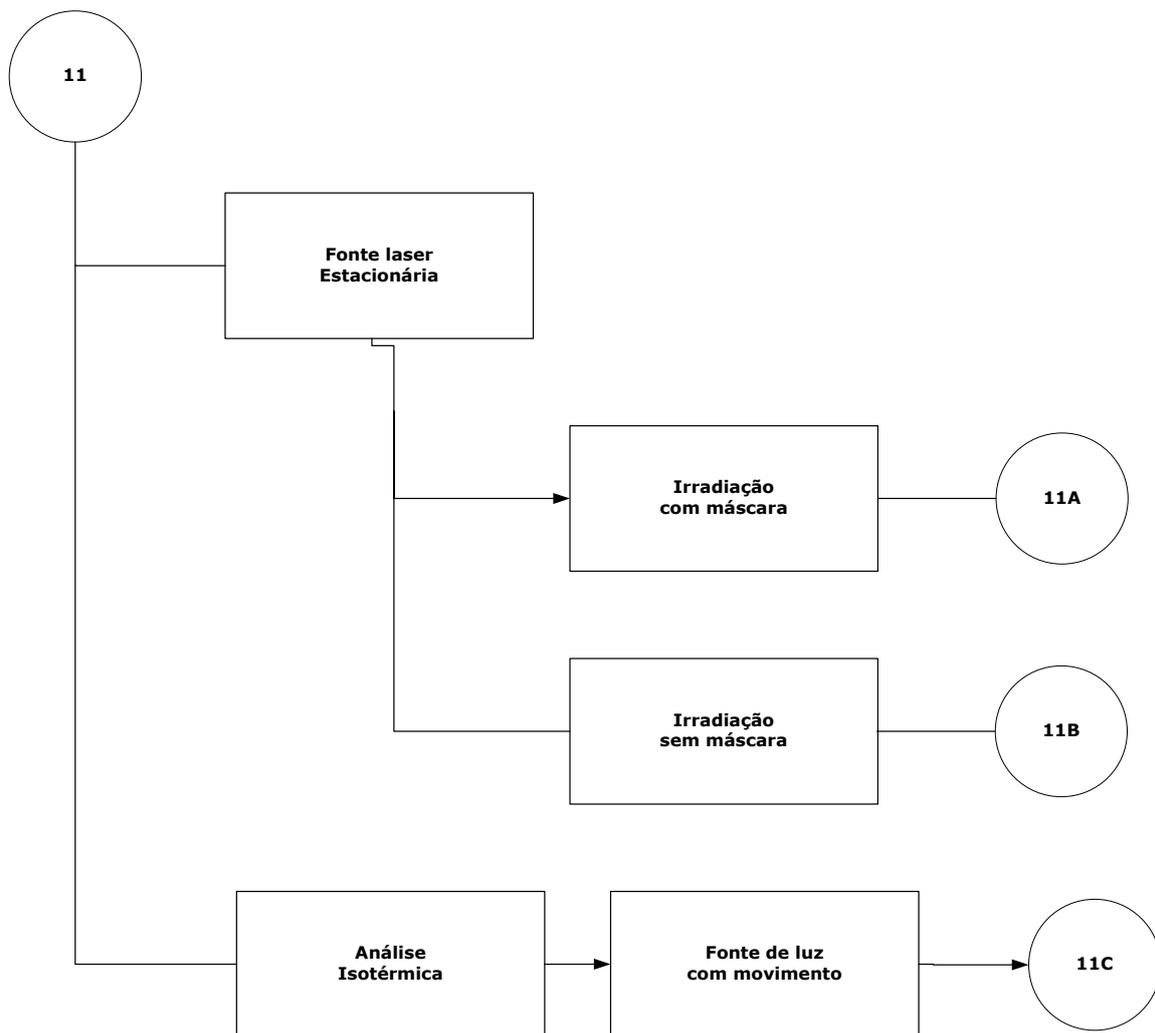


Figura F.18 – Definição das condições de fonte UV no Menu B_Conds.

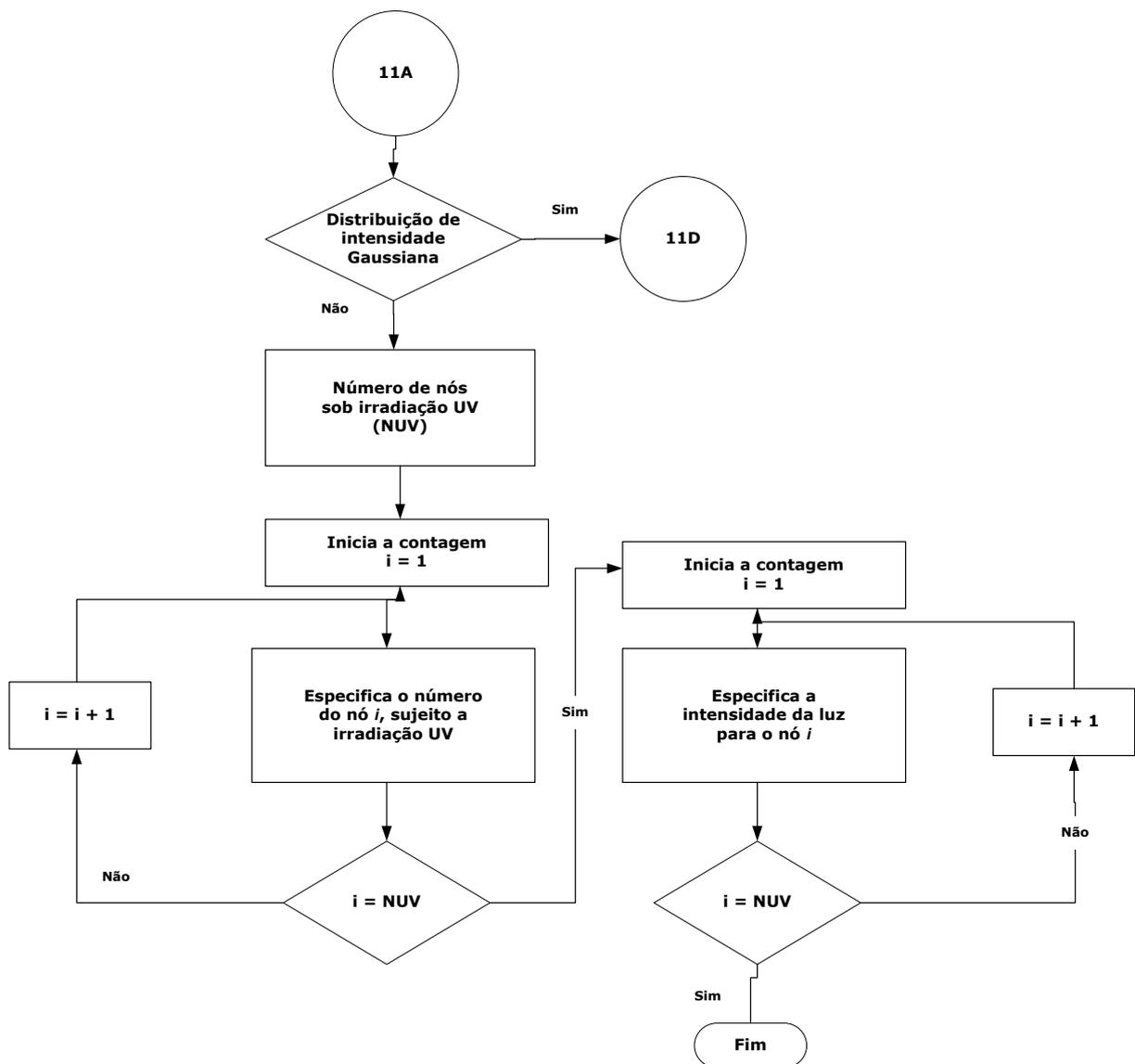


Figura F.19 – Definição da fonte *laser* UV estacionária no Menu B_Conds.

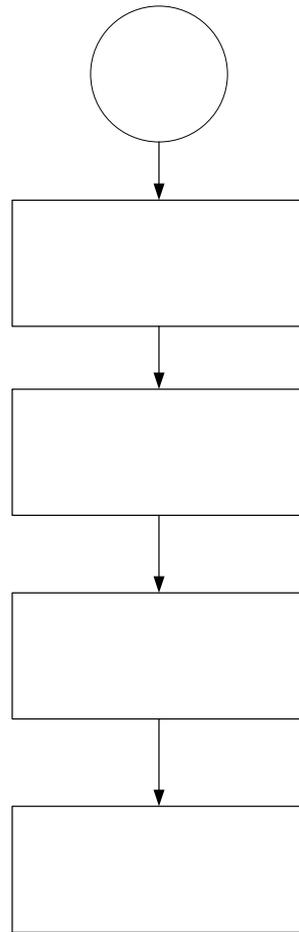


Figura F.20 – Irradiação através de máscara no Menu B_Conds.

11

**Pico
intensidad**

Comprimen

Dimensão c

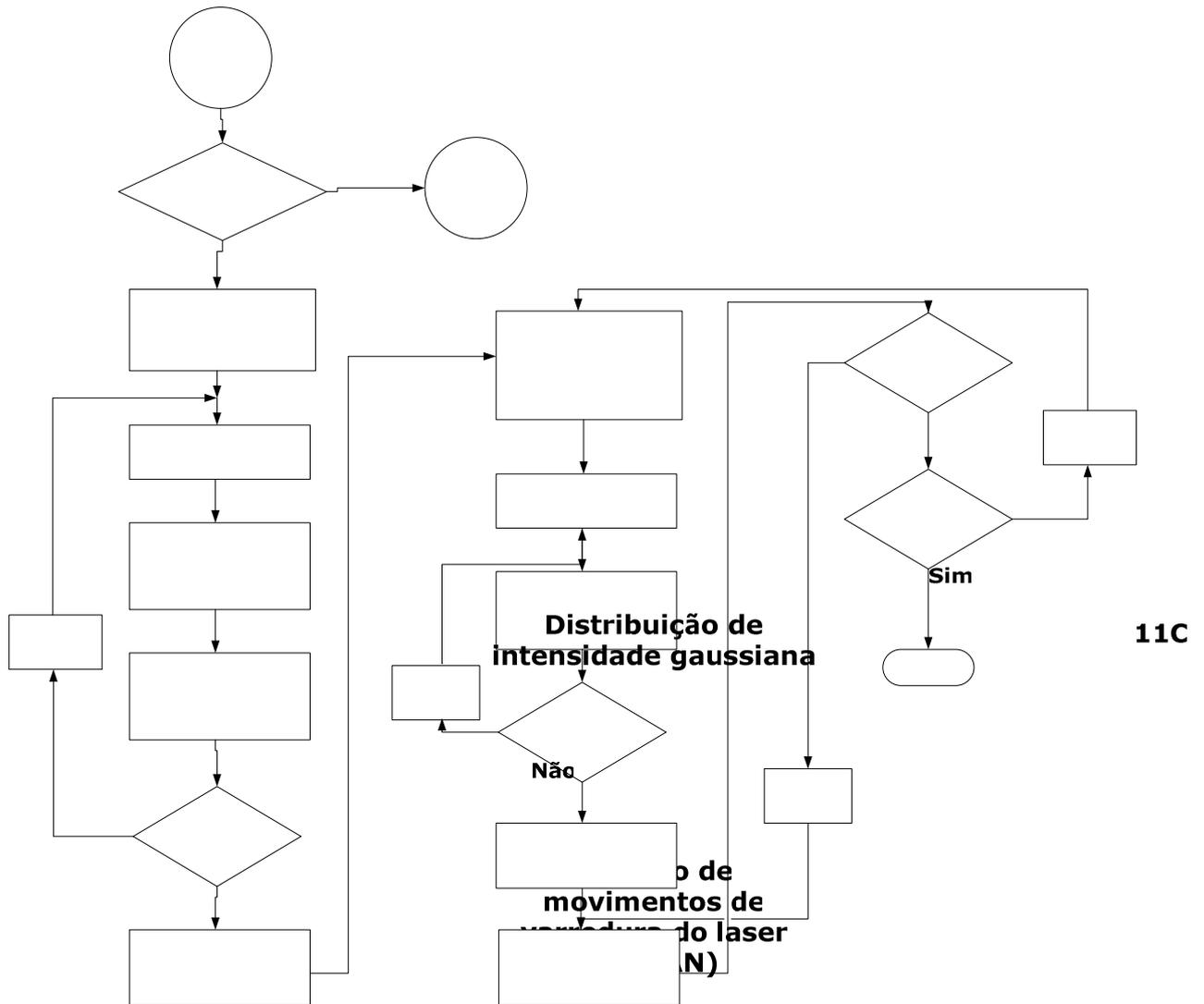


Figura F.21 – Definição da fonte *laser* UV em movimento no Menu B_Conds.

Inicia a contagem
 $i = 1$

Para varredura laser i ,
define o intervalo de
tempo para acionar a
fonte

$i = i + 1$

Para varredura laser i ,
define o intervalo de
tempo para remover a
fonte

$j = j + 1$

Não

Par
defi
sob

I

Esp
nó j

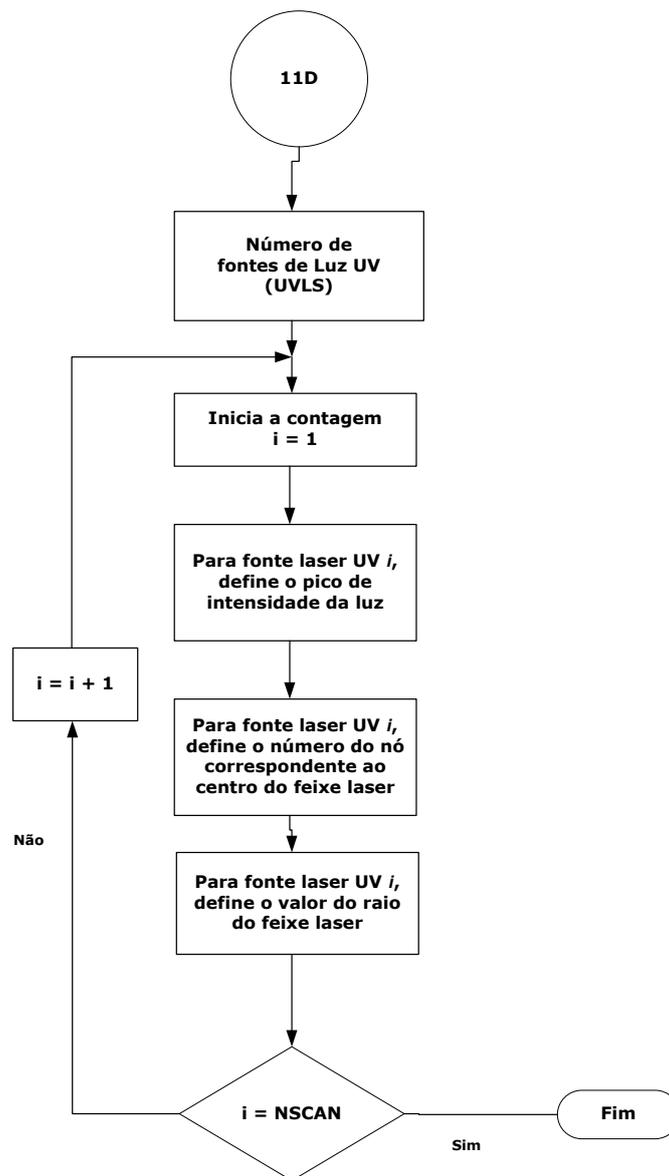


Figura F.22 – Definição da fonte *laser* UV estacionária considerando a distribuição gaussiana da intensidade, no Menu B_Conds.

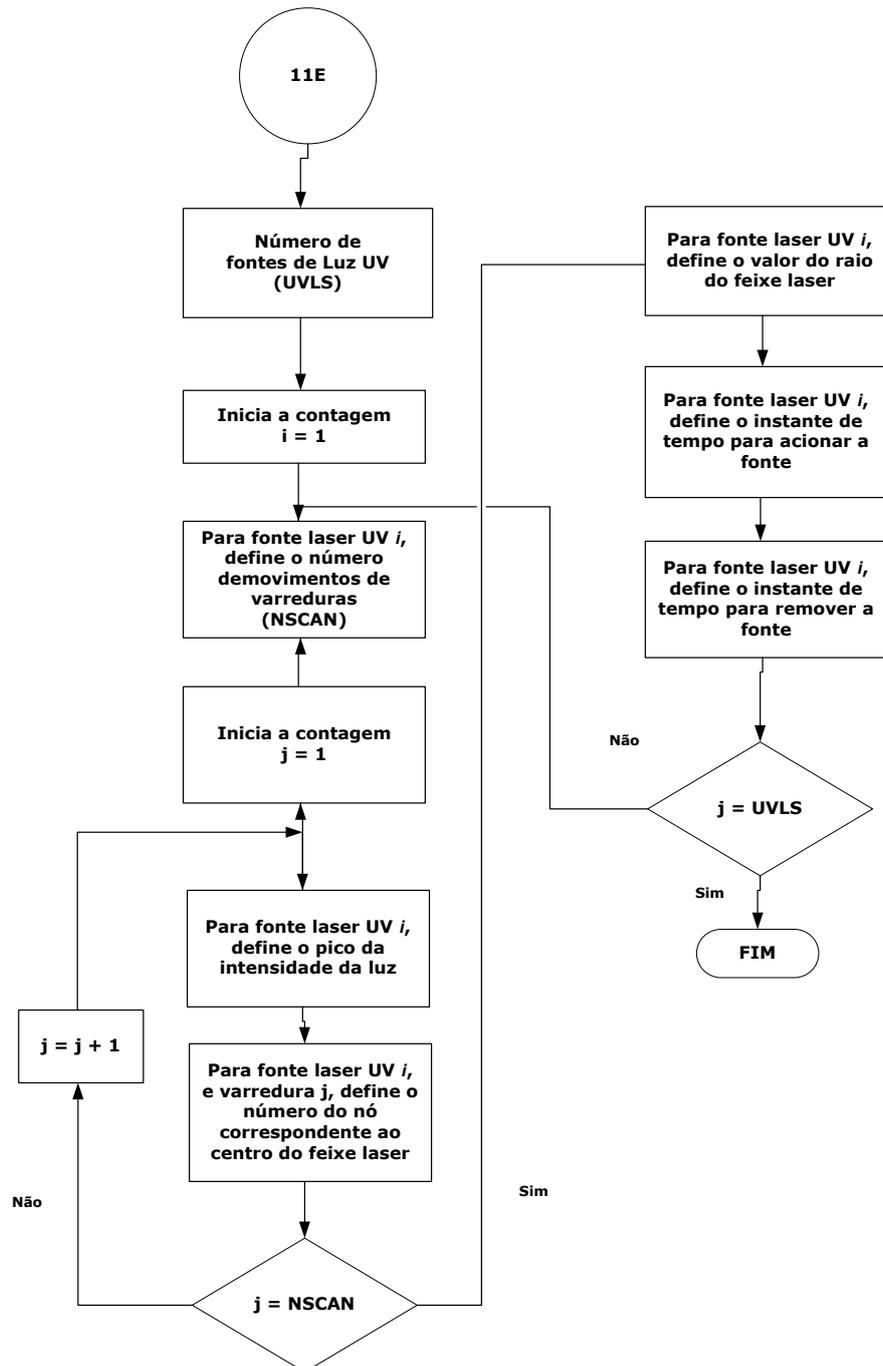


Figura F.23 – Definição da fonte *laser* UV estacionária considerando a distribuição gaussiana da intensidade, no Menu B_Conds.