

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

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA EQUIPAMENTO
DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA POR SINTERIZAÇÃO
SELETIVA A LASER (SLS)**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO CÉSAR DOS SANTOS

Florianópolis, novembro de 2009

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

S237d Santos, Fernando César dos

Desenvolvimento de software para equipamento de prototipagem rápida por sinterização seletiva a laser (SLS) [dissertação] / Fernando César dos Santos ; orientador, Carlos Henrique Ahrens. - Florianópolis, SC, 2009.

1 v. : il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Prototipagem rápida. 3. Engenharia de software. 4. Sinterização seletiva a laser. I. Ahrens, Carlos Henrique. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621

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

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA EQUIPAMENTO
DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA POR SINTERIZAÇÃO
SELETIVA A LASER (SLS)**

FERNANDO CÉSAR DOS SANTOS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

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

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc. – Coordenador do Curso

Banca Examinadora

**Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
(Presidente)**

Prof. Gean Vitor Salmória, Dr.

Prof. Carlos Alberto Martin, Dr.Ing.

*“Quando Deus quer, não há quem não queira”
Ayrton Senna da Silva*

AGRADECIMENTOS

Aos professores Carlos Henrique Ahrens e Neri Volpato pela orientação na realização deste trabalho. Ao professor Raul Günther (*in memoriam*) pelas lições de vida e palavras de incentivo no início desta jornada.

Aos professores do colegiado e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia através do CNPq pelo fomento à pesquisa.

Aos colegas dos laboratórios CIMJECT, LHW e NUFER pelo auxílio na pesquisa, em especial ao engenheiro Rodrigo Paggi, ao engenheiro David Burgoa e ao graduando em Engenharia Elétrica Lucas Goulart.

Aos amigos, em especial ao Igor, ao Douglas, ao André Luiz, ao Victor, à Sarah e ao Márcio, pela compreensão, apoio e amizade durante esta jornada e nos momentos de descontração.

Aos meus pais, Nilton dos Santos Filho e Varlei Cardoso dos Santos, e minha família pelo apoio nos momentos difíceis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	12
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO	17
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	19
2.1.1. <i>Sinterização Seletiva a Laser</i>	27
2.2. SOFTWARES DE APOIO À PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	32
2.2.1. <i>Software para SL (Buildstation)</i>	32
2.2.2. <i>Software para 3DP (Objet Studio)</i>	38
2.2.3. <i>Software para SLS (Alpha)</i>	40
2.2.4. <i>Software para Múltiplos Processos (RP³)</i>	44
2.2.5. <i>Análise Comparativa</i>	50
2.3. ENGENHARIA DE SOFTWARE.....	52
2.3.1. <i>Etapas do Desenvolvimento de Softwares</i>	53
3. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE	58
3.1. ANÁLISE DE REQUISITOS DO SOFTWARE	58
3.1.1. <i>Estudo de Viabilidade</i>	58
3.1.2. <i>Visão de Projeto</i>	60
3.1.3. <i>Especificação de Requisitos</i>	61
3.2. PROJETO DO SOFTWARE	62
3.2.1. <i>Projeto da Interface</i>	62
3.2.2. <i>Arquitetura do Software</i>	73
3.3. IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE.....	79
3.3.1. <i>Programação do Software</i>	79
3.3.2. <i>Integração com Software de Planejamento</i>	80
3.4. EVOLUÇÃO DO SOFTWARE.....	81
4. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SOFTWARE.....	82
4.1. SIMULAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA..	82
4.2. INSPEÇÕES DO SOFTWARE.....	89

4.3. TESTES DO SOFTWARE	95
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE A – RELATÓRIO DE VISITA TÉCNICA	102
APÊNDICE B – ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SOFTWARE SLS STUDIO	104
APÊNDICE C – ESTRUTURA INTERNA DOS ARQUIVOS DO SLS STUDIO	120
APÊNDICE D – MÓDULOS E FORMULÁRIOS DO SLS STUDIO	124
APÊNDICE E – MANUAL DE PROGRAMAÇÃO DE DRIVERS DO SLS STUDIO	126
ANEXO I – MANUAL DA PLACA DE HARDWARE DO SIMULADOR SLS	129

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESTIMATIVAS INICIAIS DO LUCRO NA COMERCIALIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E SERVIÇOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA (ADAPTADO DE WOHLERS, 1995)	16
FIGURA 2 – ESTIMATIVA MUNDIAL ANUAL DA QUANTIDADE DE PROTÓTIPOS PRODUZIDOS POR ADIÇÃO DE CAMADAS (FONTE: WOHLERS APUD SABINO NETTO, 2003).....	19
FIGURA 3 – PROCESSO DE ESTEREOLITOGRAFIA (ADAPTADO DE CUSTOMPARTNET, 2009)	22
FIGURA 4 – PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (ADAPTADO DE CUSTOMPARTNET, 2009)	23
FIGURA 5 – PROCESSO DE IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL (ADAPTADO DE CUSTOMPARTNET, 2009)	24
FIGURA 6 – PROCESSO DE MANUFATURA LAMINAR DE OBJETOS (ADAPTADO DE CUSTOMPARTNET, 2009)	25
FIGURA 7 – ETAPAS COMUNS AOS PROCESSOS DE RP (ADAPTADO DE BEAL, 2002)	26
FIGURA 8 – PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (ADAPTADO DE CUSTOMPARTNET, 2009).....	28
FIGURA 9 – INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PROCESSO SLS (ADAPTADO DE VOLPATO, 2001)	30
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO BÁSICA DO SISTEMA-PROTÓTIPO SLS DO CIMJECT (ADAPTADO DE KRUTH <i>ET AL.</i> , 2005).....	31
FIGURA 11 – INTERFACE PRINCIPAL DO SOFTWARE BUILDSTATION.....	32
FIGURA 12 – CAIXA DE DIÁLOGO “CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DO SISTEMA SL” (<i>SLA PERFORMANCE CHARACTERISTICS</i>)	34
FIGURA 13 – CAIXA DE DIÁLOGO “CONTROLE DE MOVIMENTO” (<i>MOTION CONTROL</i>).....	35
FIGURA 14 – CAIXA DE DIÁLOGO “TERMOSTATO” (<i>THERMOSTAT</i>).....	35
FIGURA 15 – CAIXA DE DIÁLOGO “ESCOLHER ARQUIVO DE RESINA” (<i>CHOOSE RESIN FILE</i>).....	36
FIGURA 16 – CAIXA DE DIÁLOGO “ADICIONAR NOVA RESINA” (<i>ADD NEW RESIN</i>).....	36
FIGURA 17 – CAIXA DE DIÁLOGO “SELECIONAR ARQUIVO DE CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA” (<i>SELECT GEOMETRIC CALIBRATION FILE</i>).....	37
FIGURA 18 – CAIXA DE DIÁLOGO “POSIÇÃO DA PEÇA” (<i>PART POSITION</i>).....	37
FIGURA 19 – INTERFACE PRINCIPAL DO SOFTWARE OBJET STUDIO	38
FIGURA 20 – CAIXA DE DIÁLOGO “INSERIR” (<i>INSERT</i>) PARA SELEÇÃO DA PEÇA A SER FABRICADA.....	39
FIGURA 21 – MENU DE OPÇÕES “FERRAMENTAS” (<i>TOOLS</i>) DO SOFTWARE OBJET STUDIO.....	39

FIGURA 22 – CAIXA DE DIÁLOGO “OPÇÕES > CONFIGURAÇÕES” (<i>OPTIONS > SETTINGS</i>).....	40
FIGURA 23 – INTERFACE PRINCIPAL DO SOFTWARE ALPHA.....	41
FIGURA 24 – MENU “ARQUIVO > COMEÇAR” DO SOFTWARE ALPHA.....	41
FIGURA 25 – CAIXA DE DIÁLOGO “CONTROLE ALFA FGM”	42
FIGURA 26 – MENU “GRAVAR > CONSTRUIR PEÇAS”	42
FIGURA 27 – CAIXA DE DIÁLOGO “DADOS DO MATERIAL”	43
FIGURA 28 – CAIXA DE DIÁLOGO “SINTERIZAÇÃO A LASER”.....	44
FIGURA 29 – MENUS “FERRAMENTAS > SETUP” E “AJUDA > HELP”	44
FIGURA 30 – A INTERFACE PRINCIPAL DO RP ³ , COM O MÓDULO SLS ATIVADO	45
FIGURA 31 – RESULTADO DO FATIAMENTO DE UM MODELO STL PELO RP ³	46
FIGURA 32 – RESULTADO DO PREENCHIMENTO DE UMA CAMADA PELO RP ³ , COM DESTAQUE PARA TRAJETÓRIA DA VARREDURA E CONTORNO	47
FIGURA 33 – CAIXA DE DIÁLOGO “ALTERAR PARÂMETROS – SLS WINMARK”	48
FIGURA 34 – CAIXA DE DIÁLOGO “JANELA DE INTEGRAÇÃO RP ³ – WINMARK”	49
FIGURA 35 – MODELO CASCATA (OU CICLO DE VIDA CLÁSSICO) E AS ETAPAS DO SDP.....	55
FIGURA 36 – FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DA VISÃO DE PROJETO.....	61
FIGURA 37 – INTERFACE PRINCIPAL DO SOFTWARE SLS STUDIO	63
FIGURA 38 – MENÚS DE OPÇÕES DO SLS STUDIO.....	64
FIGURA 39 – A JANELA DE “PROJETO PADRÃO DE FABRICAÇÃO”.....	65
FIGURA 40 – ABA “ÁREA DE VISUALIZAÇÃO” DO PROJETO PADRÃO DO SLS STUDIO.....	65
FIGURA 41 – CAIXA DE DIÁLOGO “OPÇÕES > GERAL”	66
FIGURA 42 – CAIXA DE DIÁLOGO “OPÇÕES > SISTEMA SLS”	67
FIGURA 43 – CAIXA DE DIÁLOGO “OPÇÕES > SALVAR”	68
FIGURA 44 – CAIXA DE DIÁLOGO “OPÇÕES > ATALHOS”	69
FIGURA 45 – CAIXA DE DIÁLOGO “NAVEGADOR DE PASTA”.....	69
FIGURA 46 – CAIXA DE DIÁLOGO “CONTROLE DE SISTEMA”	70
FIGURA 47 – CAIXA DE DIÁLOGO “NOVA CAMADA”	70
FIGURA 48 – CAIXA DE DIÁLOGO “EDITAR CAMADAS”	71
FIGURA 49 – CAIXA DE DIÁLOGO “EXIBIR CAMADAS”	71
FIGURA 50 – CAIXA DE DIÁLOGO “NOVO MATERIAL”	72
FIGURA 51 – CAIXA DE DIÁLOGO “EDITAR MATERIAIS”.....	72
FIGURA 52 – CAIXA DE DIÁLOGO “EXIBIR MATERIAIS”	73
FIGURA 53 – ARQUITETURA DO SOFTWARE SLS STUDIO.....	74
FIGURA 54 – ARQUIVO INI PARA ARMAZENAMENTO E RECUPERAÇÃO DE DADOS.....	76

FIGURA 55 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE FUNCIONAMENTO DO SIMULADOR.....	84
FIGURA 56 – REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE DO LASER E O SISTEMA DE CONTROLE MECÂNICO E TÉRMICO.....	85
FIGURA 57 – CONFIGURAÇÃO DOS PINOS DA PORTA PARALELA	86
FIGURA 58 – PLACA DE HARDWARE PARA SIMULADOR DE EQUIPAMENTO DE RP POR SLS	88
FIGURA 59 – SIMULADOR DE EQUIPAMENTO DE RP POR SLS	89
FIGURA 60 – ERROS POR CATEGORIA NA FASE DE IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE.....	92
FIGURA 61 – ERROS POR CATEGORIA NA FASE DE IMPLEMENTAÇÃO DO DRIVER.....	92
FIGURA 62 – LINHAS DE CÓDIGO (LOC) POR HORA NA FASE DE IMPLEMENTAÇÃO.....	93
FIGURA 63 – ERROS POR LINHAS DE CÓDIGO (LOC) NA FASE DE IMPLEMENTAÇÃO.....	94
FIGURA 64 – ERROS POR HORA NA FASE DE IMPLEMENTAÇÃO.....	95

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE RP BASEADA NO ESTADO INICIAL DA MATÉRIA-PRIMA (FONTE: VOLPATO <i>ET AL.</i> , 2007).	21
TABELA 2 –	TABELA COMPARATIVA ENTRE OS SOFTWARES PARA RP.....	51
TABELA 3 –	CLASSIFICAÇÃO E INDEXAÇÃO DOS ERROS PADRÃO EM INSPEÇÃO DE SOFTWARE (FONTE: HUMPRHEY <i>APUD</i> NONEMACHER, 2003)	57
TABELA 4 –	COMPONENTES DA ARQUITETURA DO SOFTWARE SLS STUDIO.....	75
TABELA 5 –	ELEMENTOS DA SINTAXE DE UM ARQUIVO INI	75
TABELA 6 –	ARQUIVOS DO PACOTE DE INSTALAÇÃO DO SLS STUDIO.....	78
TABELA 7 –	CONFIGURAÇÃO DOS PINOS DA PORTA PARALELA DA PLACA DE HARDWARE	87
TABELA 8 –	ERROS POR CATEGORIA E SUBCATEGORIA PARA O SOFTWARE	90
TABELA 9 –	ERROS POR CATEGORIA E SUBCATEGORIA PARA O DRIVER...91	
TABELA 10 –	LINHAS DE CÓDIGO (LOC) VERSUS TEMPO DE IMPLEMENTAÇÃO.....	93
TABELA 11 –	QUANTIDADE DE ERROS VERSUS LINHAS DE CÓDIGO (LOC) 93	
TABELA 12 –	QUANTIDADE DE ERROS VERSUS TEMPO DE IMPLEMENTAÇÃO.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CAD – *Computer-Aided Design* (Projeto Auxiliado por Computador)

CAM – *Computer-Aided Manufacturing* (Fabricação Auxiliada por Computador)

CIMJECT – Laboratório de Projeto e Fabricação de Componentes de Plástico Injetados

CTA – Centro Tecnológico da Aeronáutica

FDM – *Fused Deposition Modeling* (Modelagem por Fusão e Deposição)

FGM – *Functionally Graded Materials* (Materiais com Gradientes Funcionais)

IJP – *Ink Jet Printing* (Impressão a Jato de Tinta)

LabMat - Laboratório de Materiais

LENS – *Laser Engineered Net Shaping* (Fabricação de Forma Final a Laser)

LHW – Laboratório de Hardware

LM – *Layered Manufacturing* (Manufatura por Camadas)

LOC – *Lines of Code* (Linhas de Código)

LOM – *Laminated Object Manufacturing* (Manufatura de Objetos Laminados)

LS – *Laser Sintering* (Sinterização a Laser)

NUFER – Núcleo de Prototipagem Rápida e Ferramental

PDP – *Product Development Process* (Processo de Desenvolvimento de Produto)

PLT – *Paper Lamination Technology* (Tecnologias com Lâminas de Papel)

PT – *Performance Test* (Teste de Desempenho)

RP – *Rapid Prototyping* (Prototipagem Rápida)

- SD – *Software Debugging* (Depuração de Software)
- SDP – *Software Development Process* (Processo de Desenvolvimento de Software)
- SE – *Software Engineering* (Engenharia de Software)
- SFF – *Solid Freeform Fabrication* (Fabricação de Formas Livres)
- SI – *Software Inspection* (Inspeção de Software)
- SL – *Stereolithography* (Estereolitografia)
- SLC – *Software Life Cycle* (Ciclo de Vida do Software)
- SLS – *Selective Laser Sintering* (Sinterização Seletiva a Laser)
- SP – *Software Programming* (Programação de Software)
- ST – *Software Testing* (Teste de Software)
- STL – *Structural Triangular Language*
- SVVP – *Software Verification and Validation Process* (Processo de Verificação e Validação de Software)
- UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
- UV – Ultravioleta
- WM – *Waterfall Model* (Modelo Cascata)
- 2D – Bidimensional
- 3D – Tridimensional
- 3DP – *3D Printing* (Impressão Tridimensional)

RESUMO

Entre os diversos processos de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*, ou RP) para fabricação de objetos sólidos tridimensionais existentes, destaca-se a Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering*, ou SLS). Nesta pesquisa analisaram-se diferentes softwares de RP existentes e aplicaram-se conhecimentos de Engenharia de Software no desenvolvimento metodológico de um sistema de controle (software) para um equipamento-protótipo SLS existente no laboratório CIMJECT. Respeitando o paradigma clássico da RP, a solução adotada consistiu em integrar o novo sistema de controle com um software de planejamento de processos de fabricação rápida por adição de camadas (RP³), desenvolvido pelo NUFER – Núcleo de Prototipagem e Ferramental, da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Para validação da solução foi desenvolvida, em parceria com o LHW – Laboratório de Hardware da UFSC, uma placa de hardware específica capaz de simular os principais elementos que compõem um equipamento de prototipagem rápida por SLS. Os resultados evidenciaram as potencialidades do software desenvolvido, em comparação com o antecessor existente no laboratório CIMJECT, justificando o uso das técnicas de Engenharia de Software empregadas.

Palavras-chave: Planejamento de Processo, Prototipagem Rápida, Sinterização Seletiva a Laser, Engenharia de Software.

ABSTRACT

Among different existing Rapid Prototyping (Rapid Prototyping, or RP) processes for manufacturing of three-dimensional solid objects is Selective Laser Sintering (Selective Laser Sintering or SLS). On this research different existing RP softwares were examined and the knowledge on Software Engineering (SE) was applied in the methodological development of a control system (a software) for an SLS prototype-apparatus available at CIMJECT laboratory. Following the classic RP model, the solution adopted was to integrate the new control system with a software for manufacturing process planning by rapid layers addition (RP³), developed by NUFER - Núcleo de Prototipagem e Ferramental, from UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná). For validating the solution it was developed in partnership with LHW – Laboratório de Hardware, from UFSC, a special hardware board able to simulate the main elements that comprises to an SLS rapid prototyping apparatus. The results confirmed the potentialities of the new developed software comparing to its predecessor available at CIMJECT laboratory, justifying the use of the employed Software Engineering techniques.

Keywords: Process Planning, Rapid Prototyping, Selective Laser Sintering, Software Engineering.

1. INTRODUÇÃO

O advento da globalização, o aumento da competitividade entre as empresas e a crescente demanda por produtos impuseram às empresas do setor de fabricação a diminuição no tempo do ciclo de desenvolvimento de produtos (BEAL, 2002). Neste âmbito, as tecnologias de fabricação rápida de formas tridimensionais sólidas por adição de camadas, comumente denominadas de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*), Manufatura Rápida (*Rapid Manufacturing*) ou Fabricação de Formas Livres (*Solid Freeform Fabrication*), têm sido preferidas para atender a uma série de aplicações.

Em meados dos anos 1990, as estimativas iniciais de lucro com a comercialização de equipamentos e serviços de prototipagem rápida no mercado mundial, conforme mostra a Figura 1, indicavam uma perspectiva crescimento de 60 milhões de dólares logo na primeira década (WOHLERS, 1995).

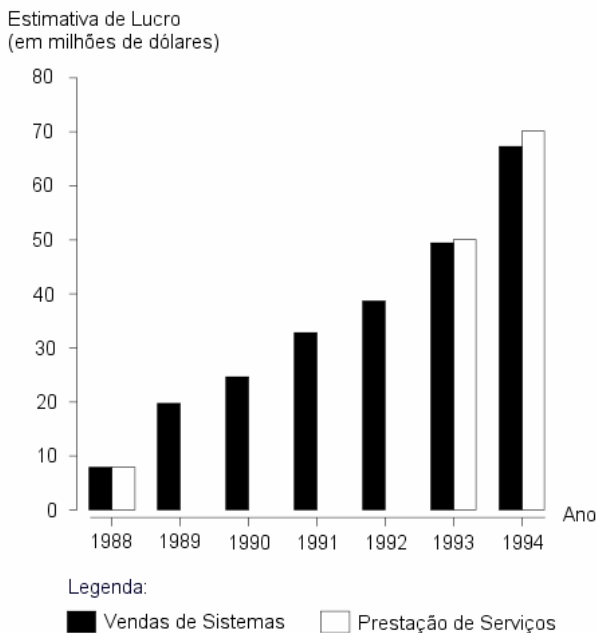


Figura 1 – Estimativas iniciais do lucro na comercialização de equipamentos e serviços de prototipagem rápida (Adaptado de WOHLERS, 1995)

No Brasil, ao final de 2004, o parque industrial já era composto por 51 máquinas para prototipagem rápida e o mercado nacional já apresentava grande potencial para utilização destas tecnologias devido a uma série de fatores intrínsecos (capacidade de expansão, liderança regional na América do Sul, grande número de montadoras de automóveis e empresas de base, tendência de expansão de escritórios de design e desenvolvimento). Entretanto, o domínio destas tecnologias se mantinha restrito ao ambiente industrial, limitando e dificultando a expansão dos conhecimentos acerca dos parâmetros de controle do processo. Diante deste cenário, instituições brasileiras de ensino e pesquisa, tais como o NUFER da UTFPR e o Laboratório CIMJECT da UFSC passaram a realizar estudos visando produzir sistemas (hardware e software) para prototipagem rápida. O NUFER concentrou-se no desenvolvimento de sistemas para controle e planejamento do processo de prototipagem rápida por Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling*, ou FDM), enquanto o CIMJECT iniciou o desenvolvimento de uma primeira versão de um sistema para prototipagem rápida por Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering*, ou SLS) (VOLPATO *et al*, 2005).

Contudo, a evolução destes sistemas integrados de hardware e software para fabricação rápida tem elevado a complexidade de seus projetos relativamente ao gerenciamento das atividades de desenvolvimento e diversas sugestões para melhorias foram feitas por KULMAN (2006) em seu trabalho. Neste contexto, a Engenharia de Software apresentou-se como uma alternativa para auxiliar no planejamento, organização e direcionamento de tais esforços.

1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho objetiva o desenvolvimento de um software para controle do processo de prototipagem rápida por sinterização seletiva a laser aplicando técnicas de Engenharia de Software

Para a consecução deste objetivo geral, busca-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um software capaz de controlar um equipamento de prototipagem rápida por sinterização seletiva a laser;
- Integrar este software de controle com um software de planejamento do processo de fabricação rápida por adição de camadas;

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1, apresenta-se uma breve introdução ao tema deste trabalho, sua caracterização e justificativa, os objetivos a serem alcançados e sua estrutura geral.

No Capítulo 2, faz-se uma revisão bibliográfica para fundamentação dos conceitos abordados. Contextualiza-se o processo de Sinterização Seletiva a Laser entre os processos de Prototipagem Rápida para fabricação rápida de peças, descreve-se o sistema-protótipo desenvolvido pelo Laboratório CIMJECT e analisa-se o estado-da-arte dos softwares para controle e planejamento do processo disponíveis. Além disso, revisam-se os fundamentos da Engenharia de Software.

No Capítulo 3, descrevem-se o processo de desenvolvimento do software, baseado no Ciclo de Vida Clássico de Desenvolvimento de Software e o processo de integração entre os softwares de controle e planejamento.

No Capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos na inspeção e testes do software. Detalha-se também neste capítulo o desenvolvimento da placa de hardware usada para simular o funcionamento de um equipamento de prototipagem rápida por Sinterização Seletiva a Laser visando a validação do software de controle.

No Capítulo 5, são feitas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Historicamente, as representações físicas de protótipos ou produtos vêm sendo utilizadas desde a antiguidade, evoluindo gradativamente para protótipos virtuais nos anos 1980, devido à disseminação dos sistemas CAD tridimensionais, e mais recentemente com o advento dos protótipos produzidos através de processos de fabricação rápida por adição de camadas (VOLPATO *et al.*, 2007).

De acordo com SABINO NETTO (2003), existe uma tendência de substituição de protótipos físicos por virtuais, entretanto a utilização dos protótipos produzidos por adição de camadas, uma classe de protótipos físicos, ao contrário, tem aumentado anualmente a uma taxa média de 25%, como mostra a Figura 2.

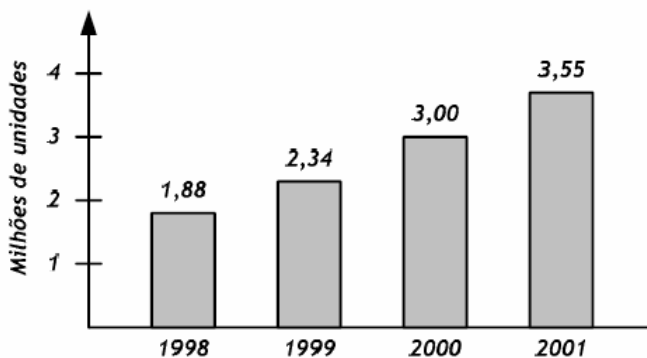


Figura 2 – Estimativa mundial anual da quantidade de protótipos produzidos por adição de camadas (Fonte: WOHLERS *apud* SABINO NETTO, 2003)

À técnica de fabricação rápida de protótipos por adição de camadas, convencionou chamar-se de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*, ou RP). Apesar de VOLPATO *et al.* (2007) considerarem a denominação “prototipagem rápida” uma incoerência, uma vez que este processo aplicou-se inicialmente na produção rápida de peças visando uma primeira materialização de idéia (protótipos), este termo perpetuou-se em detrimento de outros tecnicamente mais apropriados.

Na concepção de HOPKINSON e DICKENS (2001) a RP pode então ser definida como “um grupo de processos comercialmente disponíveis que são usados para gerar peças tridimensionais em sistemas CAD (*Computer-Aided Design*, ou Projeto Auxiliado por Computador)”.

De forma generalizada, a RP é melhor definida como “uma tecnologia de fabricação de objetos sólidos tridimensionais obtidos a partir de modelos computacionais em CAD” (KULKARNI *et al.*, 2000).

A RP é uma tecnologia baseada no princípio da Manufatura por Camadas (*Layered Manufacturing*, ou LM), referenciada também como Fabricação de Formas Livres (*Solid Freeform Fabrication*, ou SFF), que consiste na manufatura de um objeto sólido por adição sucessiva de camadas planas de materiais, sem restrições geométricas (PATIL *et al.*, 2002).

KAI *apud* VOLPATO *et al.* (2007) em seu estudo verificou a existência de mais de 20 sistemas utilizando diferentes processos de RP baseados na SSF. Com o objetivo de classificar tais processos, VOLPATO *et al.* (2007) propuseram agrupá-los pelo estado (líquido ou sólido) ou forma inicial (pó) da matéria-prima utilizada para fabricação, conforme mostra a Tabela 1.

Entre os vários processos de RP que vem sendo comercializados, KULKARNI *et al.* (2000) destacam como mais importantes: a Estereolitografia (SL), a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), a Impressão Tridimensional (3DP), a Manufatura Laminar de Objetos (LOM) e a Sinterização Seletiva a Laser (SLS). VOLPATO *et al.* (2007) descreveram detalhadamente cada um destes processos.

Tabela 1 – Classificação dos processos de RP baseada no estado inicial da matéria-prima (Fonte: VOLPATO *et al.*, 2007).

Baseado em líquido	Baseado em sólido	Baseado em pó
Estereolitografia (<i>Stereolithography</i> , ou SL)	Modelagem por Fusão e Deposição (<i>Fused Deposition Modeling</i> , ou FDM)	Sinterização Seletiva a Laser (<i>Selective Laser Sintering</i> , ou SLS)
Impressão a Jato de Tinta (<i>Ink Jet Printing</i> , ou IJP) - <i>Polyjet</i>	Manufatura Laminar de Objetos (<i>Laminated Object Manufacturing</i> , ou LOM)	Sinterização a Laser (<i>Laser Sintering</i> , ou LS) – <i>EOSINT</i>
IJP – InVision	Tecnologias com Lâminas de Papel (<i>Paper Lamination Technology</i> , ou PLT)	Impressão Tridimensional (<i>Three Dimensional Printing</i> , ou 3DP)
	IJP – Thermojet	Fabricação de Forma Final a Laser (<i>Laser Engineered Net Shaping</i> , ou LENS)
	IJP – Benchtop	3DP – ProMetal

Sucintamente, no processo SL (Figura 3), a peça é construída sobre uma plataforma de fabricação, movimentada verticalmente por um elevador, em um reservatório preenchido com resina líquida fotocurável. Um feixe de laser com comprimento de onda específico, geralmente UV (ultravioleta), é gerado por uma fonte de laser, colimado por um conjunto de lentes e direcionado por um sistema de espelhos, deslocando-se sobre a resina. Uma lâmina de espalhamento auxilia no nivelamento da superfície da resina. A fabricação da camada por SL ocorre como resultado da cura (polimerização) parcial da resina no plano de fabricação. O procedimento se repete, após o abaixamento da plataforma, para a camada imediatamente acima, que então adere à camada inferior até que a peça seja produzida por completo. Ao final do processo, é necessário fazer a limpeza e remoção das estruturas de suporte para que a peça seja completamente curada num forno UV para aumento de sua resistência mecânica. Os materiais fotocuráveis disponíveis atualmente são resinas à base de acrilatos (acrílica) e epóxi.

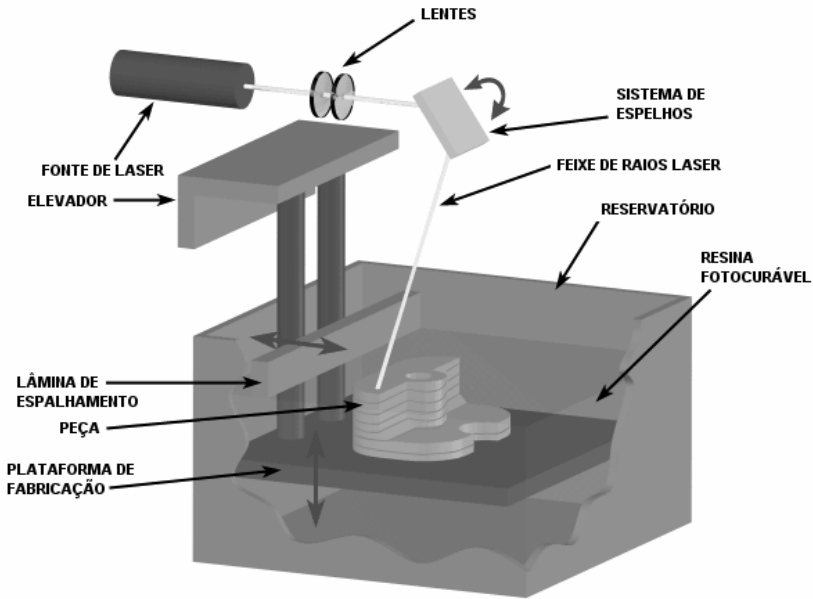


Figura 3 – Processo de Estereolitografia (Adaptado de CUSTOMPARTNET, 2009)

Já o processo FDM (Figura 4) combina a extrusão de materiais com a fabricação por camadas. Nessa tecnologia, um polímero termoplástico usualmente é aquecido e extrudado através de um bico extrusor posicionado acima da plataforma de fabricação. A movimentação do cabeçote extrusor, controlada por um computador, promove a deposição de filamentos do material fundido sobre a plataforma dando forma a uma camada da peça. Com o abaixamento gradativo da plataforma, o processo se repete até que a peça tenha sido totalmente fabricada. A tecnologia FDM necessita da criação de uma estrutura de suporte para a peça, logo o cabeçote extrusor possui um bico extrusor adicional exclusivo para adição de material de suporte. Para fixação da peça, e visando também garantir uma superfície plana para iniciar a deposição do material, é necessário depositar uma base de espuma (poliuretano poroso rígido) sobre a plataforma.

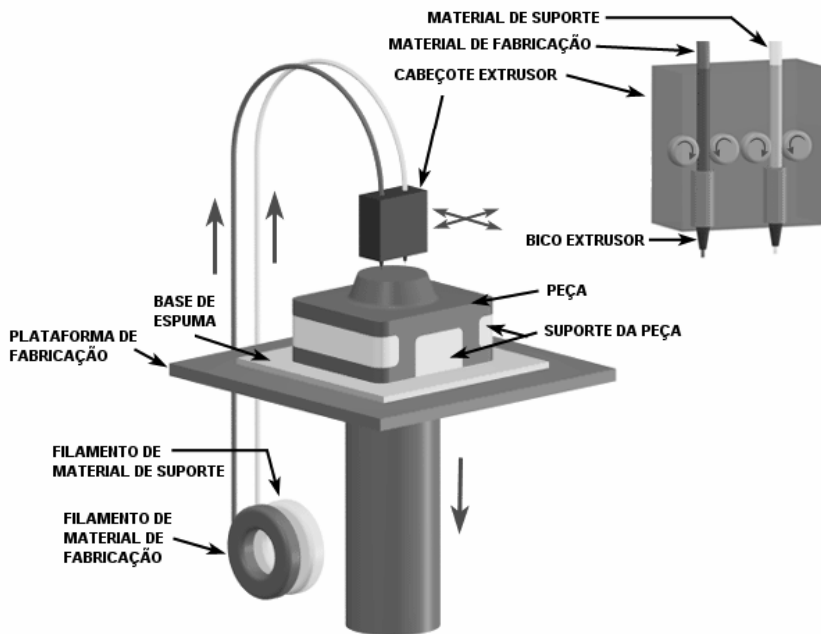


Figura 4 – Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (Adaptado de CUSTOMPARTNET, 2009)

O processo 3DP (Figura 5) promove a aglomeração de pós pela ação de um aglutinante, depositado por um cabeçote de impressão, ao longo de uma camada de pó distribuída sobre a plataforma de fabricação. Após o movimento ascendente da plataforma de distribuição e descendente da plataforma de fabricação, o cilindro de distribuição se desloca a partir do reservatório de pó em direção à câmara de fabricação, formando próxima camada de pó. O processo se repete até a fabricação total da peça. Apesar de não haver limitação quanto aos materiais utilizados (polímero, metal, cerâmica, gesso), cada classe de material requer um tipo específico de aglutinante. Peças fabricadas com este processo requerem uma etapa de pós-processamento para conferir resistência mecânica ou melhorar o acabamento superficial. Para obter uma peça com boa resistência mecânica, geralmente no pós-processamento o material da peça é infiltrado com cera ou resinas epóxi.

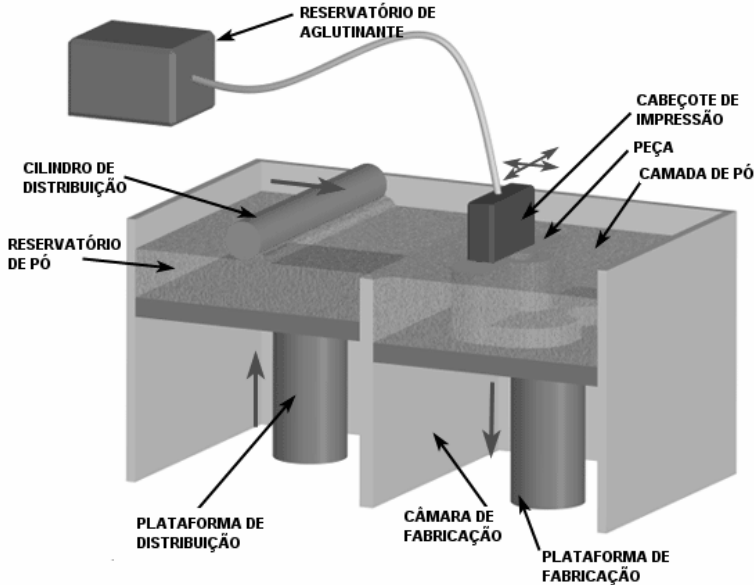


Figura 5 – Processo de Impressão Tridimensional
(Adaptado de CUSTOMPARTNET, 2009)

No processo LOM (Figura 6), a peça é construída camada por camada a partir da deposição e corte sucessivo de tiras de papel contendo adesivo numa das faces. A bobina alimentadora posiciona a tira de papel sobre a plataforma de fabricação e um cilindro de aquecimento desloca-se sobre a tira de papel ativando o adesivo e fixando-a à camada anterior pela face inferior. Em seguida, uma fonte de laser de CO_2 gera um feixe de raios laser que é guiado por um sistema de espelhos e um cabeçote direcionador, cortando o contorno da camada sobre o papel e a área em excesso em forma de quadrados. Esse quadriculado rompe o material extra, tornando fácil sua remoção durante a etapa posterior. Além disso, proporciona um excelente suporte para projeções, saliências e seções com paredes finas durante o processo de fabricação. Após o corte da primeira camada a plataforma desce e a bobina coletora recolhe o resíduo da fabricação permitindo que bobina alimentadora forneça material para a formação da próxima camada. O processo é repetido até a construção total da peça. Apesar de permitir o emprego de vários materiais (plástico, papel, cerâmica, tecido ou metal), comumente utiliza-se papel com adesivo termicamente ativado à base de polietileno.

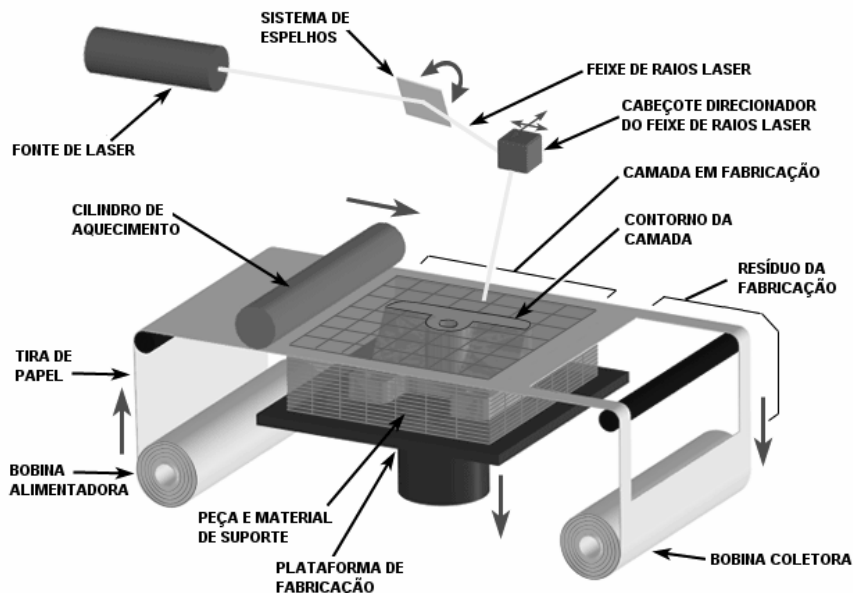


Figura 6 – Processo de Manufatura Laminar de Objetos (Adaptado de CUSTOMPARTNET, 2009)

Para KULKARNI *et al.* (2000), por terem surgido simultaneamente, estas tecnologias apresentam muita similaridade entre si. Resumidamente, PATIL *et al.* (2003) descrevem os processos de RP como aqueles nos quais o modelo sólido do componente a ser produzido é criado num ambiente CAD e fatiado antes de ser transferido para o equipamento de RP.

Conforme observou DABBAS (2006), pode-se considerar que os processos de RP apresentam as seguintes etapas em comum:

- Modelagem do objeto (peça, ferramenta ou protótipo) em software CAD: obtenção do modelo do objeto na forma de um protótipo virtual tridimensional reproduzindo com maior fidelidade possível o componente a ser fabricado;
- Conversão do modelo 3D em modelo STL (*Structural Triangular Language*): representação do modelo através de uma malha de triângulos, onde a geometria do objeto passa a ser descrita pelas coordenadas

esaciais dos vértices e do vetor normal à superfície de cada triângulo;

- Fatiamento do modelo STL em planos paralelos: geração de camadas do objeto, a partir do modelo STL, com auxílio de software CAM;
- Fabricação por RP: manufatura por camadas do objeto sólido tridimensional com auxílio do software de controle do equipamento de RP utilizado;
- Acabamento superficial da peça por processos complementares: pós-processamento (remoção de suportes, pós-cura, jateamento, infiltração, limpeza, colagem, pintura), de acordo com o processo de RP utilizado.

A Figura 7 resume a sequência em que são executadas as etapas comum aos processos de RP.

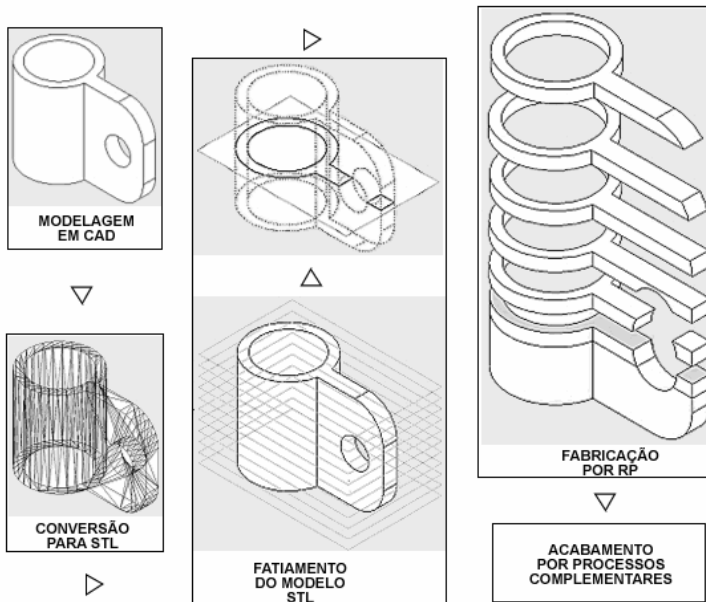


Figura 7 – Etapas comuns aos processos de RP
(Adaptado de BEAL, 2002)

2.1.1. SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER

Entre os processos de RP, a Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering*, ou SLS) destaca-se pela possibilidade de obtenção de objetos com formas livres em diferentes materiais (polímeros, metais, cerâmicas e compósitos) otimizando o uso de energia e matéria-prima (GIBSON e SHI, 1997).

A tecnologia SLS foi desenvolvida e patenteada pela Universidade do Texas, EUA, e a empresa *DTM Corporation* foi fundada em 1987 para viabilizar sua comercialização. O primeiro equipamento foi comercializado em 1992. No entanto, em 2001 a empresa *3D Systems, Inc.* comprou a empresa *DTM Corporation* e passou a deter os direitos desta tecnologia.

Na definição de CERVERA e LOMBERA (1999), a SLS é “uma técnica de fabricação que usa um feixe de laser para sinterizar material particulado (em forma de pós), de maneira seletiva, visando produzir peças tridimensionais”.

A SLS pode ser definida também como “uma tecnologia de prototipagem rápida na qual um objeto tridimensional é criado, camada por camada, a partir de materiais em forma de pó, que podem ser fundidos pela aplicação do calor gerado por uma fonte de laser CO₂”. (HO *et al.*, 2002)

Para YAN *et al.* (2009), a SLS é “um processo de prototipagem rápida baseado em material particulado, de componentes sólidos a partir de um modelo tridimensional em CAD pela sinterização seletiva de camadas sucessivas de matéria-prima na forma de pós”.

Portanto, a SLS pode ser considerada um “processo de prototipagem rápida de objetos baseado na sinterização e fusão localizada de materiais particulados, em cada camada de fabricação, pelo calor fornecido por um feixe de laser” (JACOBS, 1992).

Segundo VOLPATO (2001), as variantes existentes do processo SLS podem ser classificadas em direta ou indireta. Na SLS direta, o material é sinterizado pela ação direta do laser, enquanto na SLS indireta (aplicável a metais e cerâmicas), um material ligante é utilizado juntamente com o pó para dar forma ao objeto fabricado que posteriormente será sinterizado em um forno.

De modo similar aos demais processos de RP, na SLS (Figura 8), o processo de fabricação se inicia com o desenvolvimento do modelo

virtual da peça em software CAD. Em seguida, transferem-se os dados do modelo virtual para um software CAM onde é feito o pós-processamento (conversão para modelo STL e seu fatiamento em camadas). Então, as peças são construídas a partir do modelo pós-processado, camada por camada, sobre uma plataforma de fabricação cuja superfície é preenchida, pela ação de um cilindro de distribuição, com o material particulado. Nesta etapa, a câmara de fabricação é mantida a determinada temperatura de trabalho (conforme o tipo de material a ser sinterizado) e o ambiente preenchido com gás inerte. Com auxílio de lentes e um sistema de espelhos, o feixe de raios laser, gerado na fonte de laser, é direcionado para a área de trabalho sobre a plataforma de fabricação e gera a primeira camada da peça, sinterizando a massa de pós de forma seletiva, segundo a trajetória especificada pelo software. A plataforma desce, reaplica-se uma nova camada de pó e o processo continua até que a peça seja totalmente construída. O pó em excesso ajuda a dar suporte ao componente durante sua construção.

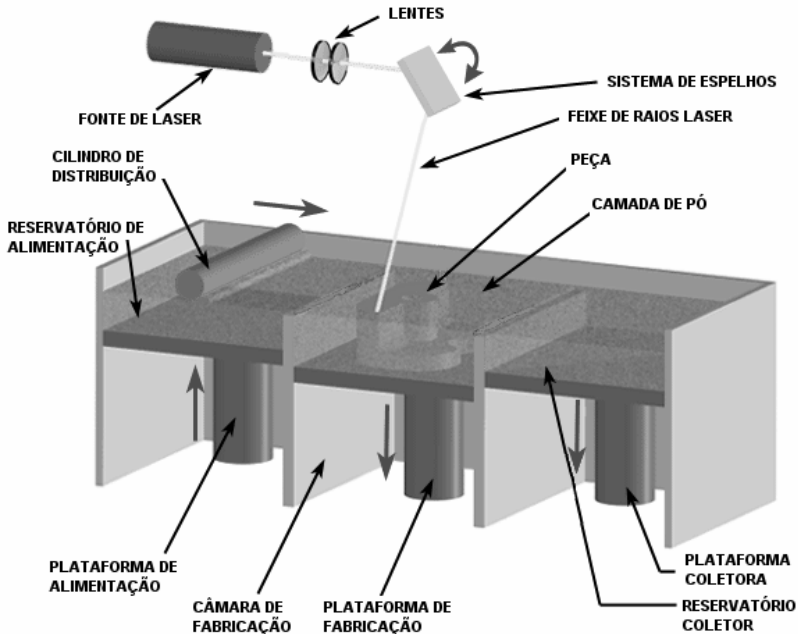


Figura 8 – Processo de Sinterização Seletiva a Laser (Adaptado de CUSTOMPARTNET, 2009)

Em relação aos demais processos de RP, o processo SLS diferencia-se na etapa de fabricação pelo uso de um feixe de laser para sinterizar o material particulado. De acordo com KULMAN (2006), para diferentes tipos de materiais a serem sinterizados, utilizam-se diferentes tipos de laser:

- Laser CO₂: com comprimento de onda aproximado de 10,6 μm e potência de até 50W, é utilizado para materiais que requerem menor quantidade de energia, tais como: polímeros e materiais orgânicos em geral;
- Laser Nd:YAG: com comprimento de onda aproximado de 1,06 μm e potência de até 50W, é utilizado para metais e cerâmicas.

HARDRO *et al.* (1998) observaram que a temperatura na câmara de construção influenciava no processo de sinterização e WANG (1999) comprovou que quantidade de energia a ser fornecida pelo laser era menor quanto maior fosse a temperatura do pó.

Para VOLPATO (2001), os parâmetros mais importantes para a fabricação de objetos através da sinterização a laser são: a potência do laser, a velocidade de deslocamento do feixe e o espaçamento entre as "passadas" do feixe do laser. Além disso, podem-se considerar ainda diferentes estratégias de varredura do laser sobre a camada.

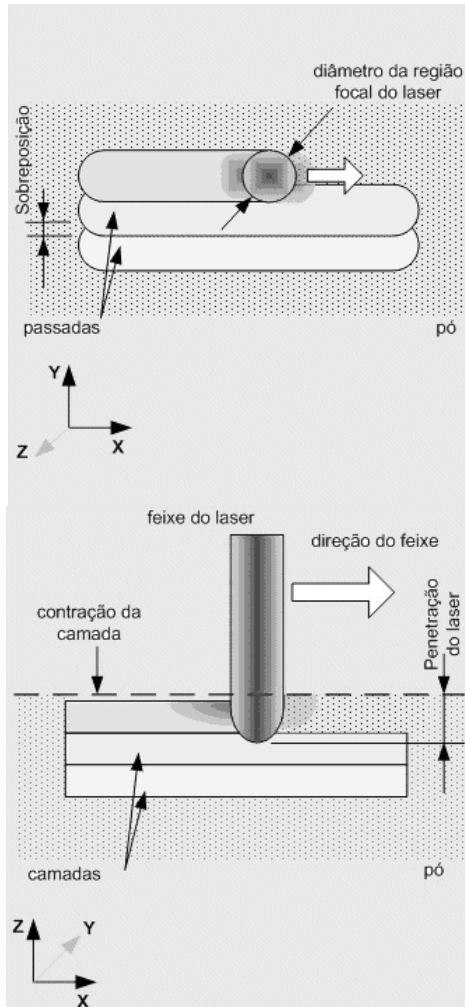


Figura 9 – Influência dos principais parâmetros do processo SLS (Adaptado de VOLPATO, 2001)

Conforme descrito por KULMAN (2006), para viabilizar pesquisas sobre os parâmetros e novos materiais aplicáveis ao processo SLS, a UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), através do CIMJECT (Laboratório de Projeto e Fabricação de Componentes de Plástico Injetados), desenvolveu em parceria com o LabMat (Laboratório de Materiais) um sistema-protótipo para controle do processo SLS (Figura 10).

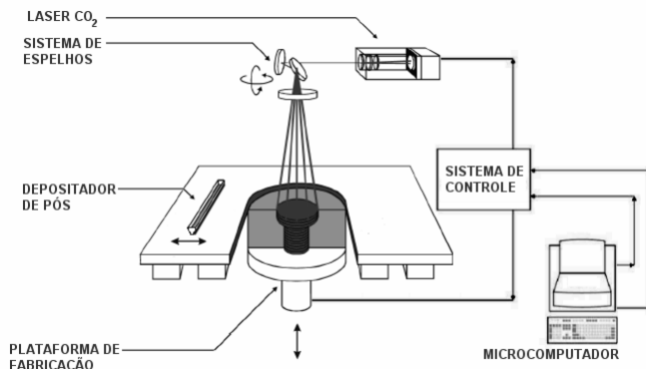


Figura 10 – Representação básica do sistema-protótipo SLS do CIMJECT (Adaptado de KRUTH *et al.*, 2005)

Este sistema-protótipo é constituído pelos seguintes componentes:

- fonte de laser CO₂ (potência nominal: 50W);
- cabeçote de marcação: sistema de espelhos direcionadores do feixe de laser;
- sistema de controle dos subsistemas mecânico e laser: placas controladoras;
- microcomputador (com software Alpha);
- plataforma de fabricação;
- depositador de pós;
- lâmpadas para pré-aquecimento da camada de fabricação;
- exaustor para remoção dos gases residuais do processo.

Este sistema-protótipo está baseado no princípio de funcionamento de um equipamento de RP por SLS conforme descrito anteriormente, exceto pelas alterações realizadas no depositador de pós e sistema de controle térmico, detalhadas por DABBAS (2006) em seu trabalho.

2.2. SOFTWARES DE APOIO À PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Para a fundamentação deste trabalho foram analisados quatro softwares (Buildstation, Objet Studio, Alpha e RP³), cada qual destinado a diferentes processos de RP. As análises de suas características individuais de interface e funcionamento foram obtidas por inspeção ou, quando disponíveis, a partir dos manuais disponibilizados pelos fabricantes dos equipamentos de RP. Por fim, procedeu-se a uma análise comparativa entre eles.

2.2.1. SOFTWARE PARA SL (BUILDSTATION)

No campo da Estereolitografia, a fabricante 3Dsystems desenvolveu um software denominado Buildstation para controlar o seu sistema *SLA 350*. Este software baseia-se no conceito de “projeto de fabricação” para organizar as etapas do processo de fabricação da peça. Segundo ele, o usuário pode fabricar peças a partir de um projeto de fabricação selecionando componentes, tais como: a geometria da peça, os parâmetros de fabricação correspondentes ao tipo de material da peça e o modelo do sistema SL usado na prototipagem rápida. Pode-se alternativamente alterar ou até mesmo planejar o processo diretamente no ambiente de fabricação.

Seguindo o padrão dos softwares para o sistema operacional *Windows*, sua interface principal (Figura 11) apresenta diversos componentes gráficos que auxiliam na operação e simultaneamente informam ao usuário o status da fabricação da peça.

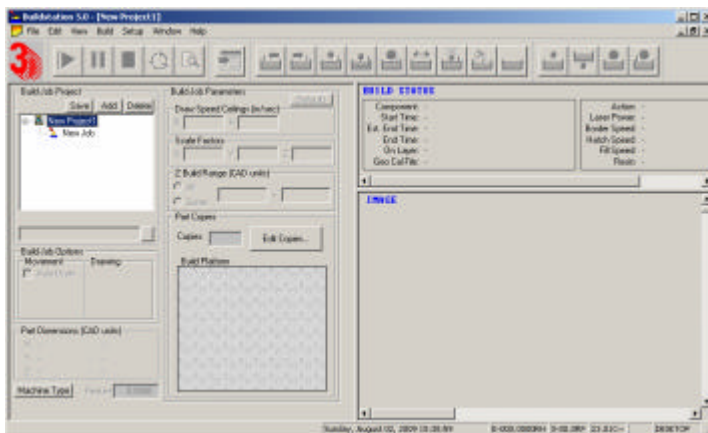


Figura 11 – Interface principal do software Buildstation

A interface principal do software Buildstation é composta pelos seguintes elementos:

- Barra de Títulos, onde se pode visualizar o nome do arquivo de projeto cuja execução está em curso;
- Barra de Menús, que apresenta as principais funcionalidades do software na forma de menús de opções, fornecendo acesso direto ou através de caixas de diálogo;
- Barra de Ferramentas, disponibilizando prontamente os controles principais de seleção da geometria da peça, material e sistema de fabricação;
- Barra de Status, que exibe o status dos principais parâmetros do processo de fabricação ao longo da fabricação;
- Moldura “Projeto de Fabricação” (*Build Job Project*), que exibe de forma hierárquica os modelos sólidos fatiados, definido sua ordem de fabricação;
- Moldura “Parâmetros de Fabricação” (*Build Job Parameters*), que exibe e permite alterar as configurações dos parâmetros de fabricação do sistema;
- Moldura “Status da Fabricação” (*Build Status*), que exibe as estatísticas e o status dos principais parâmetros da fabricação em curso;
- Moldura “Imagem” (*Image*), que permite uma simulação visual em sequência das camadas da peça sendo fabricada;
- Moldura “Cópias da Peça” (*Part Copies*), que permite ajustar a quantidade e disposição de cópias da peça na plataforma de fabricação;
- Moldura “Opções de Fabricação” (*Build Job Options*), que permite habilitar e desabilitar opções específicas do equipamento antes do início da fabricação;

- Moldura “Dimensões da Peça (Unidades CAD)” (*Part Dimensions (CAD units)*), que permite visualizar as dimensões máximas da peça sendo fabricada;

Antes de iniciar a fabricação usando o Buildstation, deve-se proceder a algumas configurações no equipamento através do software. Através da caixa de diálogo “Características de Desempenho do Sistema SL” (*SLA Performance Characteristics*), retratada na Figura 12, pode-se definir parâmetros relativos ao sistema laser do equipamento, tais como potência máxima e espessura do feixe de laser.

SLA Performance Characteristics		
Beam Characteristics		
Maximum Laser Power	200	mW
Peak Sum Ratio	0.1500	
Beam Width	10.00	mils
Build Initialization		
Build Start Overhead	0.000	seconds
Leveler Calibration	0.000	seconds
Start Layer (Profiling, Set power, etc.)		
Average Time	0.000	seconds
Resin Leveling		
Average Time	0.000	seconds

Figura 12 – Caixa de diálogo “Características de Desempenho do Sistema SL” (*SLA Performance Characteristics*)

Pode-se também reposicionar o elevador da plataforma, a lâmina de espalhamento e nível de resina do reservatório do equipamento de estereolitografia através da caixa de diálogo “Controle de Movimento” (*Motion Control*), como mostra a Figura 13.

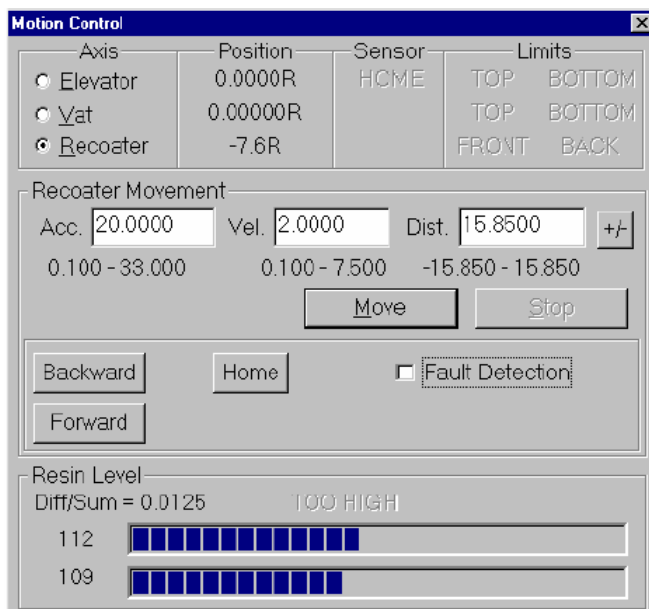


Figura 13 – Caixa de diálogo “Controle de Movimento” (*Motion Control*)

O termostato controla o sistema de pré-aquecimento da resina no reservatório e seus parâmetros também podem ser configurados antes da fabricação com o auxílio da caixa de diálogo “Termostato” (*Thermostat*) da Figura 14.

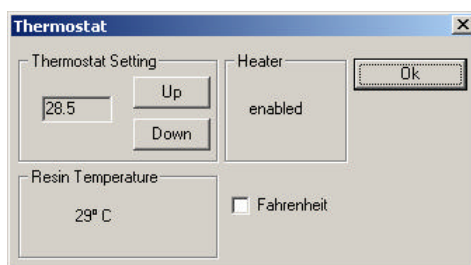


Figura 14 – Caixa de diálogo “Termostato” (*Thermostat*)

A configuração dos parâmetros de fabricação varia de acordo com a resina na qual a peça será construída. Antes do início da fabricação, seleciona-se o arquivo correspondente contendo informações da resina a partir da caixa de diálogo “Escolher Arquivo de Resina” (*Choose Resin File*), como mostra a Figura 15.

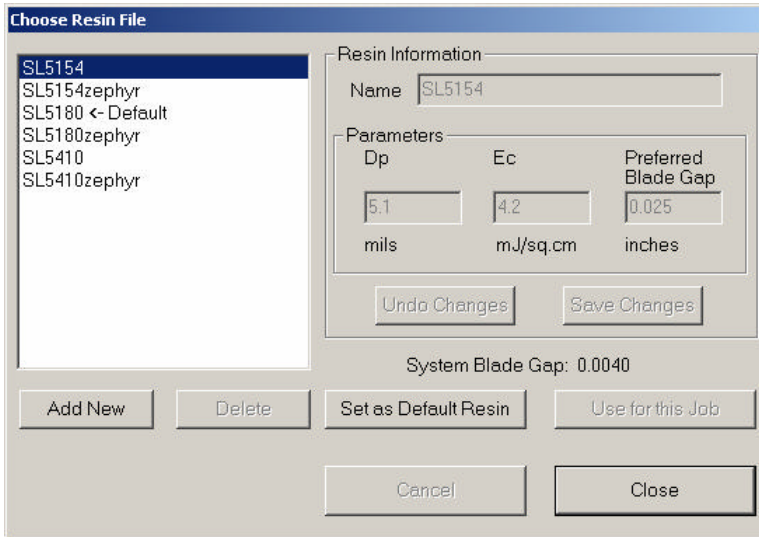


Figura 15 – Caixa de diálogo “Escolher Arquivo de Resina” (*Choose Resin File*)

Para os casos em que não há um arquivo de resina disponível, pode-se adicionar um novo arquivo de resina através da caixa de diálogo “Adicionar Nova Resina” (*Add New Resin*) da Figura 16.

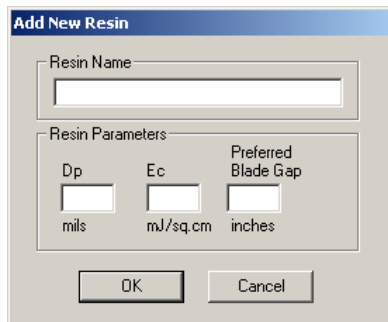


Figura 16 – Caixa de diálogo “Adicionar Nova Resina” (*Add New Resin*)

Ainda antes do início da fabricação, necessita-se selecionar um arquivo de calibração geométrica do equipamento de estereolitografia, através da caixa de diálogo “Selecionar Arquivo de Calibração Geométrica” (*Select Geometric Calibration File*) da Figura 17, cuja função é garantir a qualidade dimensional durante a fabricação.

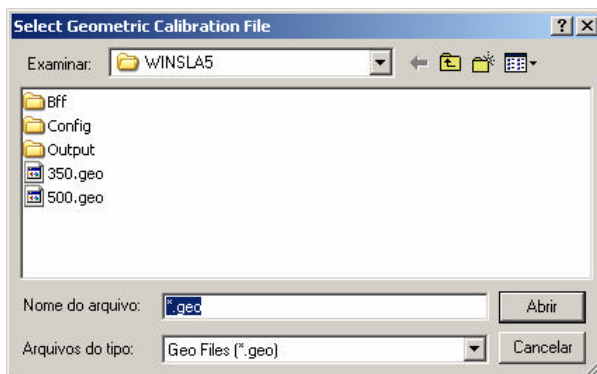


Figura 17 – Caixa de diálogo “Selecionar Arquivo de Calibração Geométrica” (*Select Geometric Calibration File*)

Pode-se opcionalmente organizar a quantidade e disposição de cópias da peça na área de construção do equipamento através da caixa de diálogo “Posição da Peça” (*Part Position*), como mostra a Figura 18.

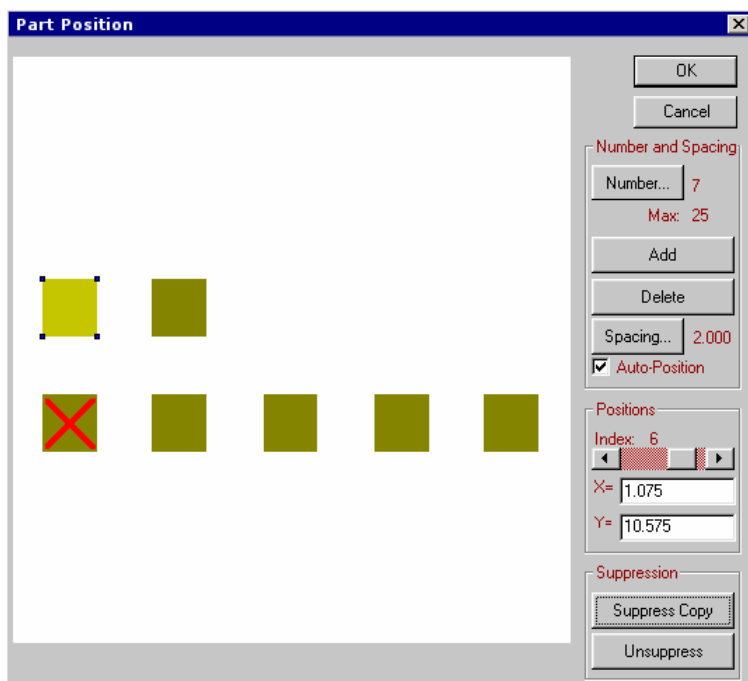


Figura 18 – Caixa de diálogo “Posição da Peça” (*Part Position*)

Inserese então um ou mais arquivos de projeto de fabricação, previamente desenvolvido no software para planejamento do processo de estereolitografia 3D LightYear, e inicia-se a fabricação clicando no botão “Iniciar Fabricação” da barra de ferramentas do Buildstation. Durante a fabricação, a evolução do processo pode ser observada através da Moldura “Status da Fabricação” (*Build Status*).

2.2.2. SOFTWARE PARA 3DP (OBJET STUDIO)

Para controle do processo de fabricação por 3DP em sua impressora modelo *Objet250*, a fabricante *Objet* desenvolveu os softwares *Objet Studio* e *Eden250*. O primeiro destina-se ao planejamento e controle da fabricação; enquanto o segundo, a organizar a fila de impressão e a realizar testes de manutenção na impressora.

A interface principal do *Objet Studio* (Figura 19) é composta por: barra de menús, barras de ferramentas, menú de opções e um conjunto de janelas com interfaces específicas para visualização da geometria das peças, seus componentes e propriedades.

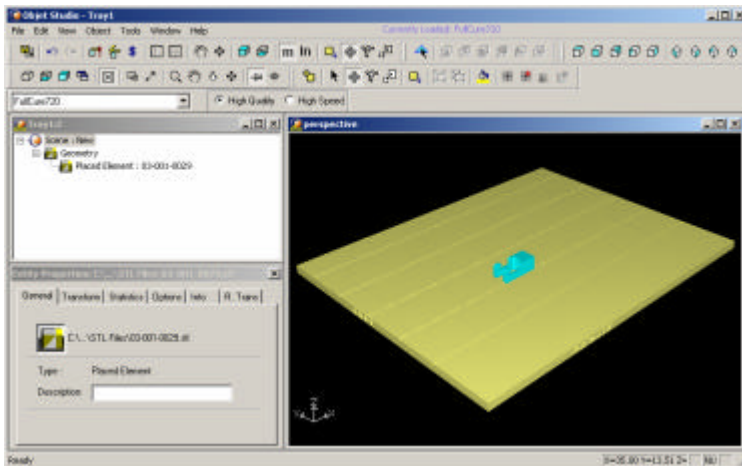


Figura 19 – Interface principal do software *Objet Studio*

Para imprimir peças com o *Objet Studio*, deve-se primeiramente inserir os modelos tridimensionais sobre a bandeja virtual do ambiente de planejamento da interface principal, com o auxílio da caixa de diálogo “Inserir” (*Insert*), como mostra a Figura 20.

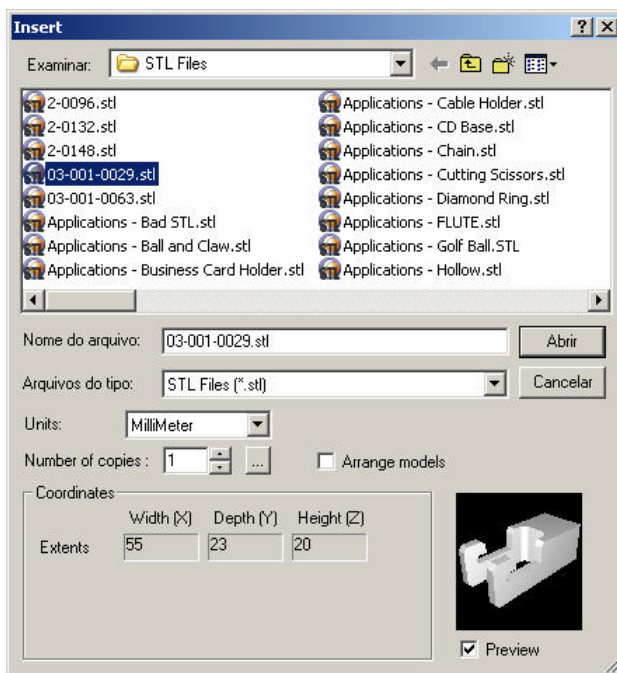


Figura 20 – Caixa de diálogo “Inserir” (*Insert*) para seleção da peça a ser fabricada

Antes de iniciar o processo, pode-se ainda configurar parâmetros de fabricação através do menu “Ferramentas” (Figura 21) e da caixa de diálogo “Opções > Configurações” (*Options > Settings*) (Figura 22).

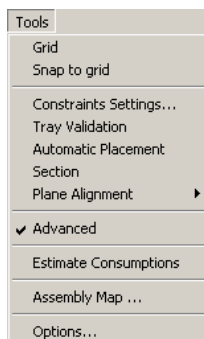


Figura 21 – Menu de Opções “Ferramentas” (*Tools*) do software *Objet Studio*

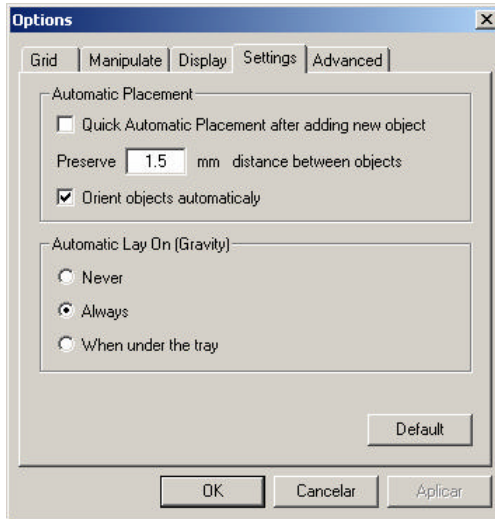


Figura 22 – Caixa de diálogo “Opções > Configurações”
(*Options > Settings*)

Para concluir o processo de impressão, envia-se o projeto do Objet Studio para a fila de impressão do software Eden250, que opera o equipamento 3DP, efetuando a fabricação.

2.2.3. SOFTWARE PARA SLS (ALPHA)

Para efetuar o controle do processo de fabricação em seu sistema-protótipo SLS, o CIMJECT desenvolveu o software Alpha. Segundo KULMAN (2006), este software, desenvolvido em linguagem *Visual Basic* no ambiente de desenvolvimento *Microsoft Visual Studio 6*, tem como funções básicas: processar a imagem a ser percorrida pelo laser, acionar os motores da plataforma de fabricação e do depositador de pós, controlar o cabeçote de marcação e acionar a fonte de laser.

Para executar a fabricação sequencial de camadas utilizando o Alpha, deve-se proceder antes a uma etapa de pré-processamento do arquivo de entrada que compreende:

- criar o arquivo de imagem no formato *bitmap*, mantendo a peça em cor preta e fundo branco para haver contraste;
- importar o arquivo de imagem para o Alpha visando convertê-lo ao formato de arquivo de texto;

- salvar o arquivo de texto na extensão correspondente à estratégia de fabricação (zig-zag, horizontal, vertical) para o processo.

Inicia-se a fabricação da peça a partir do arquivo gerado acessando a interface principal do software (Figura 23). Como se pode observar, ela está baseada em menus de opções, não havendo quaisquer barras de ferramentas ou outros recursos visuais.



Figura 23 – Interface principal do software Alpha

Para iniciar a fabricação com o software, seleciona-se a opção “Começar” no menú de opções “Arquivo”, exibida na Figura 24.

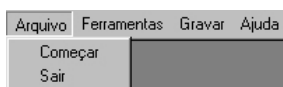


Figura 24 – Menu “Arquivo > Começar” do software Alpha

Surge então a caixa de diálogo intitulada “Controle Alfa FGM” (Figura 25) que fornece apenas recursos básicos ao usuário. Através dela pode-se visualizar a geometria da peça, fazer o pré-processamento do arquivo de imagem e ativar ou desativar o laser.

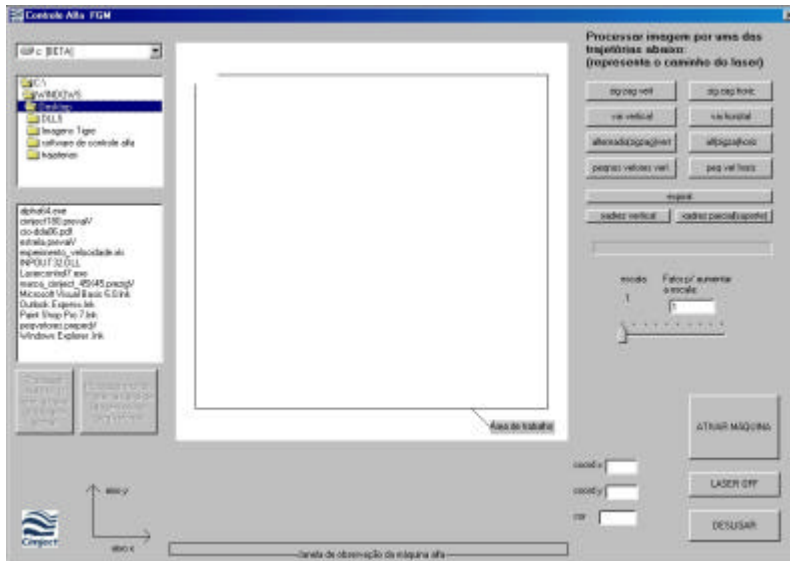


Figura 25 – Caixa de diálogo “Controle Alfa FGM”

O tipo de estratégia de fabricação fica determinado pela extensão do arquivo de armazenamento dos dados de fabricação, após seu processamento.

Para iniciar o uso efetivo do software no controle do processo SLS basta selecionar a opção “Gravar > Construir peças” (Figura 26) na barra de menus.

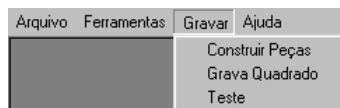


Figura 26 – Menu “Gravar > Construir peças”

Surge a caixa de diálogo “Dados do material” (Figura 27), onde deve-se marcar a opção “Preencher automático” ou abrir uma planilha do Excel contendo parâmetros de fabricação relativos ao material escolhido, e em seguida clicar no botão “Ok”.

Dados do material

preencher automatico

Material:

Potência: %

Tempo: segundo (OBS: as frações de segundo devem ser indicadas com vírgula!!!)

Frequência: KHz

Temperatura da plataforma: Celsius


Para editar uma tabela e salvá-la, clique no ícone do excel ao lado:  Planilha

Figura 27 – Caixa de diálogo “Dados do material”

Após, apresenta-se a caixa de diálogo “Sinterização a Laser” (Figura 28), onde é possível configurar a potência (em porcentagem do valor máximo) e velocidade de varredura (em mm/s) do laser para a camada. Estes valores são obtidos experimentalmente para cada material.

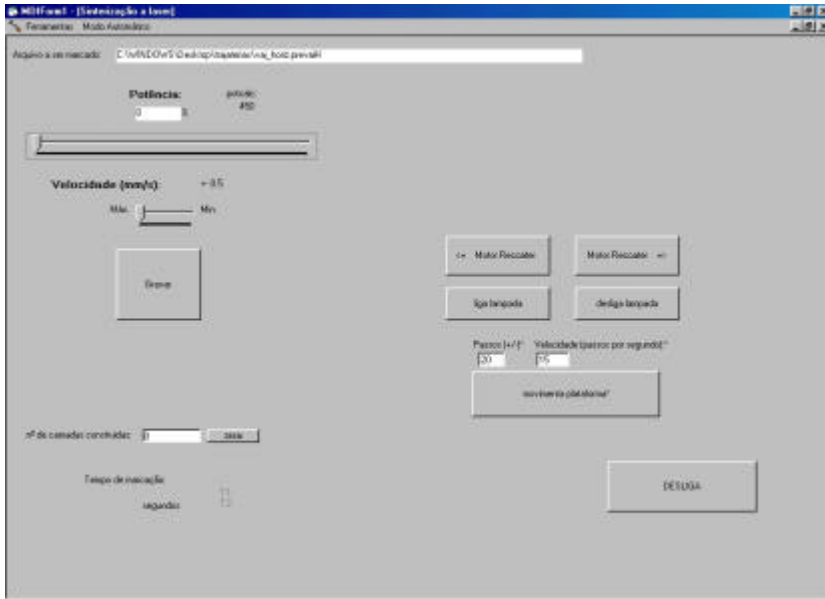


Figura 28 – Caixa de diálogo “Sinterização a Laser”

Deve-se ainda configurar o número de passos do motor de passo da plataforma de fabricação e sua velocidade (em passos por segundo).

Para concluir o processo, basta clicar em “Gravar” e, em caso de emergência, clicar em “Desligar” para parar o processo. Após a sinterização da camada atual, reinicia-se o processo até fabricar-se toda a peça.

Por fim, cabe observar que o software não está plenamente funcional visto que alguns menus contêm opções que nada executam, tal como as opções “Ferramentas > Setup” e “Ajuda > Help” da Figura 29.



Figura 29 – Menus “Ferramentas > Setup” e “Ajuda > Help”

2.2.4. SOFTWARE PARA MÚLTIPLOS PROCESSOS (RP³)

Em pesquisas recentes, o NUFER (Núcleo de Ferramental e Prototipagem) da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do

Paraná) está desenvolvendo um módulo do software RP³ que permitirá utilizá-lo no planejamento do processo SLS. (VOLPATO *et al.*, 2005)

Devido à sua estrutura modular, o RP³ possui módulos que oferecem suporte para vários processos de RP, tais como FDM e SLS. O propósito do módulo SLS do RP³ é gerar arquivos de marcação segundo o padrão *Winmark*, um padrão proprietário da fabricante de sistemas laser *Synrad*, que é distribuído gratuitamente.

O software RP³ segue o padrão dos softwares para o sistema operacional *Windows*. A interface principal (Figura 30) é composta por uma barra de menús e uma barra de ferramentas contendo botões que agilizam sua operação.

Para acessar o módulo SLS do RP³, seleciona-se a opção “SLS Winmark” no menú de opções “Prototipagem” da interface principal.

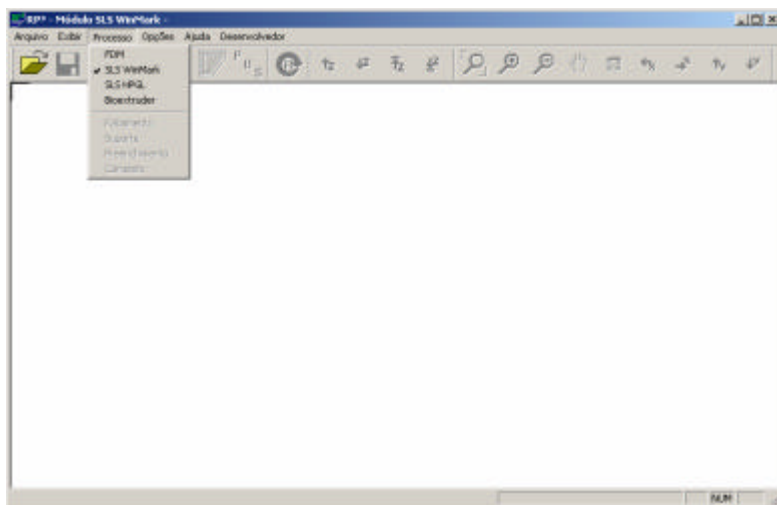


Figura 30 – A interface principal do RP³, com o módulo SLS ativado

Pode-se então importar um arquivo, em formato STL, contendo a geometria da peça a ser processada através do menú “Arquivo” ou do botão correspondente na barra de ferramentas.

Após a importação do arquivo, inicia-se o fatiamento do modelo da peça (Figura 31) selecionando a opção “Fatiamento” no menú “Processo”.

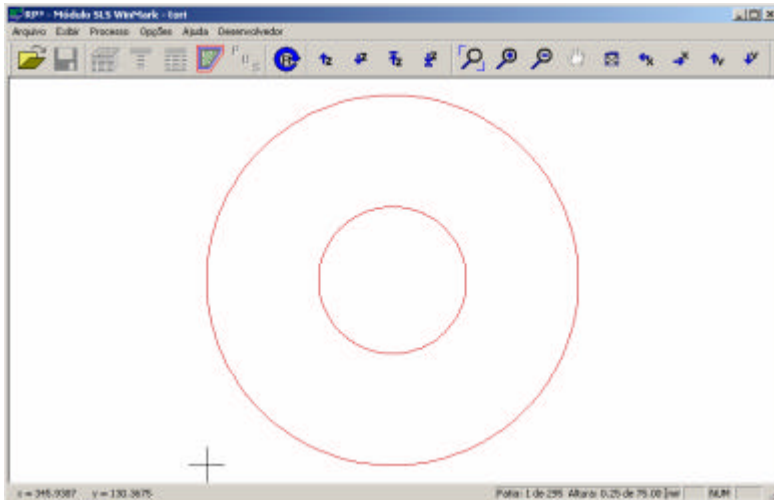


Figura 31 – Resultado do fatiamento de um modelo STL pelo RP³

Concluída esta etapa, procede-se à geração do contorno (*contour*) e trajetória de varredura (*raster*) a ser percorrida pelo laser (Figura 32) durante a fabricação das camadas, selecionando “Preenchimento” no menú “Processo”.

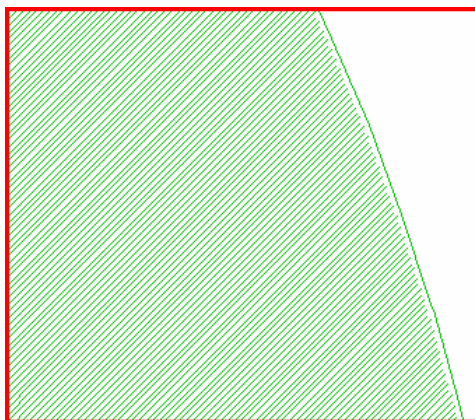
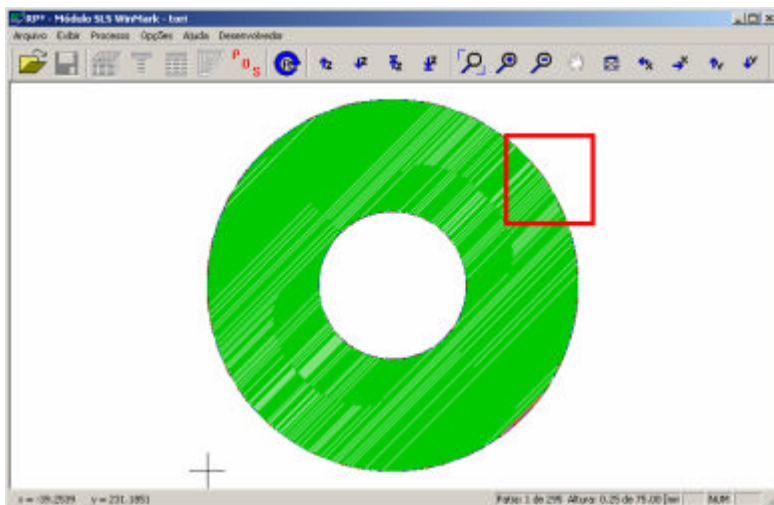


Figura 32 – Resultado do preenchimento de uma camada pelo RP³, com destaque para trajetória da varredura e contorno

Todas as etapas para processamento do modelo STL também estão acessíveis através de botões correspondentes na barra de ferramentas.

Por fim, antes de passar à etapa de pós-processamento, pode-se alternativamente modificar alguns parâmetros geométricos e a estratégia de varredura através da caixa de diálogo “Alterar Parâmetros – SLS Winmark” (Figura 33), selecionando a opção “Alterar parâmetros” no menu “Opções”.

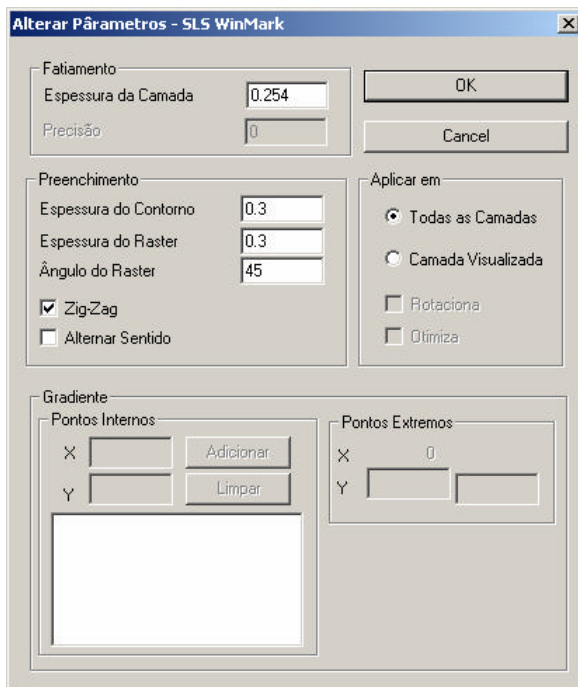


Figura 33 – Caixa de diálogo “Alterar Parâmetros – SLS Winmark”

Ao clicar no botão de pós-processamento, surge a caixa de diálogo “Janela de Integração RP^3 – Winmark” (Figura 34) que permite manipular as camadas geradas pelo RP^3 , importando-as a este ambiente de integração ou salvando-as num arquivo de marcação no formato Winmark.

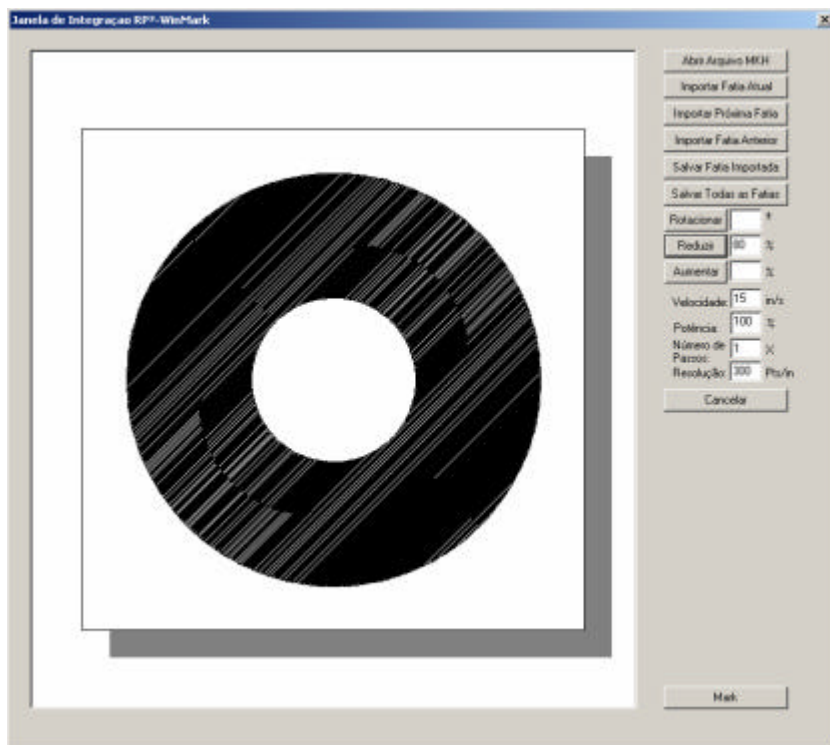


Figura 34 – Caixa de diálogo “Janela de Integração RP³ – Winmark”

No ambiente de interação pode-se ainda alterar alguns parâmetros de fabricação para cada camada antes de salvá-la em arquivo.

Apesar de encontrar-se atualmente em fase de desenvolvimento, o NUFER já dispõe de uma versão do RP³ com o módulo SLS implementado e capaz de gerar arquivos de marcação plenamente funcionais.

2.2.5. ANÁLISE COMPARATIVA

Para fins comparativos, procedeu-se á uma análise buscando evidenciar as principais vantagens e limitações dos softwares pesquisados. Esta análise, resumida na Tabela 2, baseou-se nos seguintes critérios:

- processo de RP ao qual o software se destina;
- adequação ao padrão clássico de interface de softwares para o sistema operacional *Windows*, tais como a presença de ícones, menús de opções, barras de ferramentas e caixas de diálogo no software;
- capacidade de permitir ao equipamento de RP a fabricação simultânea de mais de uma peça;
- acesso através do software a um repositório para armazenamento de informações relativas á fabricação de peças;
- uso de um padrão proprietário para os arquivos de entrada;
- existência de documentação integrada ao software para auxílio ao usuário;
- adaptação ao paradigma clássico da RP.

Tabela 2 – Tabela comparativa entre os softwares para RP

	RP³	Alpha	Buildstation	Objet Studio
Processo de RP a que se destina	SLS, FDM	SLS	SL	3DP
Interface padrão <i>Windows</i>	sim	não	sim	sim
Capacidade de fabricação simultânea de mais de uma peça	não	não	sim	sim
Repositório para armazenamento de informações de fabricação	não	não	não	não
Padrão proprietário para arquivo de entrada	STL	<i>bitmap</i>	STL	STL
Documentação integrada ao software	não	não	sim	sim
Adaptado ao paradigma tradicional da RP	não	não	sim	sim

2.3. ENGENHARIA DE SOFTWARE

De acordo com PRESSMAN *apud* SANTOS (2008), em meados da década de 1960, a redução nos custos de produção e a aquisição de hardware geraram uma demanda por softwares gradativamente mais complexos. Neste momento, os problemas que passaram a afligir os desenvolvedores tinham características mais gerenciais do que técnicas. Somou-se a isto, a necessidade de redução da dependência das empresas em relação aos profissionais do setor, e teve início a chamada “Crise do Software”. Buscando solucionar esta questão, surgiu a Engenharia de Software (*Software Engineering*, ou SE) agregando conceitos de engenharia (processo e produto) à atividade de Programação de Software (*Software Programming*, ou SP).

Para PARNAS *apud* NONEMACHER (2003), a SE é “uma construção por muitas pessoas de muitas versões do software” e “essencialmente uma atividade de equipe” onde “um engenheiro escreve um componente que será utilizado junto com outros componentes desenvolvidos por outros engenheiros”. Ela diferencia-se da SP, considerada “uma atividade pessoal” onde compete a “um programador escrever um programa completo”.

Segundo SOMMERVILLE (2007), a SE é “uma disciplina de engenharia relacionada com todos os aspectos da produção de software, desde os estágios iniciais de especificação até sua manutenção, depois que este entrar em operação”.

Contemplando uma visão gerencial, MAFEO *apud* NONEMACHER (2003) conceitua a SE como uma “área interdisciplinar que engloba vertentes tecnológica e gerencial visando abordar, de modo sistemático, os processos de construção, implantação e manutenção de produtos de software com qualidade assegurada por construção, segundo cronogramas e custos previamente definidos”.

Em síntese, a Engenharia de Software pode ser definida como a “área da informática que trata da especificação, desenvolvimento e manutenção de um produto de software aplicando tecnologias e práticas de ciência da computação, gerência de projetos e outras disciplinas, objetivando organização, produtividade e qualidade”. (PRESSMAN, 2002)

2.3.1. ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARES

Segundo SOMMERVILLE (2007), o Processo de Desenvolvimento de Software (*Software Development Process*, ou SDP), ou Ciclo de Vida do Software (*Software Life Cycle*, ou SLC), é “um conjunto de atividades, parcialmente ordenadas e plenamente gerenciadas, com a finalidade de obter um software como produto”. O produto de software pode ser entendido como um programa de computador e sua documentação associada, desenvolvidos para um cliente específico ou para um mercado em geral, que apresentam alguns atributos essenciais que demonstrem sua qualidade, tais como: facilidade de manutenção, confiança, eficiência e aceitação.

Antes de iniciar o SDP, deve-se realizar um Estudo de Viabilidade que envolve a avaliação de informações, sua coleta e a elaboração de um relatório, que deve recomendar se o desenvolvimento do software deve prosseguir ou não. A coleta das informações pode ser feita através da elaboração de uma entrevista (abordagem livre ou questionário estruturado), elaboração de cenários (descrição detalhada das formas de interação com o software), elaboração de casos de uso (descrição de casos de uso do sistema em linguagem diagramática padronizada) ou da combinação destes métodos.

De forma geral, para desenvolver um produto de software, o SDP vale-se das seguintes etapas comuns:

- Análise de Requisitos de Software (ou Engenharia de Requisitos de Software): processo de identificação dos requisitos de usuário (requisitos funcionais) e requisitos de sistema (requisitos não-funcionais) na forma da Especificação de Requisitos de Software (*Software Requirements Specification*, ou SRS), baseada no Estudo de Viabilidade;
- Projeto e Implementação de Software: processo de transformação da Especificação de Requisitos em um sistema de software executável. Nesta etapa são produzidos diversos documentos representando as diferentes formas de descrição de projeto;
- Verificação e Validação de Software: processo de verificação das conformidades e não conformidades do

software desenvolvido com as diversas representações do sistema;

- Evolução de Software: processo de modificação voltado a atender novos requisitos de software surgidos após o início de sua utilização pelos usuários. Esta etapa ocupa-se também da documentação interna e externa do software, questões relativas a suporte e treinamento dos usuários e manutenção e melhoria do software.

Contudo, PRESSMAN *apud* NONEMACHER (2003) observa que mais do que simplesmente uma sequência de etapas, a SE “contempla um conjunto de etapas que envolvem métodos, ferramentas e procedimentos”, as quais constituem os chamados paradigmas de SE. A seleção de um paradigma de SE é tomada “tendo como base a natureza do projeto e da aplicação, os métodos e as ferramentas a serem usados, os controles e produtos que precisam ser entregues”.

A complexidade que os paradigmas de SE podem atingir conduzem à necessidade de sua substituição por modelos. STAIR *apud* NONEMACHER (2003) conceitua modelo como “uma abstração ou aproximação, que é utilizado para simular a realidade” e MAFEO *apud* NONEMACHER (2003) menciona os seguintes modelos de desenvolvimento de software como mais importantes:

- Modelo Cascata (*Waterfall Model*, ou WM) ou Ciclo de Vida Clássico
- Modelo de Prototipação Evolucionária
- Modelo Espiral
- Modelo de Software Reutilizável
- Modelo de Síntese Automatizada

Para NONEMACHER (2003), o WM continua sendo o modelo procedimental mais usado e tem sua importância reconhecida na SE em virtude da semelhança de suas etapas com as etapas comuns entre os SDP descritas anteriormente, como pode ser visto na Figura 35. O WM pode ser caracterizado por uma abordagem sistemática formada pelas etapas sequenciais de: análise e engenharia de sistemas, análise de requisitos, projeto, codificação, testes e manutenção.

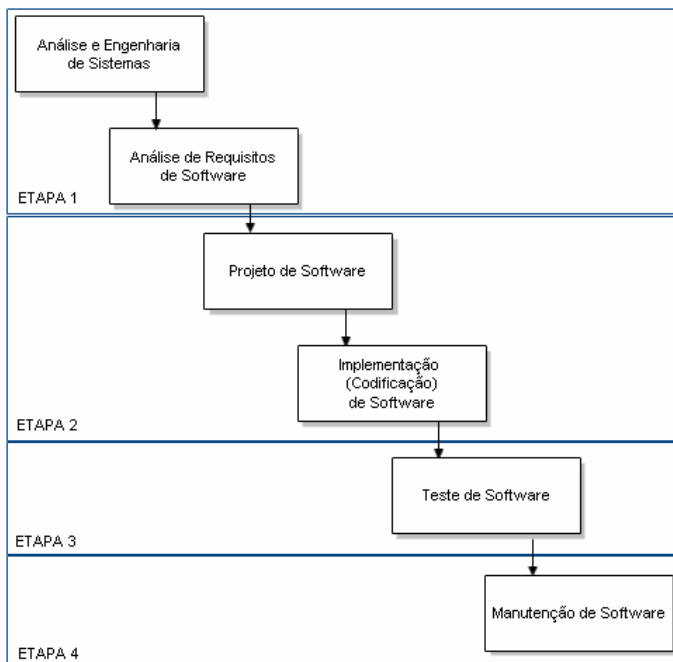


Figura 35 – Modelo Cascata (ou Ciclo de Vida Clássico) e as Etapas do SDP

Para SOMMERVILLE (2007), após o processo de implementação, o software deve ser verificado e validado. Logo, identifica-se uma diferença entre os conceitos de verificação e validação de software. O processo de verificação “envolve verificar se o software atende aos requisitos funcionais e não-funcionais da Especificação de Requisitos”, enquanto o processo de validação é mais geral e visa “assegurar que o sistema atenda às expectativas do cliente”. Deste modo, o Processo de Verificação e Validação de Software (*Software Verification and Validation Process*, ou SVVP) pode ser definido como “um conjunto de atividades que objetiva verificar se o software atende a seus requisitos funcionais e não-funcionais, e às expectativas do cliente”.

Além disso, existem também duas abordagens complementares para o SVVP que se diferenciam pela necessidade ou não de executar o software num computador durante o processo, que são denominadas respectivamente: estática e dinâmica.

A Inspeção de Software (*Software Inspection*, ou SI) é um processo estático de verificação e validação de representações do sistema (Especificação de Requisitos, Modelo de Projeto, código-fonte etc) visando à identificação de não-conformidades no software, ou seja, a detecção de defeitos no software. Considera-se que a SI não engloba outros tipos de revisão de qualidade, tais como aquelas relacionadas com cronograma, custos, gerenciamento de projeto e alcance dos objetivos organizacionais. Deve-se esclarecer que o conceito de SI difere do conceito de Depuração de Software (*Software Debugging*, ou SD). A SD é o processo de localização e correção de erros no código-fonte do software. Normalmente, as ferramentas de depuração limitam-se a corrigir apenas erros de sintaxe no código-fonte, e não corrigem erros de lógica de programação. HUMPHREY *apud* NONEMACHER (2003) indexou e classificou em categorias e subcategorias os erros mais comuns encontrados no processo de SI, segundo consta na Tabela 3.

O Teste de Software (*Software Testing*, ou ST) é um processo dinâmico de verificação e validação cujo objetivo é simultaneamente demonstrar as conformidades do software e identificar suas não conformidades com a Especificação de Requisitos. As atividades fundamentais no processo do ST são: o teste de componentes, onde se testam as partes do sistema, e o teste de sistema, onde se testa o sistema como um todo. Se o teste de sistema envolve a integração de dois ou mais componentes que implementam funcionalidades, ou mesmo a integração com outros softwares, complementa-se o processo com mais dois testes: o teste de integração, onde se testa a efetividade da integração, e o teste de versão, onde se testa conformidades e não-conformidades do sistema integrado frente a Especificação de Requisitos. Se o teste de versão envolver testar o conjunto integrado de softwares em relação a propriedades, como desempenho e confiabilidade, este passa a chamar-se Teste de Desempenho (*Performance Test*, ou PT).

Tabela 3 – Classificação e indexação dos erros padrão em Inspeção de Software (Fonte: HUMPRHEY *apud* NONEMACHER, 2003)

Índice	Categoria	Subcategoria
10	Documentação	10.1 – Comentários
		10.2 – Mensagens
20	Sintaxe	20.1 – Escrita
		20.2 – Pontuação
		20.3 – Tipos
		20.4 – Formato das instruções
30	Pacote	30.1 – Gerenciamento de mudança
		30.2 – Bibliotecas de programas
		30.3 – Controle de versão
40	Associação	40.1 – Declaração
		40.2 – Nomes duplicados
		40.3 – Escopo
		40.4 – Limites
50	Interface	50.1 – Chamadas de procedimentos e referências
		50.2 – Entrada e saída de dados
		50.3 – Formatos
60	Verificação	60.1 – Mensagens de erros
		60.2 – Verificações inadequadas
70	Dados	70.1 – Estruturas
		70.2 – Conteúdos
80	Funções	80.1 – Lógica
		80.2 – Ponteiros
		80.3 – Laços (loops)
		80.4 – Recursividade
		80.5 – Computação
		80.6 – Defeitos de funções
90	Sistema	90.1 – Configuração
		90.2 – Tempo
		90.3 – Memória
100	Ambiente	100.1 – Projeto
		100.2 – Compilação
		100.3 – Teste
		100.4 – Outros problemas de suporte

3. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

A adoção do Modelo Cascata proposto por PRESSMAN (2002) para desenvolvimento do software de controle deu-se não apenas devido à sua semelhança com o PDP (*Product Development Process*, ou Processo de Desenvolvimento de Produto) da engenharia e por tratar-se de um software com aplicações em Engenharia de Fabricação, mas também por não exigir a formação de uma equipe de desenvolvedores como critério mínimo para sua execução. As etapas genéricas do SDP (Análise de Requisitos, Projeto e Implementação, Verificação e Validação, Evolução) serviram de base para o desenvolvimento da primeira versão funcional do software obtida pela aplicação do Modelo Cascata.

3.1. ANÁLISE DE REQUISITOS DO SOFTWARE

Para cumprir a etapa de Análise de Requisitos de Software, procedeu-se a um prévio Estudo de Viabilidade visando principalmente investigar a possibilidade de integração do novo software com o software de planejamento do processo de RP por SLS desenvolvido pelo NUFER. Em seguida, formulou-se uma Visão de Projeto que descreve uma metodologia de uso racional de um equipamento de prototipagem rápida por SLS e concluiu-se esta etapa do modelo de desenvolvimento adotado com a definição da Especificação de Requisitos, para determinar objetivamente as funcionalidades desejadas (requisitos funcionais) e limitações (requisitos não funcionais) que o novo software deveria apresentar.

3.1.1. ESTUDO DE VIABILIDADE

A partir do Relatório de Visita Técnica (Apêndice A), da análise do software Alpha e da revisão bibliográfica sobre o status do sistema-protótipo desenvolvido por KULMAN (2006) e aperfeiçoado por DABBAS (2006), realizou-se um Estudo de Viabilidade visando identificar as necessidades no desenvolvimento de um novo software de controle e sua integração a um software de planejamento de projeto.

Com base na análise do software Alpha, pôde-se concluir que entre as limitações apresentadas pelo software estavam:

- ausência de um módulo de fatiamento STL, de modo que as informações eram obtidas do pré-processamento de uma imagem 2D;

- impossibilidade de configurar previamente os parâmetros de fabricação para cada camada, causando a necessidade de paradas durante o processo de fabricação para configuração de parâmetros;
- impossibilidade de variar a estratégia de fabricação de uma camada para outra;
- interface principal apresentando poucos recursos funcionais e visuais (ícones, relatórios, gráficos etc).

O Estudo de Viabilidade evidenciou a flexibilidade do software RP³, desde a importação do arquivo STL gerado pelo software CAD até a escolha da estratégia de varredura do laser e parâmetros de fabricação. Além disso, verificou-se a possibilidade de exportação dos dados geométricos e de fabricação em forma segmentada (uma camada por arquivo exportado) ou combinada (várias camadas num único arquivo exportado, constituindo um objeto sólido tridimensional) com base num padrão de exportação de dados denominado Winmark. Por fim, o software RP³ também apresenta a possibilidade de implementação de novas características, tais como planejamento da fabricação de peças com FGM (*Functionally Graded Materials*, ou Materiais com Gradientes Funcionais) pela variação na potência do laser, e fatiamento adaptativo (geração de camadas com diferentes espessuras).

Concluindo o Estudo de Viabilidade, as seguintes ações foram consideradas viáveis:

- desenvolver um software para controle do processo SLS;
- integrar o software de controle desenvolvido com o software RP³.

Adicionalmente, sugere-se a possibilidade de:

- implementar um repositório de dados, acessível via software, contendo diferentes tipos de materiais, camadas e objetos pré-configurados;
- gerar relatórios personalizados sobre o projeto de fabricação em curso contendo dados geométricos, estratégia e parâmetros de fabricação, materiais empregados etc;
- fornecer recursos de personalização para configuração dos parâmetros do software para cada usuário (ou grupo de usuários) diferente.

3.1.2. VISÃO DE PROJETO

Com base no resultado do Estudo de Viabilidade concebeu-se a seguinte Visão de Projeto para o software de controle do processo de prototipagem rápida por SLS:

“O projetista cria, com auxílio do software de projeto, a camada ou o objeto tridimensional a ser fabricado e planeja o processo de fabricação, com auxílio do software CAM, gerando o plano de processo. No equipamento de prototipagem rápida por SLS, o operador executa o software de controle e cria um novo projeto de fabricação ou abre um projeto de fabricação existente. Neste projeto, ele insere (ou cria, se ainda não existirem) os modelos previamente disponíveis de planos de processo das camadas ou objetos, material para fabricação e, opcionalmente, relatórios de fabricação. Estes relatórios, gerados ao fim do processo, podem conter informações relativas à fabricação, tais como: geometria da camada ou objeto, material utilizado, parâmetros do equipamento, parâmetros do processo, custo de fabricação, tempo de fabricação etc. Alternativamente, ele pode ainda manipular camadas ou objetos, alterando sua ordem de fabricação, multiplicando-os, excluindo-os, agrupando-os ou convertendo-os de camadas para objeto ou de objeto para camadas. Após concluir o projeto, o operador pode salvá-lo com o mesmo nome ou com outro nome. O operador pode optar por operar manualmente o hardware do equipamento (laser, depositador de pós e plataforma de fabricação, exaustor e lâmpadas de aquecimento) durante a fabricação através da interface do software ou configurá-los, antes do início da fabricação. O operador inicia a fabricação da camada ou objeto e pode cancelá-la a qualquer momento”.

O fluxograma da Figura 36 resume as etapas descritas na Visão de Projeto.

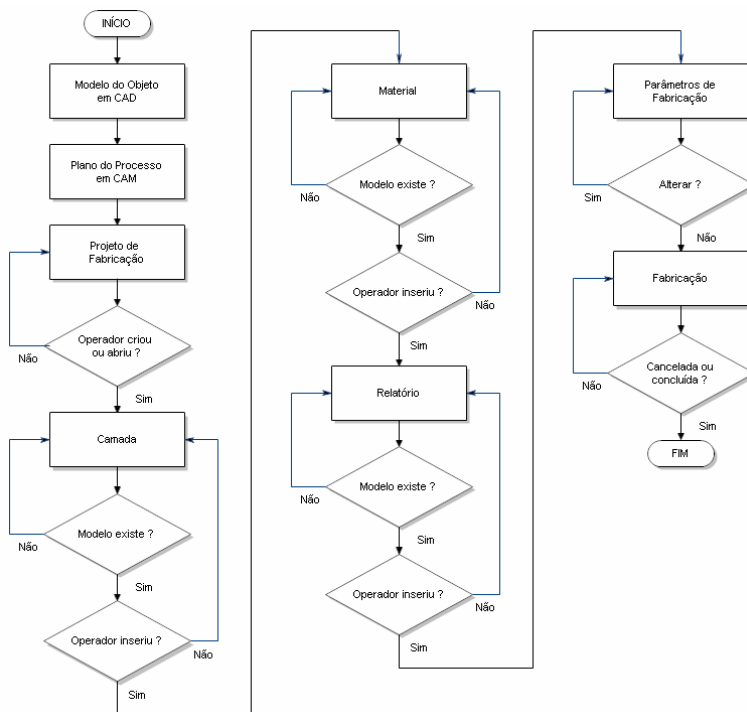


Figura 36 – Fluxograma representativo da Visão de Projeto

3.1.3. ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS

Com base na Visão de Projeto, foram identificados os requisitos funcionais e não-funcionais que o software deve atender. Todos os requisitos foram compilados num único documento, estruturado segundo sugerido por SOMERVILLE (2007), denominado “Especificação de Requisitos do Software SLS Studio”, que se encontra no Apêndice B Ele compreende todos os casos de uso do software, dispostos em tabelas contendo suas respectivas descrições, entradas ou pré-condições, saídas ou pós-condições e a prioridade de implementação.

Para implementar uma primeira versão funcional do software, foram considerados apenas os requisitos funcionais e não-funcionais cujas prioridades foram definidas como “essencial” e “importante” na Especificação de Requisitos.

3.2. PROJETO DO SOFTWARE

Com base na Especificação de Requisitos, iniciou-se o Projeto do Software pelo projeto de sua interface e em seguida definiu-se a arquitetura geral para sua implementação.

3.2.1. PROJETO DA INTERFACE

Principalmente por ser um sistema que não será utilizado diariamente, a interface principal do software foi concebida para ser amigável ao usuário iniciante sem se tornar cansativa aos usuários mais experientes. Ela segue o padrão comum aos softwares de RP para o sistema operacional *Windows*, tendo sido projetada a partir das funcionalidades descritas na Especificação de Requisitos. A interface principal do software compõe-se dos seguintes elementos:

- Barra de Menús: composta por menús de opções que permite acesso a todas as funções do software;
- Barra de Ferramentas Principal: permite a criação, abertura e salvamento de Arquivos de Projeto de Fabricação;
- Barra de Ferramentas Objeto: permite a criação, edição e visualização de Arquivos de Camada; inserção e exclusão de camadas nos Arquivos de Projeto de Fabricação;
- Barra de Ferramentas Material: permite a criação, edição e visualização de Arquivos de Material; inserção e exclusão de material nos Arquivos de Projeto de Fabricação;
- Barra de Ferramentas Relatório: permite a criação, edição e visualização de Arquivos de Relatório; inserção e exclusão de relatórios nos Arquivos de Projeto de Fabricação;
- Barra de Ferramentas Fabricação: permite a fabricação ou o cancelamento da fabricação de peças;
- Barra de Ferramentas Auxiliar: permite acesso às configurações gerais do software; controle do sistema mecânico; controle da webcam para monitoramento da

câmara de fabricação; controle do laser e ajuda do software;

A interface principal foi projetada de modo a permitir o acesso a todas as funcionalidades do software através da Barra de Menús, exceto aquelas relacionadas à manipulação de Arquivos de Projeto de Fabricação, que estão visíveis apenas quando um destes encontra-se aberto. A Figura 37 exhibe a disposição dos elementos na interface principal.

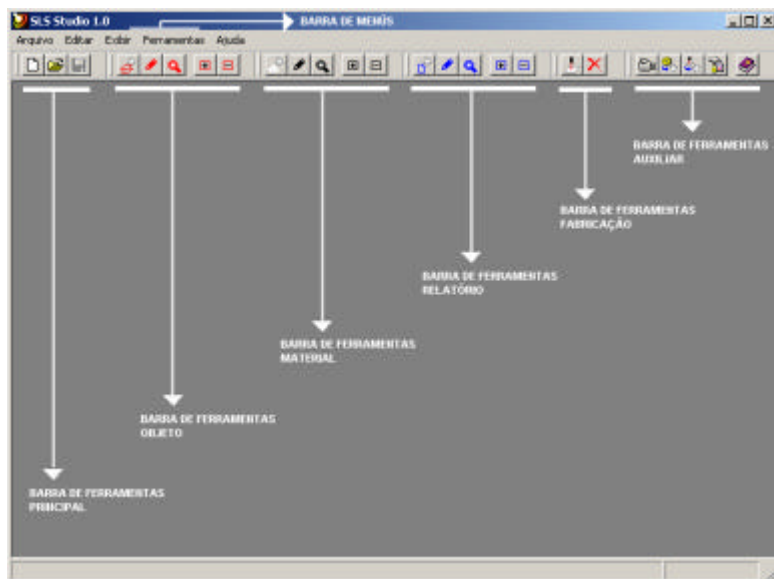


Figura 37 – Interface principal do software SLS Studio

Como mencionado anteriormente, todas as funcionalidades do software podem ser alcançadas através dos menús de opções da Barra de Menús, retratados na Figura 38.

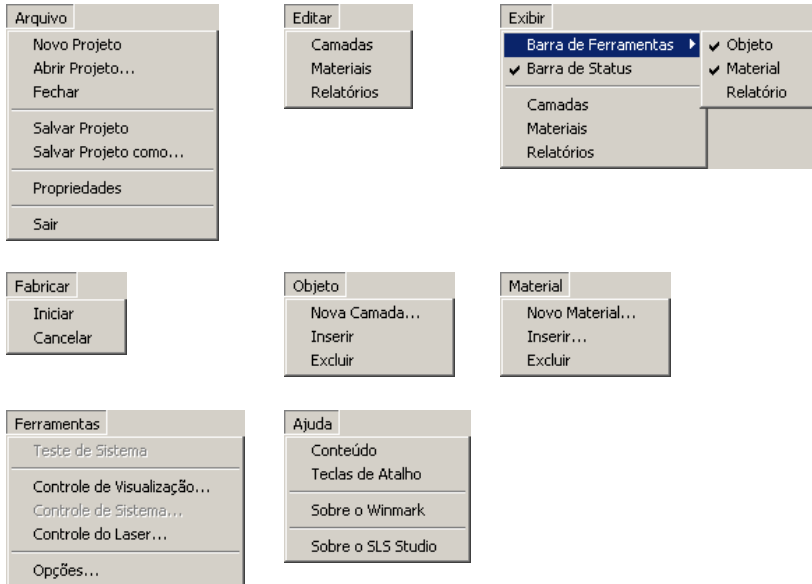


Figura 38 – Menús de Opções do SLS Studio

De acordo com a Visão de Projeto, o usuário deve abrir ou criar um novo Projeto de Fabricação. A Figura 39 mostra o layout da interface para um Arquivo de Projeto de Fabricação. Podem-se identificar cinco áreas principais delimitadas por molduras: “Projeto de Fabricação”, “Propriedades da Camada”, “Propriedades do Material”, “Propriedades do Relatório” e “Propriedades do Sistema SLS”.

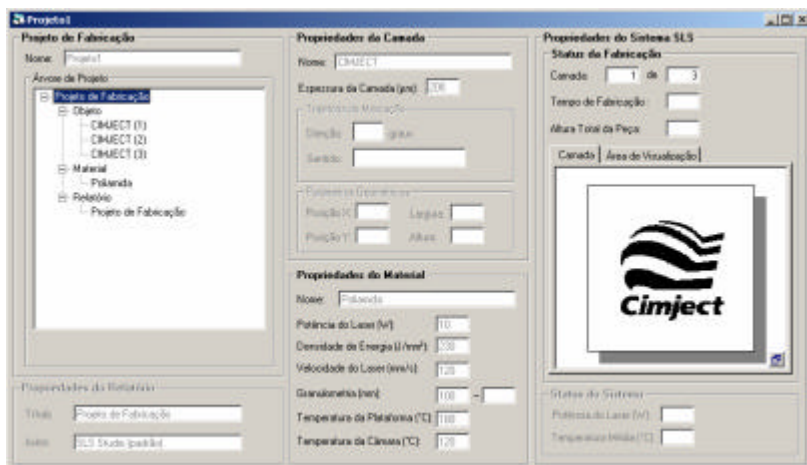


Figura 39 – A janela de “Projeto Padrão de Fabricação”

As molduras “Propriedades da Camada”, “Propriedades do Material” e “Propriedades do Relatório” permitem a visualização das propriedades do respectivo componente do projeto ora selecionado na Árvore de Projeto. A moldura “Propriedades do Sistema SLS” permite a visualização do status da fabricação da peça, e nela destacam-se a aba “Área de Visualização” (Figura 40), que exhibe as imagens da webcam posicionada na câmara de fabricação, e a aba “Camada”, que exhibe a imagem do arquivo de marcação atualmente em fabricação.

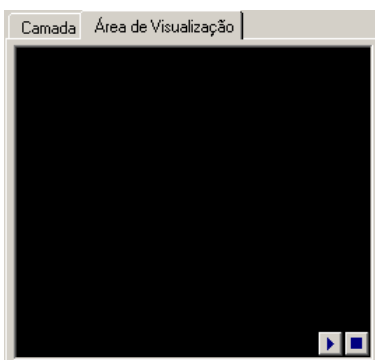


Figura 40 – Aba “Área de Visualização” do Projeto Padrão do SLS Studio

Antes do início da fabricação, pode-se configurar algumas opções de inicialização e parâmetros de fabricação através da caixa de diálogo “Opções > Geral”, mostrada na Figura 41.

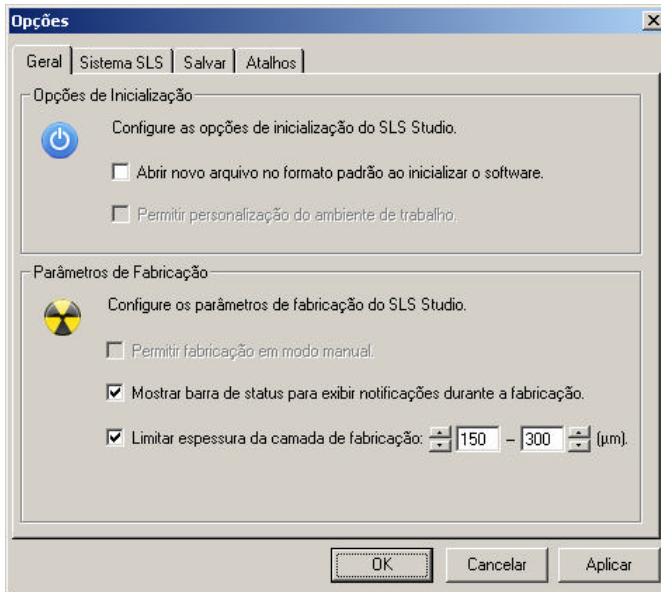


Figura 41 – Caixa de diálogo “Opções > Geral”

Parâmetros do Sistema SLS também podem ser personalizados através da caixa de diálogo “Opções > Sistema SLS” (Figura 42), tais como: curso máximo de deslocamento da plataforma de fabricação, relação de transmissão da plataforma, tempo de acionamento das lâmpadas de aquecimento da camada de fabricação e do exaustor da câmara de fabricação.

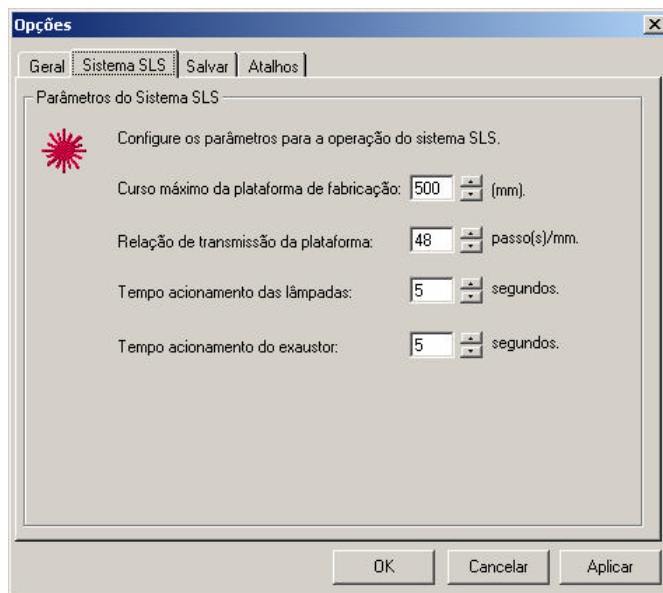


Figura 42 – Caixa de diálogo “Opções > Sistema SLS”

Opções de salvamento automático de arquivo e formato padrão para Arquivos de Projeto de Fabricação e Relatórios de Fabricação podem ser configuradas com a caixa de diálogo “Opções > Salvar” (Figura 43).

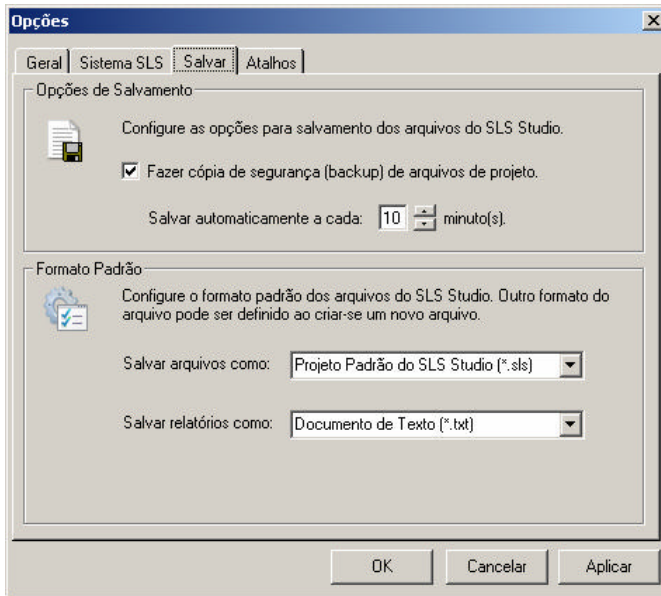


Figura 43 – Caixa de diálogo “Opções > Salvar”

A personalização dos atalhos para os diversos tipos de arquivos do software é possível através caixa de diálogo “Opções > Atalhos” (Figura 44), com auxílio do Navegador de Pastas (Figura 45).

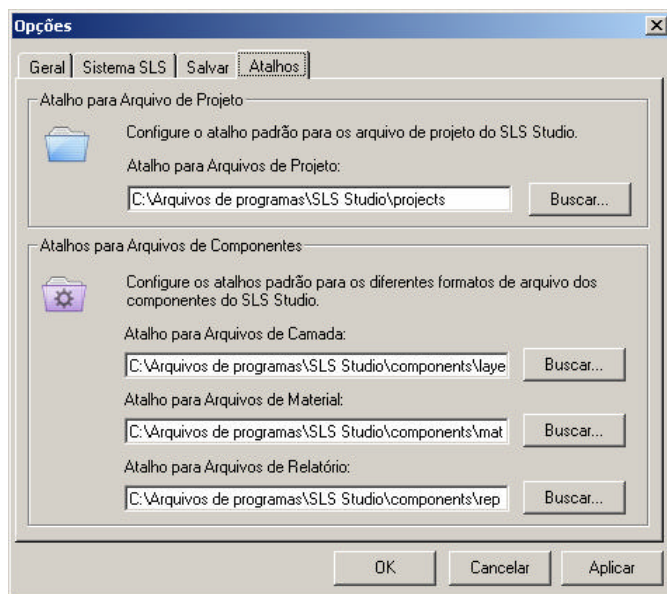


Figura 44 – Caixa de diálogo “Opções > Atalhos”

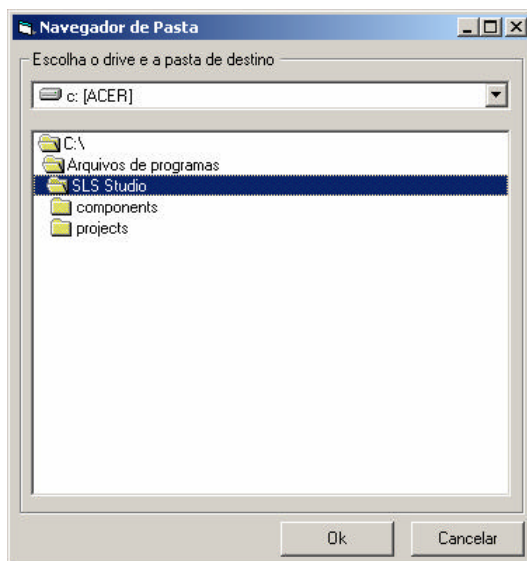


Figura 45 – Caixa de diálogo “Navegador de Pasta”

Antes de iniciar a fabricação de peças, pode-se testar o funcionamento dos elementos integrantes do sistema mecânico do

equipamento de prototipagem rápida através da interface do “Controle de Sistema” (Figura 46).

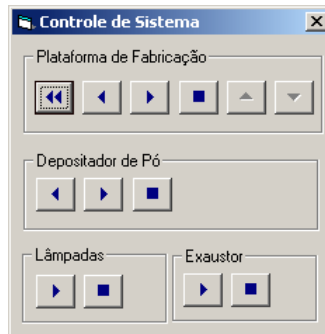


Figura 46 – Caixa de diálogo “Controle de Sistema”

A criação, edição e visualização dos arquivos de camadas, que constituem o repositório de camadas do software, é feita através das caixas de diálogo “Nova Camada” (Figura 47), “Editar Camadas” (Figura 48) e “Exibir Camadas” (Figura 49).

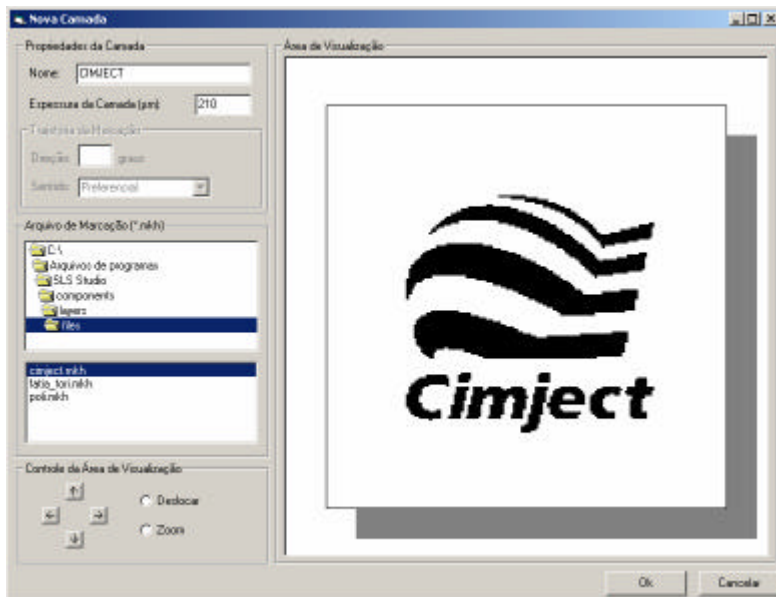


Figura 47 – Caixa de diálogo “Nova Camada”

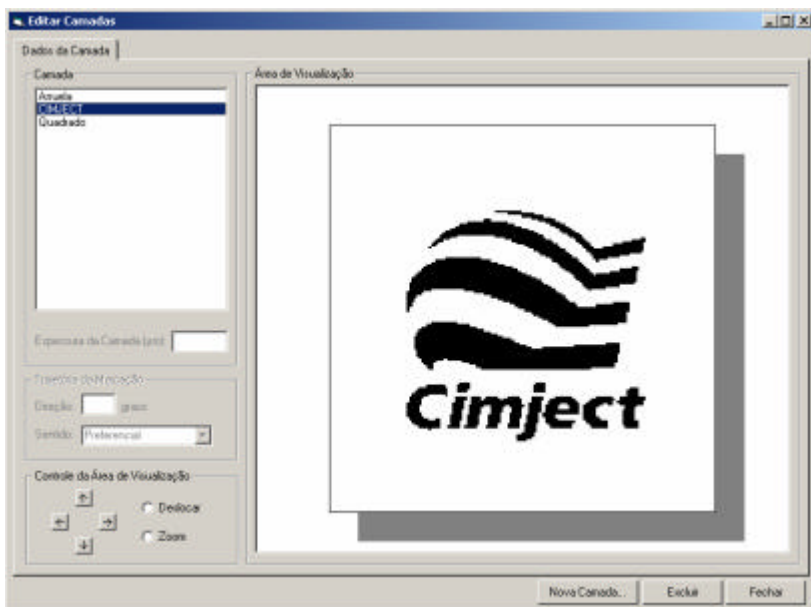


Figura 48 – Caixa de diálogo “Editar Camadas”

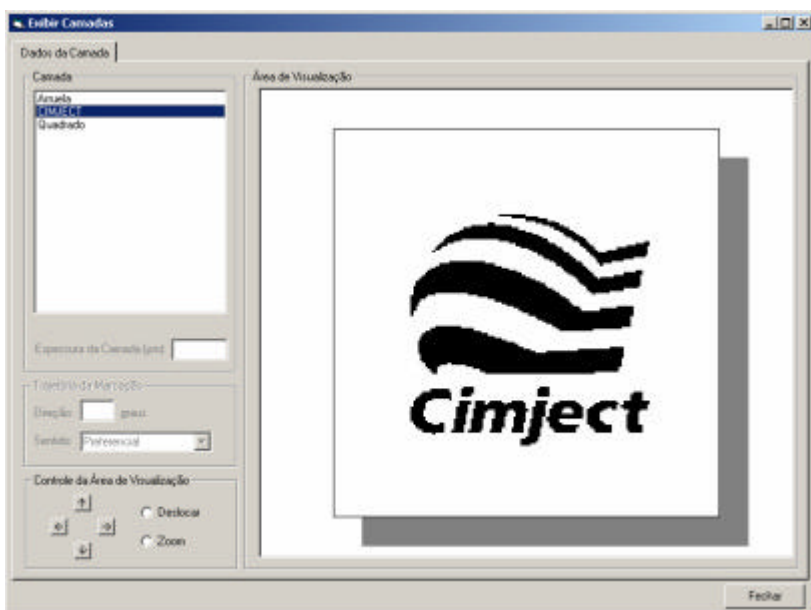


Figura 49 – Caixa de diálogo “Exibir Camadas”

Para manutenção do repositório de materiais do software, projetaram-se as caixas de diálogo “Novo Material” (Figura 50), “Editar Materiais” (Figura 51) e “Exibir Materiais” (Figura 52).

Novo Material

Dados do Material

Informe os dados do material. A definição de faixas de granulometria é opcional, bastando preencher um dos campos.

Propriedades do Material:

Nome: Poliamida

Granulometria (μm):

Densidade de Energia (J/mm^2):

Parâmetros de Fabricação:

Potência do Laser (W):

Velocidade do Laser (mm/s):

Temperatura da Plataforma ($^{\circ}\text{C}$):

Temperatura da Câmara ($^{\circ}\text{C}$):

Ok Cancelar

Figura 50 – Caixa de diálogo “Novo Material”

Editar Materiais

Dados do Material

Material

PEAD

Poliamida

Polipropileno

Propriedades do Material:

Potência do Laser (W): 10

Densidade de Energia (J/mm^2): 230

Velocidade de Varredura do Laser (mm/s): 120

Temperatura da Plataforma ($^{\circ}\text{C}$): 180

Temperatura da Câmara ($^{\circ}\text{C}$): 120

Novo Material... Editar Excluir Fechar

Figura 51 – Caixa de diálogo “Editar Materiais”

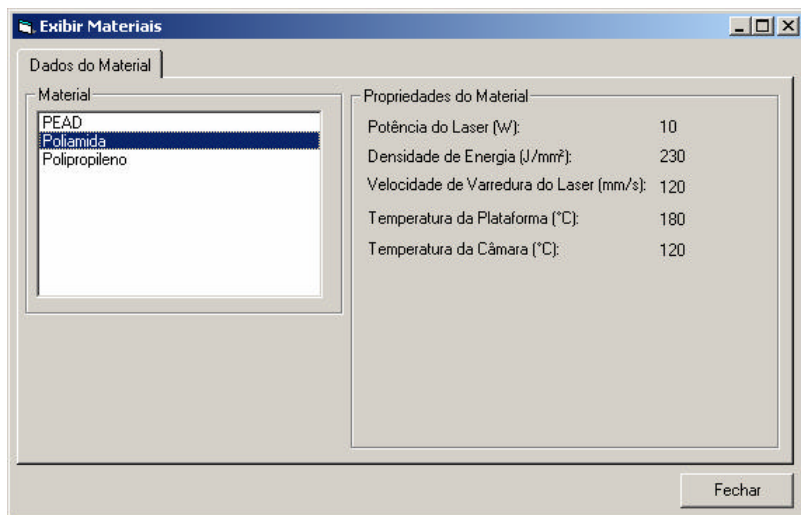


Figura 52 – Caixa de diálogo “Exibir Materiais”

Uma vez que haja ao menos uma camada e um material no repositório do software, pode-se inseri-los num Projeto de Fabricação e iniciar a fabricação com uso da Barra de Ferramentas de Fabricação.

Por permitir ao usuário trabalhar com flexibilidade estes vários componentes que constituem um projeto de fabricação por SLS diretamente no ambiente de fabricação, o software recebeu o nome “SLS Studio”.

3.2.2. ARQUITETURA DO SOFTWARE

A arquitetura para implementação do software compreendeu a definição de seus principais arquivos e suas interrelações, arquitetura de armazenamento e recuperação de dados, componentes e bibliotecas de programação utilizadas, e a estrutura interna de seu pacote de instalação.

A arquitetura do software consiste, como mostra a Figura 53, num arquivo executável (*slsstudio.exe*) que armazena num arquivo de configuração (*sls.ini*) as opções de configuração padrão do software e aquelas personalizadas pelo usuário; no conjunto de arquivos de projeto de fabricação (arquivos com extensão *.sls*) desenvolvidos pelo usuário; no conjunto de arquivos de camada (arquivos *.lay*), material (arquivos *.mat*) e relatório (arquivos *.rep*) que funcionam como repositório de dados; nos arquivos de marcação a laser (arquivos *.mkh*) em padrão

Winmark; e num arquivo executável (*desinstalador.exe*) que opera como desinstalador automático do software.

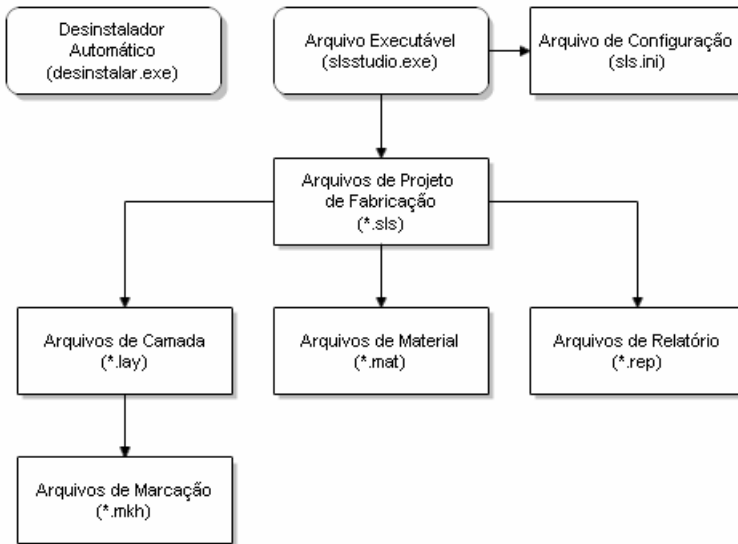


Figura 53 – Arquitetura do software SLS Studio

A Tabela 4 lista os elementos componentes desta arquitetura.

Tabela 4 – Componentes da Arquitetura do software SLS Studio

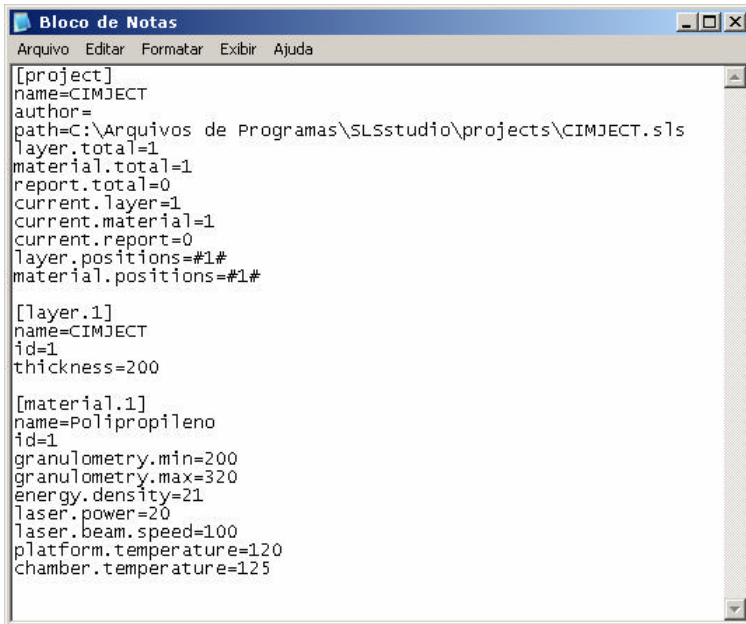
Arquivos	Descrição	Atalho
slsstudio.exe	Arquivo executável compilado no software <i>Microsoft Visual Basic 6.0</i>	SLS Studio/
sls.ini	Arquivo contendo as configurações de software padrão e personalizadas pelo usuário	SLS Studio/
*.sls	Arquivos de contendo informações do projeto de fabricação	SLS Studio/projects/
*.lay	Arquivos contendo informações de camada	SLS Studio/layers/
*.mat	Arquivos contendo informações de material	SLS Studio/materials/
*.rep	Arquivos contendo informações de relatório	SLS Studio/reports/
*.mkh	Arquivos de marcação no padrão <i>Winmark</i>	SLS Studio/layers/mkh/

A arquitetura de armazenamento e recuperação de dados do SLS Studio foi definida em consonância com sua interface. Optou-se por armazenar os dados de projeto, camada, material, relatório e configurações do software em arquivos separados utilizando o padrão de arquivos INI, um padrão nativo do sistema *Windows* que permite armazenamento e recuperação de dados de arquivos em formato *flatfile* (texto simples). Este formato obedece a uma sintaxe específica, composta pelos elementos descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Elementos da sintaxe de um arquivo INI

Elemento	Descrição	Sintaxe
seção	campo de armazenamento de dados que reúne sob si um conjunto de chaves e valores	[seção]
chave	identificador único dentro de uma seção específica ao qual se atribui um valor	chave=
valor	dados para armazenamento e recuperação	

A Figura 54 mostra exemplo de um arquivo INI para armazenamento e recuperação de dados do Projeto de Fabricação do SLS Studio, evidenciando a estrutura de seções, chaves e valores. As tabelas do Apêndice C descrevem a estrutura interna dos todos os arquivos que compõem o SLS Studio.



```
[project]
name=CIMJECT
author=
path=C:\Arquivos de Programas\SLSstudio\projects\CIMJECT.sls
layer.total=1
material.total=1
report.total=0
current.layer=1
current.material=1
current.report=0
layer.positions=#1#
material.positions=#1#

[layer.1]
name=CIMJECT
id=1
thickness=200

[material.1]
name=Polipropileno
id=1
granulometry.min=200
granulometry.max=320
energy.density=21
laser.power=20
laser.beam.speed=100
platform.temperature=120
chamber.temperature=125
```

Figura 54 – Arquivo INI para armazenamento e recuperação de dados

Para implementação da interface, fez-se uso de um conjunto especial de componentes *ActiveX* do *Visual Basic*, disponibilizados gratuitamente pela *Microsoft*, listados na tabela.

O software SLS Studio é capaz de operar um equipamento de RP devido ao uso da tecnologia *ActiveMark*, desenvolvida pela fabricante de sistemas laser *Synrad*. Para dar suporte a esta tecnologia, utilizou-se um componente *ActiveX* do *Visual Basic* disponibilizado gratuitamente pela fabricante que implementa o padrão *Winmark* para arquivos de marcação a laser.

O software SLS Studio pode ser executado diretamente no sistema operacional *Microsoft Windows 98 Second Edition*, contudo para executá-lo em versões posteriores precinde-se da instalação prévia

de um software auxiliar que libere o acesso via porta paralela do PC. Isto ocorre devido à política de segurança adotada pela equipe de desenvolvimento da fabricante *Microsoft*, que em versões posteriores à lançada em 1998 optou por impedir o livre acesso de softwares via porta paralela para evitar danos ao computador do usuário. Para tal, inseriu-se no pacote de instalação do SLS Studio um software gratuito denominado *UserPort*, bem como as instruções para sua configuração de modo que o SLS Studio possa operar qualquer equipamento de RP via porta paralela de um PC com sistemas operacionais posteriores à versão *Windows 98*.

A funcionalidade de entrada e saída de dados pela porta paralela foi alcançada com o uso da biblioteca *input32.dll* disponibilizada gratuitamente pela *Microsoft*. Esta biblioteca também está incluída no pacote de instalação do SLS Studio, sendo instalada e registrada no sistema operacional juntamente com o software.

Para montagem do pacote de instalação automática do SLS Studio, utilizou-se uma versão gratuita do software *Install Creator*. O instalador automático compõe-se dos arquivos mínimos necessários e configurações mínimas exigidas para execução do SLS Studio. Na Tabela 6 estão listados os arquivos presentes no pacote de instalação da versão 1.0 do SLS Studio.

Tabela 6 – Arquivos do Pacote de Instalação do SLS Studio

Arquivo e Local da Instalação	Tipo de Arquivo
SLS Studio\slsstudio.exe	Arquivo executável
SLS Studio\desinstalar.exe	Arquivo executável
SLS Studio\sls.ini	Arquivo de configurações
Windows\system32\ocx\bclw32.dll	Biblioteca DLL
Windows\system32\ocx\cbw32.dll	Biblioteca DLL
Windows\system32\ocx\hlvdd.dll	Biblioteca DLL
Windows\system32\ocx\inpout32.dll	Biblioteca DLL
Windows\system32\ocx\snbd6w9s.dll	Biblioteca DLL
Windows\system32\ocx\syndwgob.dll	Biblioteca DLL
Windows\system32\ocx\comct332.ocx	Componente <i>ActiveX</i>
Windows\system32\ocx\comdlg32.ocx	Componente <i>ActiveX</i>
Windows\system32\ocx\mscomct2.ocx	Componente <i>ActiveX</i>
Windows\system32\ocx\mscomctl.ocx	Componente <i>ActiveX</i>
Windows\system32\ocx\synmhatx.ocx	Componente <i>ActiveX</i>
Windows\system32\ocx\tabctl32.ocx	Componente <i>ActiveX</i>
Windows\userport.exe	Arquivo Executável
SLS Studio\components\layers\logo_cimject.lay	Exemplo de Arquivo de Camada
SLS Studio\components\layers\base_quadrada.lay	Exemplo de Arquivo de Camada
SLS Studio\components\layers\files\cimject.mkh	Exemplo de Arquivo de Marcação
SLS Studio\components\layers\files\square.mkh	Exemplo de Arquivo de Marcação
SLS Studio\components\materials\poliamida.mat	Exemplo de Arquivo de Material
SLS Studio\components\projects\cimject.sls	Exemplo de Arquivo de Projeto
SLS Studio\leiam.txt	Arquivo de Instruções de Instalação

3.3. IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE

Para implementação do código-fonte do software optou-se pelo uso da linguagem de programação *Visual Basic* no ambiente de desenvolvimento *Microsoft Visual Studio 6*. O uso desta linguagem restringe o uso do software ao sistema operacional *Windows 98* (ou versão posterior) e um hardware mínimo para o microcomputador que o executará. Estas decisões basearam-se em fortes argumentos:

- linguagem de programação baseada em objetos, e não orientada a objetos, o que promove a modularização e reaproveitamento de código-fonte, sem as formalidades e complexidades intrínsecas à orientação a objeto;
- facilidade de aprendizagem do *Visual Basic* frente a outras linguagens de programação;
- software desenvolvido é de pequeno porte e não utiliza banco de dados;
- ambiente *Microsoft Visual Studio 6* disponível no CIMJECT;
- software compilado para sistema operacional *Windows 98* (ou versão posterior).

3.3.1. PROGRAMAÇÃO DO SOFTWARE

O software foi programado usando técnicas de programação estruturada baseada em objetos. As funções e procedimentos que implementam as funcionalidades definidas em projeto para interface foram definidos em formulários do *Visual Basic* (arquivo com extensão *.frm*). As variáveis globais e estruturas de tipos de dados criados na programação do software, bem como as funções e procedimentos que implementam a capacidade de operar um equipamento de RP foram implementadas separadamente em módulos de programação do *Visual Basic* (arquivo com extensão *.bas*).

A seguir, apresenta-se um exemplo do código-fonte em linguagem *Visual Basic*:

```
'Procedimento principal do software SLS
Studio 1.0
Private Sub MDIForm_Load( )
```

```

        'Inicializa porta paralela
        Call ParallelPort_Reset

        'Cria do objeto FileSystem
        Set fs =
CreateObject("Scripting.FileSystemObject")

        'Define texto da barra de título no
formato "SLS Studio X.X"
        Me.Caption = Me.Caption & " " & App.Major
& "." & App.Minor

        'Carrega as configurações do software
        Call INI_Data_Load

        'Exibe a barra de status do software
        StatusBar1.Visible = ShowNotes

        'Desabilita botão "Salvar Projeto"
        tbrMain.Buttons(3).Enabled = False

        'Abre um novo projeto automaticamente
        If NewProjectOnStart = 1 Then
            Project_Create
        End If

    End Sub

```

As tabelas constantes do Apêndice D descrevem os módulos e os formulários desenvolvidos para o SLS Studio, com o respectivo total de Linhas de Código (*Lines of Code*, ou LOC) escritas.

3.3.2. INTEGRAÇÃO COM SOFTWARE DE PLANEJAMENTO

Em visita técnica ao NUFER (ver Apêndice A) investigou-se a possibilidade de integração entre o software RP³ e o software para controle do processo SLS conforme descrito neste trabalho.

Para tal, adotou-se um padrão de armazenamento e recuperação de dados em arquivo denominado *Winmark*. Ele serve então como um protocolo de intercâmbio de dados entre o RP³ e o SLS Studio.

Optou-se por este padrão proprietário de arquivo, pois o mesmo é disponibilizado gratuitamente pelo fabricante do sistema laser, permite flexibilidade na seleção, bem como plena portabilidade, das informações geométricas e parâmetros de fabricação gerados no software de planejamento, para o software de controle.

3.4. EVOLUÇÃO DO SOFTWARE

Visando criar um produto de software com extensibilidade, reutilizável e flexível, adotou-se como linguagem principal de desenvolvimento o *Visual Basic* seguindo o modelo de programação estruturada baseada em objetos. Neste modelo, funções e procedimentos da linguagem estruturada são interpretados como métodos da linguagem orientada a objetos. Tanto o software SLS Studio, quanto o drivers que permitem a operação do equipamento de RP por SLS foram desenvolvidos respeitando este paradigma. Deste modo, pode-se reprogramar funções e procedimentos do software sem alterar outros segmentos do seu código-fonte. Isto possibilita inclusive o desenvolvimento de drivers específicos para diferentes equipamentos de RP por SLS. No Apêndice E, encontra-se o Manual de Programação de Drivers do SLS Studio, cuja finalidade é auxiliar no desenvolvimento de novos drivers.

4. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

O processo de verificação e validação de software consistiu na aplicação das técnicas de inspeção de software durante a etapa de implementação e de testes de software realizados após a conclusão desta etapa.

Nas inspeções de software adotaram-se como métricas e registraram-se: o tempo total de implementação do software, o total de linhas de código escritas, a quantidade de erros ocorridos durante sua implementação e suas respectivas classificações segundo erros padrão indexados na tabela.

Os testes de verificação e validação do software consistiram num teste de sistema e e num teste de integração. No teste de sistema foram testadas todas as funções que não incluíam a fabricação por SLS e uso de arquivos de marcação criados no software RP³, tais como: criação, abertura e fechamento de um Arquivo de Projeto de Fabricação; criação, edição, visualização de componentes (camadas e materiais) no repositório do software; inserção e exclusão de componentes no Projeto de Fabricação; configurações de salvamento automático de arquivo; conectividade e funcionamento da webcam. No teste de integração foram testadas as configurações gerais de fabricação e do Sistema SLS, o uso do controle de sistema, a fabricação de uma única camada e a fabricação de uma sequência de camadas com o uso do software.

4.1. SIMULAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Devido à indisponibilidade temporária do sistema-protótipo SLS do CIMJECT para realização de testes visando à validação do novo software de controle, optou-se pela simulação do processo com o auxílio de um Simulador para Equipamento de Prototipagem Rápida por SLS. O LHW – Laboratório de Hardware da UFSC em parceria com o CIMJECT desenvolveu uma placa de hardware (ver Anexo I) capaz de simular as etapas do funcionamento do sistema-protótipo SLS disponível no CIMJECT e viabilizar a montagem de um simulador. Isto requereu um mapeamento prévio das etapas de funcionamento do sistema-protótipo, elaboração dos requisitos de projeto necessários para elaboração do *layout* da placa de hardware, especificação dos componentes para montagem e determinação dos níveis de tensão dos sinais de controle necessários para comando do simulador.

A sequência das etapas de funcionamento do sistema-protótipo SLS do CIMJECT pode ser resumida em:

- Posicionamento da plataforma de fabricação na posição zero-máquina definida pelo sensor de fim-de-curso (sensor 1);
- Reposicionamento da plataforma de fabricação na posição inicial;
- Deslocamento do depositador de pós até o sensor de fim-de-curso (sensor 2);
- Retorno do depositador de pós até o sensor de partida (sensor 3);
- Acionamento das lâmpadas de aquecimento;
- Desligamento das lâmpadas de aquecimento e marcação a laser da camada;
- Acionamento do exaustor;

O fluxograma da Figura 55 representa esta sequência de etapas que o Simulador de Equipamento de Prototipagem Rápida por SLS deve ser capaz de simular.

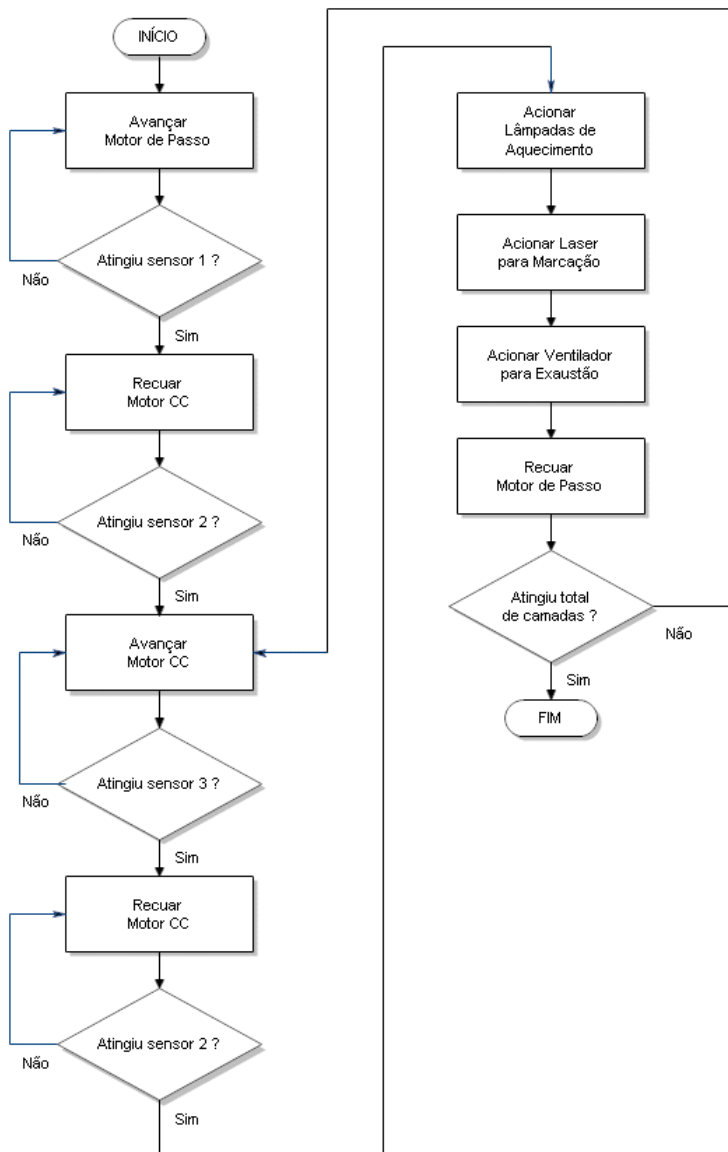


Figura 55 – Fluxograma das Etapas de Funcionamento do Simulador

Uma vez que o sistema-protótipo SLS consiste em os dois sistemas de controle (sistema de controle do laser e sistema de controle térmico e mecânico da câmara de fabricação), o software SLS Studio será capaz de operá-los coordenadamente. A Figura 56 ilustra os sistemas que compõem o sistema-protótipo SLS.

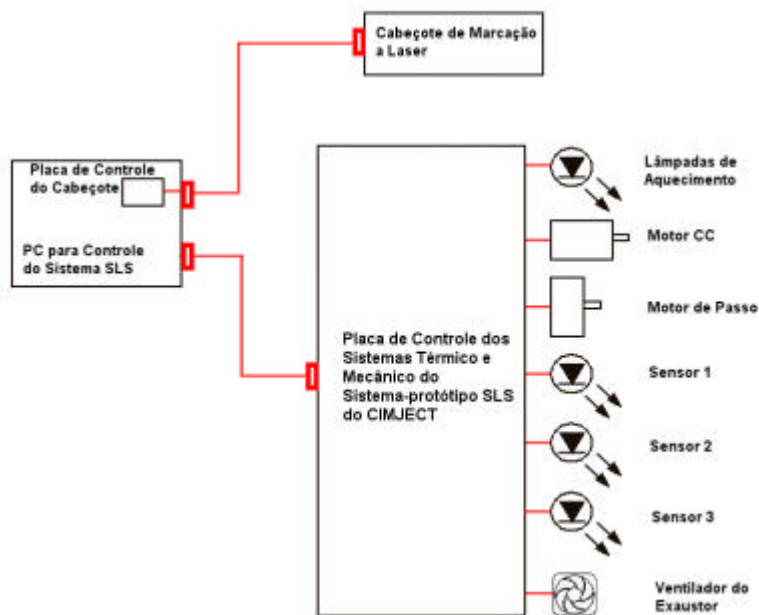


Figura 56 – Representação dos sistemas de controle do laser e o sistema de controle mecânico e térmico

Para comunicação com o cabeçote de marcação a laser, o software vale-se de uma placa de controle instalada no PC e um driver lógico, ambos fornecidos pela fabricante *Synrad*. Este driver lógico fornece suporte para uso do padrão proprietário para marcação a laser denominado *Winmark*. Já para a comunicação entre o software e o hardware do sistema de controle térmico e mecânico, desenvolveram-se no CIMJECT uma placa de controle e um driver lógico que tornam possível comandar a plataforma de fabricação, depositador de pós, exaustor e lâmpadas de aquecimento. Particularmente, a transmissão de dados entre o microcomputador e o sistema de controle térmico e mecânico é feita através de um cabo paralelo (DB25 – DB25). A Figura 57 ilustra a configuração dos pinos da porta paralela.

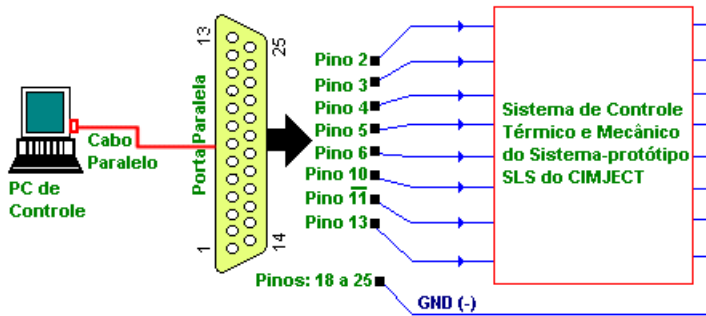


Figura 57 – Configuração dos pinos da porta paralela

As etapas para operação do sistema-protótipo SLS podem ser resumidas pelas etapas a seguir:

- Após a preparação do sistema-protótipo SLS para fabricação, executa-se o software SLS Studio que, através do driver lógico da *Synrad*, tenta identificar a presença da placa de controle do cabeçote de marcação a laser;
- Caso o cabeçote de marcação a laser não esteja conectado ou esteja desligado, uma mensagem de erro é exibida ao usuário;
- Caso contrário, o driver lógico do CIMJECT é acionado e posiciona automaticamente a plataforma de fabricação na posição inicial, desloca o depositador de pós formando a primeira camada e aciona a lâmpada de aquecimento;
- Após alguns segundos, desliga-se a lâmpada de aquecimento e aciona-se o cabeçote de marcação a laser que sinteriza seletivamente a camada de fabricação;
- Com o fim da marcação a laser, aciona-se o exaustor e repete-se o processo até a conclusão da peça, quando uma mensagem é exibida ao usuário informando o fim da fabricação.

Para efetuar a montagem do Simulador de Equipamento de Prototipagem Rápida por SLS são necessários:

- 1 motor de corrente contínua (CC);
- 1 motor de passo;
- 1 lâmpada;
- 3 interruptores para acionamento dos sensores;
- 1 ventilador representativo do exaustor;

Todos os componentes são comandados via porta paralela e na Tabela 7 estão especificadas as configurações dos pinos da porta paralela, seu estado padrão e função.

Tabela 7 – Configuração dos Pinos da Porta Paralela da Placa de Hardware

Pino	Sinal	Função
2	1 = liga o motor(*) 0 = desliga o motor	Envia pulsos para controlar o motor da plataforma
3	0 = sentido padrão / 1 = sentido contrário	Informa à placa o sentido de rotação do motor da plataforma
4	0 = potencia baixa / 1 = potência total	Informa à placa a velocidade do motor da plataforma
5	0 = liga / 1 = desliga	Aciona o motor do depositador de pós
6	0 = sentido padrão / 1 = sentido contrário	Informa à placa o sentido da movimentação do motor do depositador de pós
7	0 = desligado / 1 = ligado	Informa à placa a velocidade do motor do depositador de pós
8	0 = liga / 1 = desliga	Aciona o ventilador axial do exaustor
9	0 = liga / 1 = desliga	Aciona a lâmpada de aquecimento
10	0 = aberto / 1 = fechado	Sensor 1: identifica a posição da plataforma (zero-máquina)

11	0 = fechado / 1 = aberto	Sensor 2 (trabalha com sinal de entrada invertido): identifica a posição inicial (partida) do motor do depositador de pós
13	0 = aberto / 1 = fechado	Sensor 3: identifica a posição final (fim-de-curso) do motor do depositador de pós

Na Figura 58 tem-se a placa de hardware desenvolvida pelo LHW em parceria com o CIMJECT. No Anexo I encontra-se o projeto do circuito eletrônico e uma descrição detalhada da placa de hardware do Simulador SLS.

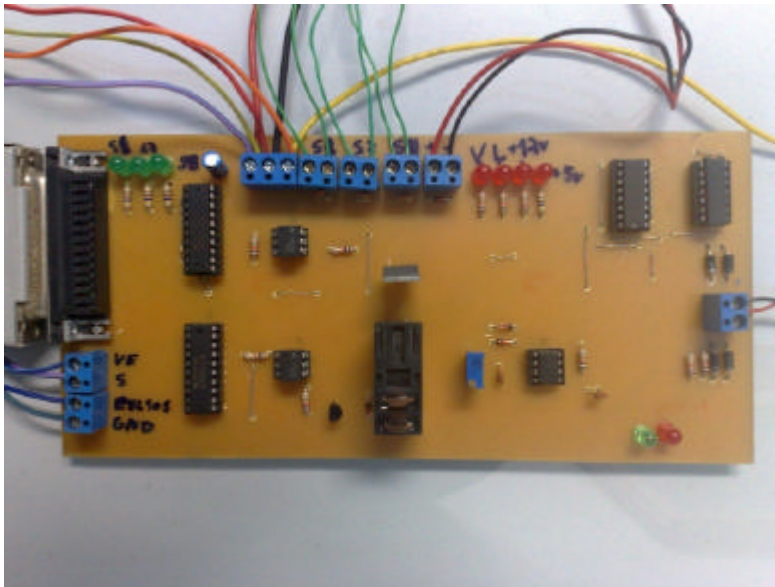


Figura 58 – Placa de Hardware para Simulador de Equipamento de RP por SLS

A Figura 59 mostra o Simulador de Equipamento de RP por SLS montado pelo CIMJECT destacando seus principais componentes.

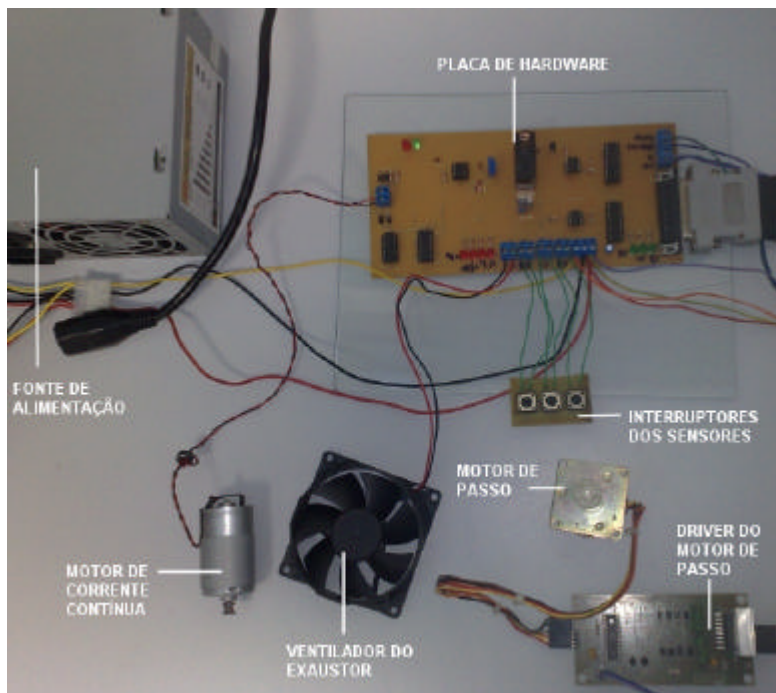


Figura 59 – Simulador de Equipamento de RP por SLS

4.2. INSPEÇÕES DO SOFTWARE

Durante as atividades de inspeção para verificação e validação de software foram registrados: o tempo total de implementação, o total de linhas de código escritas, a quantidade de erros ocorridos durante a implementação. Os resultados obtidos para quantidade de erros na implementação do software e do driver constam das Tabelas 8 e 9, com suas respectivas classificações segundo erros padrão indexados na Tabela 3. Nas Figuras 60 e 61 encontram-se os gráficos representativos dos erros por categoria na implementação do software e do driver, respectivamente. Tais dados podem ser utilizados para fins comparativos no desenvolvimento de novas versões do software, servindo também como importante instrumento no auxílio às atividades de gerenciamento do projeto.

Tabela 8 – Erros por categoria e subcategoria para o software

Índice	Erros por Categoria	Erros por Subcategoria					
10	Documentação	10.1	10.2				
Subtotal	19	7	12				
20	Síntaxe	20.1	20.2	20.3	20.4		
Subtotal	53	27	13	2	11		
30	Pacote	30.1	30.2	30.3			
Subtotal	5	0	5	0			
40	Associação	40.1	40.2	40.3	40.4		
Subtotal	38	11	12	10	5		
50	Interface	50.1	50.2	50.3			
Subtotal	90	31	22	37			
60	Verificação	60.1	60.2				
Subtotal	127	127	0				
70	Dados	70.1	70.2				
Subtotal	9	0	9				
80	Funções	80.1	80.2	80.3	80.4	80.5	80.6
Subtotal	374	52	0	115	5	51	151
90	Sistema	90.1	90.2	90.3			
Subtotal	17	17	0	0			
100	Ambiente	100.1	100.2	100.3	100.4		
Subtotal	189	18	122	49	0		
Total	921						

Tabela 9 – Erros por categoria e subcategoria para o driver

Índice	Erros por Categoria	Erros por Subcategoria					
10	Documentação	10.1	10.2				
Subtotal	12	5	7				
20	Sintaxe	20.1	20.2	20.3	20.4		
Subtotal	25	20	4	1	0		
30	Pacote	30.1	30.2	30.3			
Subtotal	0	0	0	0			
40	Associação	40.1	40.2	40.3	40.4		
Subtotal	10	1	0	7	2		
50	Interface	50.1	50.2	50.3			
Subtotal	0	0	0	0			
60	Verificação	60.1	60.2				
Subtotal	3	3	0				
70	Dados	70.1	70.2				
Subtotal	4	0	4				
80	Funções	80.1	80.2	80.3	80.4	80.5	80.6
Subtotal	48	6	0	7	0	11	24
90	Sistema	90.1	90.2	90.3			
Subtotal	0	0	0	0			
100	Ambiente	100.1	100.2	100.3	100.4		
Subtotal	11	0	11	0	0		
Total	113						

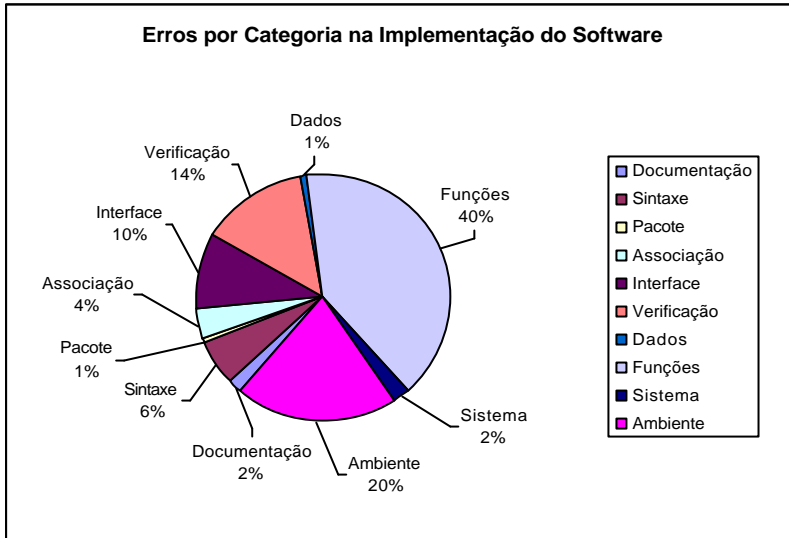


Figura 60 – Erros por categoria na fase de implementação do software

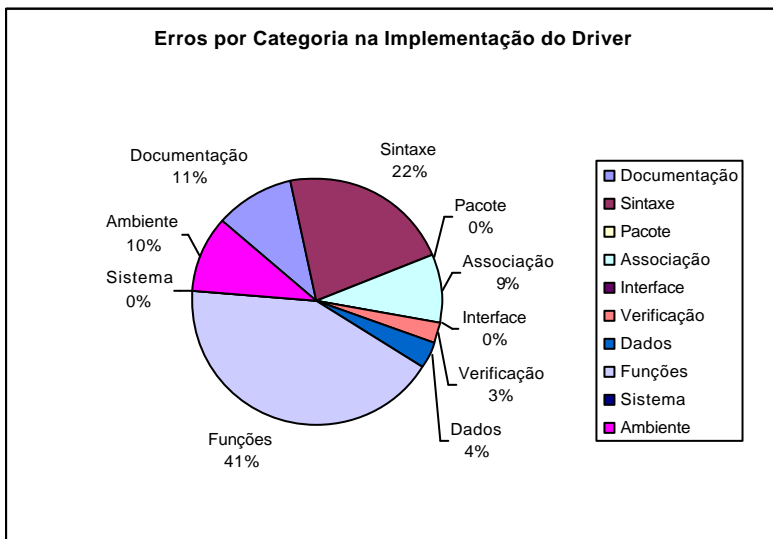


Figura 61 – Erros por categoria na fase de implementação do driver

A relação entre Linhas de Código (*lines of code*, ou LOC) e tempo de implementação pode ser considerada uma medida da velocidade de desenvolvimento do código-fonte. Pode-se observar pela Tabela 10 que a velocidade de desenvolvimento do software frente ao driver foi 37% maior.

Tabela 10 – Linhas de Código (LOC) versus Tempo de Implementação

	Linhas de Código (LOC)	Tempo de Implementação (h)	LOC/hora
Software	4.422	1.220	3,62
Driver	543	240	2,26

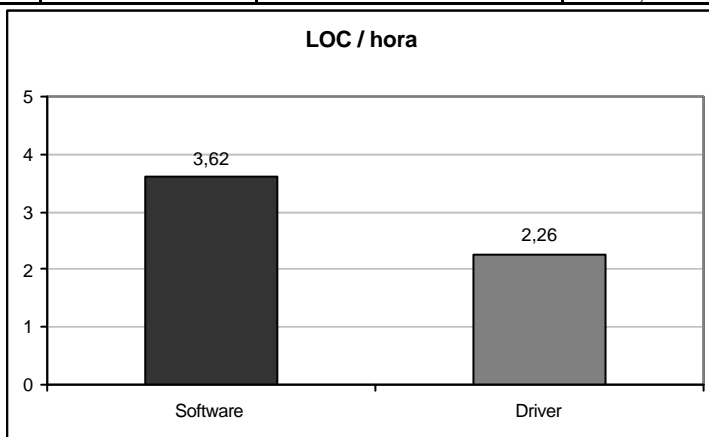


Figura 62 – Linhas de Código (LOC) por hora na fase de implementação

A relação entre quantidade de erros e LOC pode ser considerada a uma medida da densidade de erros ocorridos no desenvolvimento do código-fonte de software e driver. Na análise dos dados da Tabela 11, verificou-se uma igualdade numérica no resultado desta métrica.

Tabela 11 – Quantidade de Erros versus Linhas de Código (LOC)

	Linhas de Código (LOC)	Quantidade de Erros	Erros/LOC
Software	4.422	921	0,21
Driver	543	113	0,21

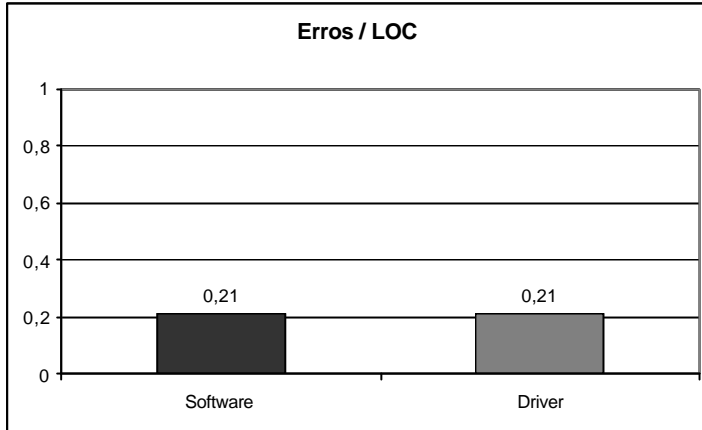


Figura 63 – Erros por Linhas de Código (LOC) na fase de implementação

No comparativo entre a quantidade de erros por hora na implementação do software e do driver, pode-se concluir da Tabela 12 que a programação do software apresentou uma quantidade de erros por hora 38% maior. A Figura 64 ilustra a quantidade de erros por hora para o software e o driver.

Tabela 12 – Quantidade de Erros versus Tempo de Implementação

	Quantidade de Erros	Tempo de Implementação (h)	Erros/hora
Software	921	1.220	0,76
Driver	113	240	0,47

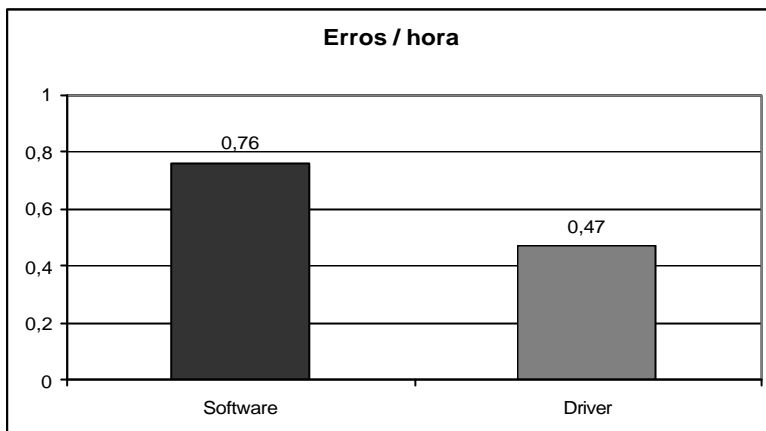


Figura 64 – Erros por hora na fase de implementação

4.3. TESTES DO SOFTWARE

Concluída a implementação do software, deu-se início aos testes de software que consistiram em testes de sistema e testes de integração. Nos testes de sistema foram testados os requisitos funcionais que não incluíam a fabricação por SLS e uso de arquivos de marcação criados no software RP³, tais como: criação, abertura e fechamento de um Arquivo de Projeto de Fabricação; criação, edição, visualização de componentes (camadas e materiais) no repositório do software; inserção e exclusão de componentes no Projeto de Fabricação; configurações de salvamento automático de arquivo; conectividade e funcionamento da webcam.

Nos testes de integração foram testados os requisitos funcionais relativos à fabricação por SLS e uso de arquivos de marcação criados no software RP³, os quais compreendem: as configurações gerais de fabricação e do Sistema SLS, o uso do controle de sistema, a fabricação de uma única camada e a fabricação de uma sequência de camadas com o uso do software.

Nenhum dos testes de software apresentou erros, confirmando que todos os requisitos funcionais e não funcionais definidos na Especificação de Requisitos foram atendidos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As limitações apresentadas pelo software anteriormente em uso no sistema-protótipo SLS do CIMJECT e a possibilidade de parceria com a UTFPR no desenvolvimento de tecnologia nacional em RP foram os principais motivadores para o desenvolvimento deste trabalho.

Apesar da temporária indisponibilidade do sistema laser para testes com o novo software, as melhorias introduzidas garantem a variação nos parâmetros do processo diretamente no ambiente de fabricação, tais como potência do laser e velocidade do feixe de laser.

No comparativo com as características apresentadas pelo software Alpha (Tabela 2), evidenciaram-se as vantagens do novo software desenvolvido, que além de suplantá-lo em todos os critérios, também aceita arquivos nos formatos *bitmap* e STL como arquivos de entrada. Como única limitação, verificou-se a impossibilidade de fabricação simultânea de peças.

Além disso, diante da facilidade de se definir e gerenciar projetos de fabricação com a nova metodologia adotada, o SLS Studio também contribui para racionalizar o processo de fabricação de modelos sólidos tridimensionais, permitindo o agrupamento de informações de processo (geometria do objeto tridimensional, dados de material, parâmetros do processo) antes dispersas.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de temas para trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos seguindo esta linha de pesquisa e desenvolvimento, têm-se:

- Expandir a capacidade do software para trabalhar com FGM e fatiamento adaptativo;
- Desenvolver drivers que permitam a integração do SLS Studio a outros equipamentos de prototipagem rápida;
- Implantar a funcionalidade de geração de relatórios de fabricação;
- Pesquisar novos materiais visando ampliação do repositório de materiais;

- Desenvolver um módulo de fatiamento de objetos tridimensionais para o SLS Studio;
- Desenvolver um módulo de simulação da fabricação para o SLS Studio que permita estimar custo e prazo na fabricação de peças por SLS;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEAL, V. E.; *Avaliação do uso de insertos obtidos por estereolitografia na moldagem de pós metálicos por injeção*; Dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. Março de 2002.

CERVERA, G. B. M., LOMBERA, G.; *Numerical Prediction of Temperature and Density Distributions in Selective Laser Sintering Processes*; Rapid Prototyping Journal – Volume 5, number 1; pp 21-26. MCB UNiversity Press, 1999.

CUSTOMPARTNET; *Disponível em:* <www.custompartnet.com>; Acesso em: 10 de julho de 2009.

DABBAS, F.; Sinterização seletiva a laser de compósitos poliamida/hidroxiapatita e polietileno/hidroxiapatita com gradientes funcionais aplicáveis em engenharia de tecidos; Dissertação (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Junho, 2006.

GIBSON, I., SHI, D.; *Material Properties and Fabrication Parameters in Selective Laser Sintering Process*; Rapid Prototyping Journal – Volume 3, number 4; pp 129-1362. MCB UNiversity Press, 1997.

HARDRO, P. J., WANG, J., STUCKER, B. E.; *Determining the parameter settings and capability of a rapid prototype process. Material Fabrication and Properties – Report #2*; Department of Mechanical Engineering, Swiss Federal Institute of Technology at Lausanne. Lausanne, Switzerland. November 1998.

HO, H.C.H., CHEUNG, W. L., GIBSON, I.; *Effects of Graphite Powder on the Laser Sintering Behaviour of Polycarbonate*; Rapid Prototyping Journal – Volume 8, number 4; pp 233-242. MCB UNiversity Press, 2002.

HOPKINSON, N., DICKENS, P.; *Rapid Prototyping for Direct Manufacture*; Rapid Prototyping Journal – Volume 7, number 4; pp 197-202. MCB UNiversity Press, 2001.

JACOBS, P.F.; *Rapid Prototyping and Manufacturing – Fundamentals of Stereolithography*; New York, NY, USA. RPA/ASME Press: 1992.

JACOBS, P.F.; *Stereolithography and others RP&M Technologies*; New York, NY, USA. RPA/ASME Press: 1996.

KULMAN, C.; Desenvolvimento de sistema-protótipo de sinterização seletiva a laser, visando a obtenção de componentes com gradientes funcionais; Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

KOSCIANSKI, A., Soares, M. S.; *Qualidade de Software*; Ed. Novatec, 2006.

MOLINARI, L.; Testes de Software - Produzindo Sistemas Melhores e Mais Confiáveis, 3a Edição; Ed. Érica, 2006.

MOLINARI, L.; Gerência de Configuração - Técnicas e Práticas no Desenvolvimento do Software; Ed. Visual Books, 2007.

NARKIS, M., ROSENZWEIG, N.; *Polymer Powder Technology*; John Wiley & Sons, England, 1995.

NBR: 10520:2002 – *Apresentação de Citações em Documentos*; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

NONEMACHER, M. L.; *Comparação e Avaliação entre o Processo RUP de Desenvolvimento de Software e a Metodologia Extreme Programming*; Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

KRUTH, J.P., MERCELIS P., VAN VAERENBERGH, J., FROYEN L., ROMBOUTS M.; *Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting*; Rapid Prototyping Journal, volume 11, number 1, Emerald Group Publishing Limited, 2005.

KULKARNI, P., MARSAN, A., DUTTA, D.; *A Review of Process Planning Techniques in Layered Manufacturing*; Rapid Prototyping Journal – Volume 6, number 1; pp 18-35. MCB UNiversity Press, 2000.

KULMAN, C.; Desenvolvimento de sistema-protótipo de sinterização seletiva a laser, visando a obtenção de componentes com gradientes funcionais; Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

PATIL, L., DUTTA, D., BHATT, A. D., JURRENS, K., LYONS, K., PRATT, M. J., SRIRAM, R. D.; *A Proposed Standards-based Approach for Representing Heterogeneous Objects for Layered Manufacturing*; Rapid Prototyping Journal – Volume 8, number 3; pp 134-146. MCB UNiversity Press, 2002.

PRESSMAN, R. S.; *Engenharia de Software*; Ed. McGraw Hill, 2002.

ROGER COMM; *Disponível em: <www.rogercom.com>*; Acesso em: 31 de março de 2009.

SABINO NETTO, A. C.; Proposta de sistemática para avaliação de soluções de projeto de componentes moldados por injeção auxiliada por protótipos físicos; Florianópolis, 2003. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

SANTOS, R. P.; *Elementos para uma abordagem sociotécnica do desenvolvimento de software com Extreme Programming*; Scientia - Interdisciplinary Studies in Computer Science, vol.19, n.2, July-December, 2008.

SOMMERVILLE, I.; *Engenharia de Software*, 8a edição; São Paulo: Pearson Addison-Wesley, 2007.

THUMMLER, F., OBERACKER, R.; *Introduction to Powder Metallurgy*; London: The Institute of Materials, 1996.

VOLPATO, N., AHRENS, C. H., FERREIRA, C. V., PETRUSH, G., CARVALHO, J., SANTOS, J. R. L., SILVA, J. V. L.; *Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações*; São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2007.

VOLPATO, N.; *Time-saving and accuracy issues in rapid tooling by selective laser sintering*; Tese de Doutorado. Escola de Engenharia Mecânica. Universidade de Leeds, Leeds, UK. Julho de 2001.

VOLPATO, N., MANCZAK, T., OLIVEIRA, J. H. S. A.; MENEZES, R. M.; BONACIN, M. V.; *Avanços em um aplicativo para o planejamento de processo de prototipagem rápida*; In: CONEM, 2006, Recife-PE. Anais do IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2006. v. 1. p. 1-10.

VOLPATO, N., OLIVEIRA, J. H. S. A., SOUZA, T. R.; *A Process Planning Applicative for Rapid Prototyping Technology*; In: 18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005, Ouro Preto. Proceedings of COBEM 2005, 2005. v. 1.

WANG, X.; *Calibration of shrinkage and beam offset in SLS process*; Rapid Prototyping Journal – Volume 5, number 3; pp 129-133. MCB UNiversity Press, 1999.

WOHLERS, T.; *Future Potential of Rapid Prototyping and Manufacturing Around the World*; Rapid Prototyping Journal – Volume 1, number 1; pp 4-10. MCB UNiversity Press, 1995.

YAN, C. Z., SHI, Y. S., YANG, J. S., LIU, J. H.; *Preparation and Selective Laser Sintering of Nylon Coated Metal Powders for the Indirect SLS Process*; Rapid Prototyping Journal, volume 15, number 5, Emerald Group Publishing Limited, 2009.

APÊNDICE A – RELATÓRIO DE VISITA TÉCNICA

Em visita técnica ao NUFER (Núcleo de Ferramental) da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), realizada em 19/10/2007, o Prof. Neri Volpato, Ph.D., e os alunos do curso de Mecatrônica da UTFPR (e bolsistas do *Funtef* do Projeto RP³), Ricardo Casagrande Faust e Felipe da Silva Ribeiro, realizaram uma apresentação detalhada do módulo do software RP³ para controle do processo SLS.

Segue-se um breve resumo dos tópicos abordados durante a reunião:

- Arquivos STL (em formato texto ou binário) são alimentados diretamente no software RP³;
- Software gera camadas em arquivo único ou, opcionalmente, em múltiplos arquivos;
- Possibilidade de importar arquivos de cada camada e alterar os parâmetros (tais como potência do laser, estratégia de varredura) de cada camada;
- RP³ gera padrão intermediário de arquivo de fatiamento, permitindo o uso de protocolos permitindo o uso do software em diferentes máquinas de prototipagem;
- RP³ não possui função de simulação da fabricação;
- Estudos estão sendo feitos em fatiamento adaptativo (geração de camadas com diferentes espessuras) para tecnologia FDM na máquina-protótipo do NUFER;
- Uso de fatiamento adaptativo para tecnologia SLS não foi testado.

Pode-se concluir que:

- Possibilidade de variação das estratégias de varredura para camadas ao longo da fabricação da peça configura-se uma proposta interessante de investigação para uma dissertação de mestrado;
- Uso do fatiamento adaptativo e FGM, em combinação com a variação da potência do laser, configuram-se uma proposta inovadora própria para uma tese de doutorado.

APÊNDICE B – ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SOFTWARE SLS STUDIO

HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES

Versão	Descrição
4.0	Modificações gerais no documento
3.1	Modificação do caso de uso Configurar parâmetros de fabricação
3.0	Reestruturação do documento. Avaliação dos requisitos anteriores e criação de novos visando adequação às novas funcionalidades desejadas.
2.2	Modificação na seção Interface e criação de seus casos de uso.
2.1	Modificação do caso de uso Importar Material
2.0	Modificações gerais no documento
1.2	Modificação caso de uso Fabricar Objeto
1.1	Modificação do caso de uso Criar Projeto de Fabricação
1.0	Estruturação geral do documento

B.1 – INTRODUÇÃO

Este documento especifica os requisitos do software SLS Studio, fornecendo as informações necessárias para o projeto e implementação, assim como para a elaboração dos testes de verificação e validação do software.

B.1.1 – CONVENÇÕES, TERMOS E ABREVIACÕES

A correta interpretação deste documento exige o conhecimento de algumas convenções e termos específicos. Por convenção, a referência aos requisitos é feita através do nome da subseção onde eles estão descritos, seguidos do identificador do requisito, de acordo com a especificação a seguir:

[nome da subseção. identificador do requisito]

Por exemplo, o requisito funcional “[RF001] Criar camada” deve estar descrito em uma subseção chamada “Criar camada”, em um bloco numerado, identificado como [RF001]. Já o requisito não-funcional “[RNF001] Usabilidade” deve estar descrito na seção de requisitos não-funcionais “Usabilidade”, em um bloco numerado, identificado como [RNF001].

Os requisitos devem ser nomeados com um identificador único. A numeração inicia com o identificador [RF001] ou [RNF001] e prossegue sendo incrementada à medida que forem surgindo novos requisitos.

B.1.2 – PRIORIDADES DOS REQUISITOS

Para estabelecer a prioridade dos requisitos, nas seções B.3 e B.4, foram adotadas as denominações “essencial”, “importante” e “desejável”.

Essencial é o requisito sem o qual o sistema não entra em funcionamento. Requisitos essenciais são requisitos imprescindíveis, que têm que ser implementados impreterivelmente.

Importante é o requisito sem o qual o sistema entra em funcionamento, mas de forma não satisfatória. Requisitos importantes devem ser implementados, mas, se não forem, o sistema poderá ser implantado e usado mesmo assim.

Desejável é o requisito que não compromete as funcionalidades básicas do sistema, isto é, o sistema pode funcionar de forma satisfatória sem ele. Requisitos desejáveis podem ser implementados em versões

posteriores do sistema, caso não haja tempo hábil para implementá-los na versão que está sendo especificada.

B.2 – DESCRIÇÃO GERAL DO SOFTWARE

O sistema SLS Studio é um software para operação de um equipamento de prototipagem rápida por sinterização seletiva a laser e racionaliza o processo de fabricação de modelos sólidos tridimensionais.

Utilizando o software, o operador do equipamento de prototipagem rápida poderá criar um projeto de fabricação fazendo uso de uma metodologia que automatiza o processo. Ele poderá cadastrar novas geometrias de camadas ou criar objetos a partir de camadas já existentes; alterar, remover e consultar camadas e objetos já criados; selecionar material de trabalho etc.

Além disso, tais projetos de fabricação podem ser exportados do software e ainda podem ser gerando relatórios no formato de um documento texto ou um arquivo PDF para serem visualizados com auxílio de outros softwares.

O software também poderá ser capaz de armazenar e gerenciar um repositório de dados contendo modelos de geometrias de camada, materiais, parâmetros e relatórios de fabricação.

B.3 – REQUISITOS FUNCIONAIS

[RF001]	Criar Projeto de Fabricação
Descrição	permite que o usuário crie um novo projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	nenhuma
Saídas / Pós-condição	um novo projeto de fabricação criado
Prioridade	essencial

[RF002]	Abrir Projeto de Fabricação
Descrição	permite que o usuário abra um projeto de fabricação previamente salvo
Entradas / Pré-condições	um projeto de fabricação previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um projeto de fabricação aberto
Prioridade	essencial

[RF003]	Editar Projeto de Fabricação
Descrição	permite que o usuário altere os dados de um projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	um projeto de fabricação previamente criado ou aberto
Saídas / Pós-condição	um projeto de fabricação criado ou aberto alterado
Prioridade	essencial

[RF004]	Salvar Projeto de Fabricação
Descrição	permite que o usuário salve um projeto de fabricação previamente criado ou aberto
Entradas / Pré-condições	um projeto de fabricação previamente criado ou aberto
Saídas / Pós-condição	um projeto de fabricação salvo
Prioridade	essencial

[RF005]	Criar Objeto
Descrição	permite que o usuário crie um novo objeto no repositório de objetos
Entradas / Pré-condições	nome do objeto
Saídas / Pós-condição	um objeto criado no repositório de objetos
Prioridade	desejável

[RF006]	Editar Objetos
Descrição	permite que o usuário altere um objeto no repositório de objetos
Entradas / Pré-condições	um objeto previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um objeto alterado
Prioridade	desejável

[RF007]	Apagar Objeto
Descrição	permite que o usuário apague um objeto do repositório de objetos
Entradas / Pré-condições	um objeto previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um objeto excluído do repositório de objetos
Prioridade	desejável

[RF008]	Visualizar Objetos
Descrição	permite que o usuário visualize um objeto do repositório de objetos
Entradas / Pré-condições	um objeto previamente salvo
Saídas / Pós-condição	nenhuma
Prioridade	desejável

[RF009]	Inserir Objeto
Descrição	permite que o usuário insira um objeto no projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	um objeto previamente salvo

Saídas / Pós-condição	um objeto inserido no projeto de fabricação
Prioridade	desejável

[RF010]	Excluir Objeto
Descrição	permite que o usuário exclua um objeto do projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	um objeto previamente inserido no projeto de fabricação
Saídas / Pós-condição	um objeto excluído do projeto de fabricação
Prioridade	desejável

[RF011]	Salvar Objeto
Descrição	permite que o usuário salve um objeto no repositório de objetos
Entradas / Pré-condições	um objeto previamente criado
Saídas / Pós-condição	um objeto salvo no repositório de objetos
Prioridade	desejável

[RF012]	Criar Camada
Descrição	permite que o usuário crie uma camada no repositório de camadas
Entradas / Pré-condições	nome da camada; espessura da camada; sentido da trajetória de marcação; direção da trajetória de marcação
Saídas / Pós-condição	uma nova camada criada
Prioridade	essencial

[RF013]	Editar Camada
Descrição	permite que o usuário altere uma camada no repositório de camadas
Entradas / Pré-condições	uma camada previamente salva
Saídas / Pós-condição	uma camada alterada
Prioridade	importante

[RF014]	Apagar Camada
Descrição	permite que o usuário apague uma camada do repositório de camadas
Entradas / Pré-condições	uma camada previamente salva
Saídas / Pós-condição	uma camada excluída do repositório de camadas
Prioridade	essencial

[RF015]	Visualizar Camadas
Descrição	permite que o usuário visualize camadas existentes no repositório de camadas
Entradas / Pré-condições	uma camada previamente salva
Saídas / Pós-condição	nenhuma
Prioridade	essencial

[RF016]	Inserir Camada
Descrição	permite que o usuário insira uma camada no projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	uma camada previamente salva
Saídas / Pós-condição	uma camada inserida no projeto de fabricação
Prioridade	essencial

[RF017]	Excluir Camada
Descrição	permite que o usuário exclua uma camada do projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	uma camada previamente inserida no projeto de fabricação
Saídas / Pós-condição	uma camada excluída do projeto de fabricação
Prioridade	essencial

[RF018]	Salvar Camada
Descrição	permite que o usuário salve uma camada no repositório de camadas
Entradas / Pré-condições	uma camada criada
Saídas / Pós-condição	uma camada salva no repositório de camadas
Prioridade	essencial

[RF019]	Criar Material
Descrição	permite que o usuário crie um material no repositório de materiais
Entradas / Pré-condições	nome do material; granulometria; densidade de energia; potência do laser; velocidade do feixe de laser; temperatura da plataforma; temperatura da câmara
Saídas / Pós-condição	um material criado no repositório de camadas
Prioridade	essencial

[RF020]	Editar Materiais
Descrição	permite que o usuário edite um material no repositório de materiais
Entradas / Pré-condições	um material previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um material alterado no repositório de materiais
Prioridade	importante

[RF021]	Visualizar Materiais
Descrição	permite que o usuário visualize um material no repositório de materiais
Entradas / Pré-condições	um material previamente salvo
Saídas / Pós-condição	nenhuma
Prioridade	essencial

[RF022]	Apagar Material
Descrição	permite que o usuário exclua um material do repositório de materiais
Entradas / Pré-condições	um material previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um material excluído do repositório de materiais
Prioridade	essencial

[RF023]	Salvar Material
Descrição	permite que o usuário salve um material no repositório de materiais
Entradas / Pré-condições	um material previamente criado
Saídas / Pós-condição	um material salvo no repositório de materiais
Prioridade	essencial

[RF024]	Excluir Material
Descrição	permite que o usuário exclua um material do projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	um material previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um material excluído do projeto de fabricação
Prioridade	essencial

[RF025]	Inserir Material
Descrição	permite que o usuário insira um material no projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	uma material previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um material inserido no projeto de fabricação
Prioridade	essencial

[RF026]	Ordenar camadas
Descrição	permite que o usuário altere a posição de uma camada no projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	uma camada previamente inserida no projeto de fabricação
Saídas / Pós-condição	uma camada reposicionada no projeto de fabricação
Prioridade	desejável

[RF027]	Agrupar Camadas
Descrição	permite que o usuário agrupe camadas no projeto de fabricação ou no repositório de camadas
Entradas / Pré-condições	mais de uma camada
Saídas / Pós-condição	um objeto criado no projeto de fabricação ou no repositório de objetos
Prioridade	desejável

[RF028]	Duplicar Camada
Descrição	permite que o usuário duplique uma camada no projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	uma camada previamente salva
Saídas / Pós-condição	uma camada duplicada no projeto de fabricação
Prioridade	desejável

[RF029]	Iniciar Fabricação de Objeto
Descrição	permite que o usuário fabrique um objeto no equipamento de prototipagem rápida
Entradas / Pré-condições	um projeto de fabricação previamente criado ou salvo
Saídas / Pós-condição	um objeto fabricado pelo equipamento de prototipagem rápida
Prioridade	essencial

[RF030]	Cancelar Fabricação de Objeto
Descrição	permite que o usuário cancele a fabricação de um objeto no equipamento de prototipagem rápida
Entradas / Pré-condições	fabricação de um objeto em curso
Saídas / Pós-condição	fabricação de um objeto cancelada
Prioridade	essencial

[RF031]	Configurar Parâmetros de Fabricação
Descrição	permite que o usuário defina parâmetros do processo de fabricação
Entradas / Pré-condições	um (ou mais) parâmetro(s) de fabricação (espessura mínima de camada; espessura máxima de camada)
Saídas / Pós-condição	um (ou mais) parâmetro(s) alterado(s)
Prioridade	essencial

[RF032]	Configurar Parâmetros de Sistema
Descrição	permite que o usuário defina parâmetros do equipamento de prototipagem rápida
Entradas / Pré-condições	um (ou mais) parâmetro(s) do equipamento de prototipagem rápida (curso máximo da plataforma; relação de transmissão da plataforma; tempo de acionamento das lâmpadas; tempo de acionamento do exaustor)
Saídas / Pós-condição	um (ou mais) parâmetro(s) do equipamento de prototipagem rápida alterado(s)
Prioridade	essencial

[RF033]	Criar Relatório
Descrição	permite que o usuário crie um relatório no repositório de relatórios
Entradas / Pré-condições	categoria de relatório selecionada
Saídas / Pós-condição	um relatório criado
Prioridade	desejável

[RF034]	Editar Relatórios
Descrição	permite que o usuário edite um relatório no repositório de relatórios
Entradas / Pré-condições	um relatório previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um relatório alterado
Prioridade	desejável

[RF035]	Visualizar Relatório
Descrição	permite que o usuário visualize um relatório do repositório de relatórios
Entradas / Pré-condições	um relatório previamente salvo
Saídas / Pós-condição	nenhuma
Prioridade	desejável

[RF036]	Salvar Relatório
Descrição	permite que o usuário salve um relatório no repositório de relatórios
Entradas / Pré-condições	um relatório previamente criado
Saídas / Pós-condição	um relatório salvo
Prioridade	desejável

[RF037]	Apagar Relatório
Descrição	permite que o usuário exclua um relatório do repositório de relatórios
Entradas / Pré-condições	um relatório previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um relatório excluído do repositório de relatórios

Prioridade	desejável
-------------------	-----------

[RF038]	Inserir Relatório
Descrição	permite que o usuário insira um relatório no projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	um relatório previamente salvo
Saídas / Pós-condição	um relatório inserido no projeto de fabricação
Prioridade	desejável

[RF039]	Excluir Relatório
Descrição	permite que o usuário exclua um relatório do projeto de fabricação
Entradas / Pré-condições	um relatório previamente inserido no projeto de fabricação
Saídas / Pós-condição	um relatório excluído do projeto de fabricação
Prioridade	desejável

B.4 – REQUISITOS NÃO-FUNCIONAIS

[RNF001]	Desempenho
Descrição	deve funcionar de maneira estável e eficiente
Entradas / Pré-condições	funcionamento ininterrupto durante sua execução; baixo tempo de processamento de informações
Saídas / Pós-condição	sem fechamento inesperado; tempo de processamento inferior a 10 segundos
Prioridade	essencial

[RNF002]	Usabilidade
Descrição	deve apresentar interface com recursos visuais
Entradas / Pré-condições	recursos visuais associados à execução de tarefas; recursos visuais associados à exibição de informações

Saídas / Pós-condição	barra de menus com opções para execução de tarefas específicas; barra de ferramentas com botões para execução de tarefas específicas; área de visualização de imagens
Prioridade	essencial

[RNF003]	Extensibilidade
Descrição	deve ser programado em estrutura modular permitindo implementação de expansões
Entradas / Pré-condições	programado em linguagem baseada ou orientada a objeto
Saídas / Pós-condição	software extensível
Prioridade	importante

[RNF004]	Compatibilidade
Descrição	deve apresentar compatibilidade com diversos softwares de planejamento do processo e equipamentos de prototipagem rápida por SLS
Entradas / Pré-condições	arquivo de marcação no padrão Winmark; driver lógico criado para o equipamento de prototipagem rápida por SLS
Saídas / Pós-condição	processamento do arquivo de marcação no padrão Winmark; driver lógico permitir a operação do equipamento de prototipagem rápida por SLS
Prioridade	essencial

[RNF005]	Escalabilidade
Descrição	deve ser escalável (executável em diferentes sistemas operacionais)
Entradas / Pré-condições	programado em linguagem escalável
Saídas / Pós-	executável em qualquer plataforma

condição	(sistema operacional)
Prioridade	desejável

[RNF006]	Hardware
Descrição	deve ser instalado em microcomputador com porta paralela
Entradas / Pré-condições	livre acesso à porta paralela
Saídas / Pós-condição	capaz de operar um equipamento de prototipagem rápida por SLS
Prioridade	essencial

[RNF007]	Segurança
Descrição	deve permitir a visualização da câmara de fabricação com auxílio de câmara de vídeo
Entradas / Pré-condições	câmera de vídeo instalada
Saídas / Pós-condição	capaz de monitorar visualmente a câmara de fabricação
Prioridade	importante

B.5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Furlan, J. D. Modelagem de Objetos através da UML. São Paulo, Makron Books, 1998.

Kruchten, P. The Rational Unified Process – An introduction. Addison-Wesley, 1998.

APÊNDICE C – ESTRUTURA INTERNA DOS ARQUIVOS DO SLS STUDIO

Arquivo	Seção	Chave	Descrição
Projeto	project	name	nome do projeto
		author	autor do projeto
		path	atalho para o arquivo de projeto
		layer.total	total de camadas no projeto
		material.total	total de materiais no projeto
		current.layer	camada selecionada no projeto
		current.material	material selecionado no projeto
		layer.positions	ordem das camadas no projeto
		report.positions	ordem das relatórios no projeto
	layer	id	identificador da camada
		name	nome da camada
		thickness	espessura da camada

Projeto	material	name	nome do material
		id	identificador do material
		granulometry.min	granulometria mínima
		granulometry.max	granulometria máxima
		energy.density	densidade de energia
		laser.power	potência do laser
		laser.beam.speed	velocidade do feixe de laser
		platform.temperature	temperatura da plataforma
Camada	layer	name	nome da camada
		path	atalho para o arquivo de camada
		thickness	espessura da camada
Material	material	name	nome do material
		id	identificador do material
		granulometry.min	granulometria mínima
		granulometry.max	granulometria máxima
		energy.density	densidade de energia
		laser.power	potência do laser
		laser.beam.speed	velocidade do feixe de laser
platform.temperature	temperatura da plataforma		

Configuração	general	project.new	configuração da abertura de novo arquivo ao inicializar o software
		customization.allow	configuração da personalização do ambiente de trabalho
		mode.manual	configuração do modo de operação manual da fabricação
		notes.show	configuração da exibição de notificações durante a fabricação
		layer.thickness.status	configuração da limitação da espessura da camada de fabricação
		layer.thickness.min	espessura mínima da camada de fabricação
		layer.thickness.max	espessura máxima da camada de fabricação
	slssystem	platform.displacement.max	curso máximo de deslocamento da plataforma de fabricação
		steps.per.milimeters	relação de transmissão da plataforma em passos por milímetro

		lamp.time	tempo de acionamento das lâmpadas de aquecimento
		cooler.time	tempo de acionamento do ventilador do exaustor
Configuração	path	projects	atalho para arquivos de projeto de fabricação
		layers	atalho para arquivos de camada
		mkhfiles	atalho para arquivos de marcação
		materials	atalho para arquivos de material
		reports	atalho para arquivos de relatório
	saving	status	configura a opção de auto-salvamento de arquivos de projeto de fabricação
		time	tempo decorrido entre cada auto-salvamento
		project.ext	extensão
		report.ext	

APÊNDICE D – MÓDULOS E FORMULÁRIOS DO SLS STUDIO

Módulo / Formulário	Descrição	LOC
modGlobalVars.pas	Módulo que define as variáveis globais e estrutura de tipos de dados criados.	209
modMainFunctions.pas	Módulo que define as funções e procedimentos para implementação da interface do software.	932
modIOFunctions.pas	Módulo que define as funções e procedimentos para controle de um equipamento de prototipagem rápida. Constitui-se no driver lógico do software.	543
frmMDIMain.frm	Formulário principal do software, contendo menús e barras de ferramentas	316
frmBaseProject.frm	Formulário da interface do projeto de fabricação	729
frmObjectInsertLayer.frm	Formulário para inserção de camada no projeto de fabricação	158
frmObjectNewLayer.frm	Formulário para criação de nova camada no repositório de camadas	242
frmObjectSelectLayer.frm	Formulário para seleção para edição de camadas do repositório de camadas	197
frmObjectViewLayer.frm	Formulário para visualização de camadas no repositório de camadas	164
frmObjectZoomLayer.frm	Formulário para ampliação da camada selecionada no projeto de fabricação	14
frmPathNavigator.frm	Formulário do Navegador de Pastas do software	47
frmMaterialEdit.frm	Formulário para edição de material no repositório de materiais	58

frmMaterialInsert.frm	Formulário para inserção de material no projeto de fabricação	51
frmMaterialNew.frm	Formulário para criação de novo material no repositório de materiais	58
frmMaterialSelect.frm	Formulário para seleção para edição de material do repositório de materiais	93
frmMaterialView.frm	Formulário para visualização de materiais no repositório de materiais	64
frmToolsOptions.frm	Formulário de opções do software	302
frmToolsSystemControl.frm	Formulário da interface do controle de sistema	82
frmSplash.frm	Formulário de inicialização do software	29
frmAbout.frm	Formulário das informações sobre o software	134
Total		4.422

APÊNDICE E – MANUAL DE PROGRAMAÇÃO DE DRIVERS DO SLS STUDIO

INTRODUÇÃO

Para que o SLS Studio possa operar diferentes Equipamentos de Prototipagem Rápida é necessário o desenvolvimento de um driver (um módulo *ActiveX* do *Visual Basic*) específico que permita o envio e recebimento de sinais via porta paralela do microcomputador de controle do equipamento.

Este manual objetiva descrever as principais funções usadas para a programação deste módulo.

FUNÇÕES PARA PROGRAMAÇÃO DE DRIVERS PARA O SLS STUDIO

ParallelPort_Reset()

Procedimento para inicializar a placa (inicializar o estado de todos os pinos da porta paralela).

ParallelPort_Set(InputSignal As ParallelPort)

Procedimento para enviar os dados de uma variável tipo ParallelPort para a porta paralela.

ParallelPort_Get() As ParallelPort

Função que retorna uma variável do tipo ParallelPort com o estado atual da porta paralela.

Sensor_Get() As Sensor

Função que retorna uma variável tipo Sensor que contém o estado atual dos sensores.

Sensor_State1()

Procedimento que retorna o estado do sensor 1.

Sensor_State2()

Procedimento que retorna o estado do sensor 2.

Sensor_State3()

Procedimento que retorna o estado do sensor 3.

Recoater_Move(RecoaterDirection As Integer)

Procedimento para acionar os motores do depositador de pós.

Recoater_Forward()

Procedimento para avançar automaticamente o depositador de pós.

Recoater_Rewind()

Procedimento para retroceder automaticamente o depositador de pós.

Recoater_Stop()

Procedimento para parar o depositador de pós.

Recoater_Activate()

Procedimento para deslocar o depositador de pós automaticamente entre os sensores de partida e fim-de-curso.

Recoater_Reset()

Procedimento para posicionar o depositador de pós em sua posição inicial.

Platform_Move(PlatformDirection As Integer, PlatformSpeed As Integer, PlatformPulse As Integer)

Procedimento para movimentar a plataforma ao longo da direção vertical.

Platform_Move_Up()

Procedimento para mover a plataforma de fabricação para cima em alta velocidade.

Platform_Move_Down()

Procedimento para mover a plataforma de fabricação para baixo em baixa velocidade.

Platform_Stop()

Procedimento para parar o motor da plataforma.

Platform_Reset()

Procedimento para posicionar a plataforma em sua posição inicial.

Lamp_Turn_On()

Procedimento para ligar as lâmpadas de aquecimento.

Lamp_Turn_Off()

Procedimento para desligar as lâmpadas de aquecimento.

Cooler_Turn_On()

Procedimento para ligar o ventialdor do exaustor.

Cooler_Turn_Off()

Procedimento para desligar o ventialdor do exaustor.

Time_Delay(PauseTime As Integer)

Procedimento para parar o processo por um tempo determinado.

**ANEXO I – MANUAL DA PLACA DE HARDWARE DO
SIMULADOR SLS**



Universidade Federal de Santa Catarina
CTC – Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Mecânica
LHW/GRUCON – Laboratório de Hardware

DRIVER SLS
Projeto do circuito eletrônico do simulador de sistema SLS

Lucas Goulart De Carli
Graduando em Eng. Elétrica

Florianópolis, julho de 2009

1. OBJETIVOS

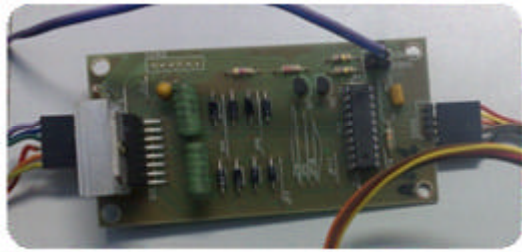
- Listar os nomes dos componentes da placa impressa.
- Fornecer especificações sobre as características elétricas do driver.
- Descrever os passos para a montagem do circuito eletrônico.

2. AS PLACAS

A placa é composta por dois circuitos independentes. O primeiro circuito consiste no driver SLS em si, enquanto que o segundo circuito é composto por um driver de motor de passo. Estes dois devem ser devidamente interligados. A placa SLS tem a finalidade de controlar motores, leds, relé e sensores pela porta paralela de um computador.



Placa SLS



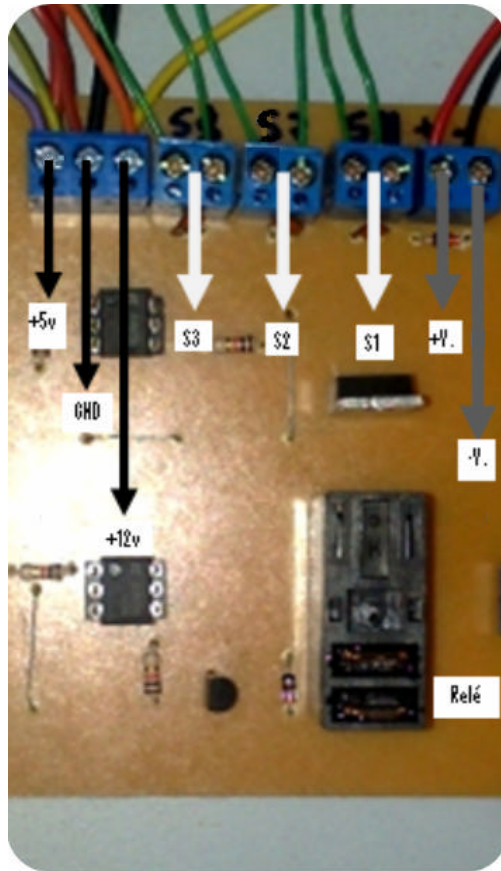
Driver do motor de passo

3. LISTA DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

Componentes	Observações	Quantidade
Resistor 470?	1/8 w	10
Resistor 1k?	1/8 w	10
Capacitores 10nF	Cerâmico	5
Capacitores 100nF	Cerâmico	5
Capacitores 10uF	eletrolítico 35v	1
LED	Vermelhos	7
LED	Verde	4
1n4001		4
1n4148		4
TIP41		1
BC548		1
NE555		1
74LS541		2
4n25		2
74LS04		1
L293B		1
conector fema db25		1
conector de parafuso 2 pinos		7
conector de parafuso 3 pinos		2
Soquetes 6 pinos		2
Soquetes 8 pinos		1

Soquetes 14 pinos		1
Soquetes 16 pinos		1
Soquetes 20 pinos		2

4. MANUAL DE MONTAGEM



Conectores da Placa SLS

Fonte de alimentação

Conectar os terminais +5v, +12v e GND do driver em alguma fonte de alimentação que possua as respectivas tensões.

Sensores

Para cada sensor há dois terminais, não havendo diferença entre os mesmos. Cada sensor envia um sinal ao computador quando os dois terminais entram em curto, sendo este sinal informado pela placa através de um led na cor verde. Existem no total três sensores.

Ventoinha

Há dois terminais para a ventoinha, notando que existe diferença entre os dois. Na figura estão identificados o positivo e o negativo, sendo “+V.” e “-V.”, respectivamente. Há um led indicando quando a ventoinha esta ligada. A placa suporta até 6 A de corrente e a tensão na ventoinha é de 12v.

Lâmpada

As lâmpadas são chaveadas por um relé, sendo que este e caracterizado pelos contatos diretamente em sua superfície exterior. Não há diferença entre os dois terminais exteriores. Para ligar uma lâmpada de 220v ligue o contato neutro desta na rede e o fase em um dos terminais do relé, o outro terminal deve fechar o circuito as lâmpadas. Há um led indicando quando a lâmpada esta ligada.



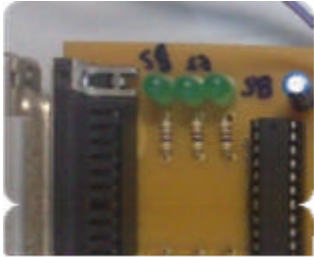
Leds indicadores vermelhos (da esquerda para direita)

1° LED: Ventoinha.

2º LED: Lâmpada.

3º LED: Fonte +12v (Aceso se +12v ativado)

4º LED: Fonte +5v (Aceso se +5v ativado)



Leds indicadores verdes (da esquerda para direita)

1º LED: Sensor 1.

2º LED: Sensor 2.

3º LED: Sensor 3.



Motor DC

Os terminais estão indicados na figura. Há um potenciômetro que controla a velocidade do motor. A corrente limite no motor para o CI L293D é de 0,6 A e a tensão no motor é de 12v.



Motor de passo

As conexões aqui são entre os dois drivers, o SLS e o de motor de passo. Entre os dois drivers há os seguintes terminais a serem unidos:

Driver de motor de passo

Da esquerda para direita:

1º Pino: Ligar em +5v

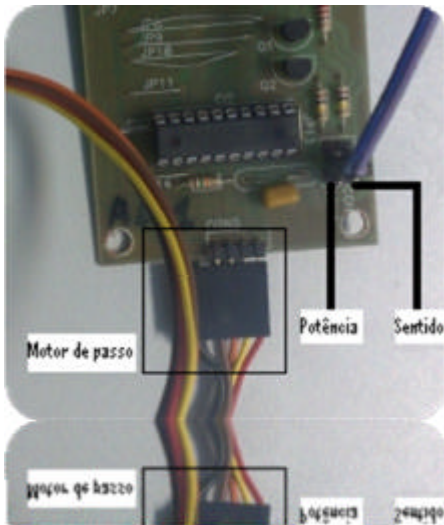
2º Pino: Ligar em +12v

3º Pino: Ligar em GND

4º Pino: Ligar em GND

5º Pino: Ligar em “PULSOS” (Terminal visto adiante)

6º Pino: Ligar em +5v



O Motor de passo bipolar é ligado conforme a figura acima.

Há no driver de motor de passo duas colunas com 3 pinos cada. Os pinos do meio de cada coluna corresponde, da esquerda para direita, a potência (meio-passo e passo inteiro) e o sentido. O driver de motor de passo suporta até 4 A de corrente e a tensão do motor é de 12v.



Na placa SLS

De cima para baixo:

1º Pino: Ligar no pino de potência do driver de motor de passo.

2º Pino: Ligar no pino de sentido do driver de motor de passo .

3º Pino: Pino “Pulsos”, ligar no pino correspondente no driver de motor de passo.

4º Pino: Ligar em GND.

Porta Paralela

A comunicação entre a placa e o computador é feita através da porta paralela. O cabo a ser usado é o DB25 macho-macho.