

**SEBASTIÃO RIBEIRO JÚNIOR**

**DETERMINAÇÃO DE VOLUMES EM ATIVIDADES DE MINERAÇÃO  
UTILIZANDO FERRAMENTAS DO SENSORIAMENTO REMOTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2011**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R484d  
2011

Ribeiro Júnior, Sebastião, 1958-

Determinação de volumes em atividades de mineração  
utilizando ferramentas do sensoriamento remoto / Sebastião  
Ribeiro Júnior. – Viçosa, MG, 2011.  
xviii, 161f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Inclui apêndice.

Orientador: Carlos Antônio Oliveira Vieira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 146-151

1. Mineração a céu aberto. 2. Minérios - Medição.  
3. Sistemas de varredura. 4. Sensoriamento remoto.  
5. Sistemas imageadores. 6. Imagens fotográficas.  
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 622.3

**SEBASTIÃO RIBEIRO JÚNIOR**

**DETERMINAÇÃO DE VOLUMES EM ATIVIDADES DE MINERAÇÃO  
UTILIZANDO FERRAMENTAS DO SENSORIAMENTO REMOTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 19 de dezembro de 2011.

---

Prof. Joel Gripp Júnior  
(Co-orientador)

---

Prof. Adriano Heckert Gripp

---

Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho

---

Prof. Vicente Paulo Soares

---

Prof. Carlos Antônio Oliveira Vieira  
(Orientador)

A

Davianne e Thales, meus filhos.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento das pesquisas, em função das complexidades relativas aos equipamentos de coletas de dados e *softwares* específicos, tornou-se necessário firmar parcerias com empresas que atuam no mercado como geradoras e comerciantes dos produtos das tecnologias envolvidas, especificamente a MAPTEK DO BRASIL, a GEOID AEROLEVANTAMENTOS e a GHT GEOPROCESSAMENTO.

Fez-se necessário também, contar com parceria da Companhia VALE, dando suporte técnico e permitindo que os trabalhos de coleta de dados fossem realizados em suas dependências, particularmente na mina de Alegria.

A essas empresas o meu muito OBRIGADO.

Agradeço ao Prof. Carlos Antônio Oliveira Vieira pela orientação e apoio durante a elaboração deste trabalho e ao Prof. Joel Gripp Júnior por sua importante participação na co-orientação;

Estendo os meus agradecimentos pelo apoio, colaboração, participação, ajuda e /ou compreensão:

Aos colegas Leandro Poletto, Leandro Carvalho e Leonardo Campos de Assis (UFV);

Aos profissionais da mina de Alegria (Vale): Marcos Cunha, Bruno Cipriano, Ronaldo Carvalho, Corcini Marcelo, Helder Souza, Antônio Cássio Soares, Célio Freitas, Willian Xavier e em especial a Jurandir França pela boa vontade e incansável colaboração;

Aos profissionais da empresa Geoid: Mário Oscar, João Luiz, João Batista, em especial ao Paulo César Marcelino e Eduarda Martiniano por suas importantes colaborações;

Aos irmãos Marcelo e Marcílio ex-profissionais da Maptek parceira neste trabalho;

Ao Adriano Huguet da empresa HGT Geoprocessamento, sem a sua participação este trabalho não teria a mesma dimensão;

Aos colegas de trabalho Cristina Alves, Edson Martins, Érika Fabri, Oscar Fuentes, Paulo Borges e Paulo Pires (IFMG - Ouro Preto);

Ao Prof. José Geraldo Arantes de Azevedo (UFOP);

Ao Márcio Tavares da empresa Esteio Aerolevantamentos;  
À Simone Sato da empresa DVP do Brasil;  
À Aliane Mota Baeta, Claudia Saraiva Saltareli e José Fernando Castro do  
Instituto de Geociências Aplicadas (IGA) de Minas Gerais;  
Ao Marcelo Maranhão do IBGE Rio de Janeiro;

A todos os amigos e companheiros que de forma direta ou indireta  
participaram ou colaboraram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE GRÁFICOS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES	xiv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3 HIPÓTESE	3
1.4 OBJETIVO GERAL	3
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.6 JUSTIFICATIVAS	4
1.7 ESTRUTURA DA TESE	5
CAPÍTULO 2 REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1 SISTEMA GPS - <i>GLOBAL POSITIONING SYSTEM</i>	6
2.2 O <i>LASER</i>	10
2.3 SENSORIAMENTO REMOTO	14
2.3.1. Sensores Remotos	17
2.3.2. Resoluções de um Sistema Sensor	18
2.3.3. Sistema <i>Laser Scanner</i>	20
2.3.4. Fotogrametria	32
2.3.5. Pós-Sinalização	38
2.4 MODELO DIGITAL DE TERRENO	42
2.4.1. Fases de uma Modelagem Digital de Terreno	44
2.4.2. Interpoladores	48
2.4.3. A Triangulação de Delaunay	52
2.5 FECHAMENTO CONTÁBIL DE PRODUÇÃO	53
2.6 ANÁLISE MULTICRITÉRIO	55

CAPÍTULO 3	ÁREA DE ESTUDOS, MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1	ÁREA DE ESTUDOS	62
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.2.1	Tecnologia GPS	65
3.2.2	Tecnologia <i>Laser Scanner</i> Terrestre	73
3.2.3	Tecnologia <i>Laser Scanner</i> Aerotransportado	81
3.2.4	Tecnologia Pós-Sinalização	88
3.2.5	Análise Multicritério (Processo Analítico Hierárquico)	93
CAPÍTULO 4	RESULTADOS	98
4.1	RESULTADOS - GPS	98
4.1.1	Volumes das Pilhas de Minério	99
4.1.2	Fechamento Contábil a partir dos Volumes GPS	103
4.2	RESULTADOS - <i>LASER SCANNER</i> TERRESTRE	104
4.2.1	Validação dos Pontos <i>Laser</i>	104
4.2.2	Volumes das Pilhas de Minério	106
4.2.3	Fechamento Contábil a partir dos Volumes LST	108
4.3	RESULTADOS - <i>LASER SCANNER</i> AEROTRANSPORTADO	108
4.3.1	Plano de Vôo	108
4.3.2	Validação dos Pontos <i>Laser</i>	110
4.3.3	Volumes das Pilhas de Minério	111
4.3.4	Fechamento Contábil a partir dos Volumes LSA	112
4.4	RESULTADOS - PÓS-SINALIZAÇÃO	113
4.4.1	Validação dos pontos Pós-Sinalização	113
4.4.2	Volumes das Pilhas de Minério	114
4.4.3	Fechamento Contábil a partir dos Volumes Pós-Sinalização	115
4.5	RESULTADOS EXPRESSOS EM GRÁFICOS	115
4.5.1	Volume Medido	116
4.5.2	Fechamento Contábil	118
4.6	OUTRAS VARIÁVEIS ANALISADAS COMPARATIVAMENTE	119
4.6.1	Tempo, Material Humano e Produto (Serviços de Campo)	119
4.6.2	Tempo, Material Humano e Produto versus Tecnologias (Gráficos)	121
4.6.3	Tempo e Material Humano (Tratamento e Resultados)	123
4.6.4	Produtividade.	123

4.6.5	Custo Operacional_____	124
4.6.6	Segurança Ocupacional_____	126
4.7	OUTROS RESULTADOS VOLUMÉTRICOS OBTIDOS COM DIFERENTES FERRAMENTAS _____	127
CAPÍTULO 5	ANÁLISES E AVALIAÇÕES DOS RESULTADOS _____	129
5.1	AVALIAÇÕES VOLUMÉTRICAS E A OUTRAS VARIÁVEIS _____	130
5.1.1	Avaliações Volumétricas _____	130
5.1.2	Avaliações a outras Variáveis _____	132
5.1.3	Avaliações a outras Estratégias _____	133
5.2	AVALIAÇÃO PELO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO _____	135
5.3	CURVAS DE IMPORTÂNCIA DAS VARIÁVEIS EM RELAÇÃO AOS CRITÉRIOS _____	141
5.4	AVALIAÇÃO FINAL _____	142
CAPÍTULO 6	CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	143
CAPÍTULO 7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	146
ANEXO 1	_____	152
ANEXO 2	_____	153
ANEXO 3	_____	154
ANEXO 4	_____	155
ANEXO 5	_____	156
ANEXO 6	_____	157
APÊNDICE	_____	158
1.1	- <i>AutoCAD CIVIL 2010 - 3D</i> _____	158
1.2	- <i>TopoGRAPH 98 SE</i> _____	159
1.3	- <i>TerraModeler</i> _____	160
1.4	- <i>I-Site Studio</i> _____	160

## LISTA DE FIGURAS

Fig 2.1 - Órbitas dos Satélites. Constelação NAVSTAR	7
Fig 2.2 - Posicionamento GPS	8
Fig 2.3 - Levantamento GPS para cálculo de volume de minério	10
Fig 2.4 - Princípio da emissão estimulada	11
Fig 2.5 - O Sistema Básico do <i>Laser</i>	12
Fig 2.6 - Intervalo do Espectro Eletromagnético onde o <i>Laser</i> atua	12
Fig 2.7 - Radiação Eletromagnética – Comportamento	15
Fig 2.8 - Assinatura Espectral de uma folha verde	16
Fig 2.9 - Sensores Ativo e Passivo	17
Fig 2.10 - Níveis de Cinza para uma Imagem	19
Fig 2.11 - Esquema representativo do princípio de medição por Triangulação	22
Fig 2.12 - Esquema representativo do princípio de medição (Time- of- Flight)	22
Fig 2.13 - Coordenadas bidimensionais - Trajetória horizontal	24
Fig 2.14 - Coordenadas bidimensionais - Trajetória inclinada	24
Fig 2.15 - Coordenadas tridimensionais - Trajetória inclinada	24
Fig 2.16 - Variação angular, horizontal e vertical, de um sistema <i>Laser</i>	27
Fig 2.17 - Estrutura física de um Sistema <i>Laser Scanner</i>	28
Fig 2.18 - Estrutura de um levantamento aerotransportado a <i>Laser</i>	30
Fig 2.19 - Direções de emissão do feixe <i>Laser</i>	30
Fig 2.20 - Etapas de um levantamento aerotransportado a <i>Laser</i>	31
Fig 2.21 - Sobreposição longitudinal e lateral em vôo fotogramétrico	34
Fig 2.22 - Linhas epipolares	40
Fig 2.23 - Fluxograma de aplicação da tecnologia Pós-Sinalização	41
Fig 2.24 - Diferença entre MDT e MDS	43
Fig 2.25 - Superfície gerada a partir de uma grade retangular	46
Fig 2.26 - Superfície gerada a partir de uma grade triangular	47
Fig 2.27 - Estrutura Triangular Irregular – TIN	47
Fig 2.28 - Interpolação bivariada. Grade quadrada	51
Fig 2.29 - Interpolação bivariada. Grade Triangular	52
Fig 2.30 - Cada triângulo de Delaunay tem um círculo circundante vazio	53
Fig 2.31 - A triangulação de Delaunay sobre 400 pontos aleatórios	53

Fig 2.32 - Fechamento Contábil _____	55
Fig 2.33 - Estrutura Hierárquica para AHP _____	59
Fig 2.34 - Fluxograma geral do método AHP _____	61
Fig 3.1 - Localização Mariana - Mina de Alegria _____	63
Fig 3.2 - Vista Parcial do Pátio do Embarcadouro da mina de Alegria _____	64
Fig 3.3 - Coletor de dados TSC1 _____	66
Fig 3.4 - Coletor de dados TSC2 _____	66
Fig 3.5 - Sistema GPS 4800 _____	66
Fig 3.6 - Sistema GPS 5800 _____	67
Fig 3.7 - Sistema GPS R8 _____	67
Fig 3.8 - Levantamento GPS para cálculo de volume de minério _____	68
Fig 3.9 - Levantamento GPS para cálculo de volume de minério _____	68
Fig 3.10 - Esquema representativo de determinação de volume _____	71
Fig 3.11 - Processo gráfico para determinação do volume de minério _____	72
Fig 3.12 - Sistema I-Site 4400 _____	74
Fig 3.13 - <i>Laser Scanner</i> I-Site 4400 com GPS acoplado _____	76
Fig 3.14 - Arquivos de pontos <i>Laser</i> em cores distintas _____	77
Fig 3.15 - Resultado do referenciamento das varreduras <i>Laser</i> _____	78
Fig 3.16 - Seleção de pontos para edição manual _____	79
Fig 3.17 - Situação após a edição manual _____	80
Fig 3.18 - Sensor <i>Laser</i> _____	82
Fig 3.19 - <i>Rollei-Metric</i> AIC _____	82
Fig 3.20 - Unidade de montagem da <i>Rollei-Metric</i> AIC _____	82
Fig 3.21 - Exemplo de imagem obtida pela <i>Rollei-Metric</i> AIC _____	83
Fig 3.22 - Aeronave Sêneca II _____	83
Fig 3.23 - Tela de controle o sistema <i>Laser Scanner</i> _____	85
Fig 3.24 - Tela de controle de sobrevôo _____	86
Fig 3.25 - Aeromodelo “ <i>Endurance 100</i> ”. _____	89
Fig 3.26 - Marcação de ponto de controle no solo. _____	91
Fig 3.27 - Fotografia Pós-Sinalização _____	91
Fig 3.28 - Unidade mestre da Central de Processamento de Dados GeoExpert® _____	92
Fig 4.1 - Pilhas de minério - Mina de Alegria _____	99
Fig 4.2 - MDT “primitiva” - Pátio do embarcadouro _____	99
Fig 4.3 - Pilha “B” sobreposta à sua primitiva _____	100

Fig 4.4 - Malha retangular, Pilha “B” e limite _____	101
Fig 4.5 - “Janela” Cálculo de Volume, aterro _____	101
Fig 4.6 - Volume da pilha “B” de minério _____	102
Fig 4.7 - MDT e Volume da Pilha “D” de minério. _____	107
Fig 4.8 - MDT da pilha “Mineirinho” _____	112
Fig 5.1 - Estrutura Hierárquica para AHP _____	136
Fig 5.2 - Curvas das Variáveis em função dos Critérios _____	141
Fig 6.1 - Pilha de Minério estocado. Mina de Alegria (2009) _____	143

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação no Padrão IEC 60825-1:2001. _____	14
Tabela 2.2 - Classificação no Padrão CDRH. _____	14
Tabela 2.3 - Comparação entre os Modelos de Grade Retangular e Triangular. _____	48
Tabela 2.4 - Escala de Thomas. L. Saaty para o método AHP _____	60
Tabela 3.1 - Arquivo de pontos GPS editados _____	70
Tabela 4.1 - Volume das pilhas de minério - Dados GPS (28/07/2009) _____	102
Tabela 4.2 - Volume das pilhas de minério - Dados GPS (16/09/2009) _____	103
Tabela 4.3 - Fechamento Contábil - Dados GPS (28/07/2009) _____	103
Tabela 4.4 - Fechamento Contábil - Dados GPS (16/09/2009) _____	103
Tabela 4.5 - Validação do LST _____	105
Tabela 4.6 - Dados estatísticos -Validação do LST _____	105
Tabela 4.7 - Volume das pilhas de minério - Tecnologia LST _____	107
Tabela 4.8 - Fechamento Contábil - Dados LST (28/07/2009) _____	108
Tabela 4.9 - Validação do LSA _____	110
Tabela 4.10 - Dados estatísticos da validação do LSA _____	111
Tabela 4.11 - Volume das pilhas de minério - Tecnologia LSA _____	112
Tabela 4.12 - Fechamento Contábil - Dados LSA (16/09/2009) _____	113
Tabela 4.13 - Validação da Pós-Sinalização _____	113
Tabela 4.14 - Dados estatísticos da validação Pós-Sinalização _____	114
Tabela 4.15 - Volumes de minério - Tecnologia Pós-Sinalização _____	115
Tabela 4.16 - Fechamento Contábil - Dados Pós-Sinalização (22/07/2011) _____	115
Tabela 4.17 - Levantamento por GPS em 28/07/2009 _____	120
Tabela 4.18 - Levantamento por GPS em 16/09/2009 _____	120
Tabela 4.19 - Levantamento por <i>Laser Scanner</i> I-Site _____	120
Tabela 4.20 - Tempos do Levantamento LSA _____	121
Tabela 4.21 - Tempos do Levantamento Pós-Sinalização _____	121
Tabela 4.22 - Produtividade X Tecnologia _____	124
Tabela 4.23 - Custo Operacional X Tecnologia _____	125
Tabela 4.24 - Grau de Segurança Ocupacional X Tecnologia _____	126
Tabela 4.25 - Volume - Tecnologia GPS - <i>Software TopoGRAPH-98SE</i> _____	127
Tabela 4.26 - Volumes - LSA - <i>Softwares TerraModeler e AutoCAD Civil 3D 2</i> _____	128

Tabela 5.1 - Volumes obtidos e suas variações _____	131
Tabela 5.2 - Volumes Pilha Estável _____	131
Tabela 5.3 - Variáveis Analisadas – Tecnologia _____	132
Tabela 5.4 - Interpoladores Linear e Bi-Variado - <i>TopoGRAPH-98SE</i> _____	133
Tabela 5.5 - Seções transversais - <i>TopoGRAPH-98SE</i> _____	134
Tabela 5.6 - Malha regular X Seções transversais - <i>TopoGRAPH-98SE</i> _____	134
Tabela 5.7 - Aplicativos <i>AutoCAD Civil</i> e <i>TerraModeler</i> _____	135
Tabela 5.8 - Matriz de Preferência - Critério 1 - N° de pessoal em campo _____	137
Tabela 5.9 - Matriz de Preferência - Critério 2 - Tempo de Coleta de Dados _____	137
Tabela 5.10 - Matriz de Preferência - Critério 3 - N° de pontos – MDT _____	137
Tabela 5.11 - Matriz de Preferência - Critério 4 – Produtividade _____	137
Tabela 5.12 - Matriz de Preferência - Critério 5 - Custo de Produção _____	137
Tabela 5.13 - Matriz de Preferência - Critério 6 - Segurança Ocupacional _____	138
Tabela 5.14 - Matriz de Preferência - Critério 7 - Fechamento Contábil _____	138
Tabela 5.15 - Matriz de Hierarquização das Variáveis em relação aos Critérios _____	138
Tabela 5.16 - Matriz de Hierarquização dos Critérios _____	139
Tabela 5.17 - Vetor Prioridade dos Critérios _____	139
Tabela 5.18 - Consistência das Avaliações dos Critérios e Variáveis _____	140
Tabela 5.19 - Resultado do AHP _____	140

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Comparativo entre pontos de validação LST _____	106
Gráfico 4.2 - Comparativo entre pontos de validação LSA _____	111
Gráfico 4.3 - Comparativo dos pontos de validação GPS / Pós-Sinalização _____	114
Gráfico 4.4 - Volume Medido GPS x LST _____	116
Gráfico 4.5 - Volume Medido GPS x LSA _____	117
Gráfico 4.6 - Volume Medido LST (Vale) x Pós-Sinalização _____	117
Gráfico 4.7 - Volume Medido LST (Vale) x Pós-Sinalização - Pilha “11S01B” ____	118
Gráfico 4.8 - Fechamento Contábil - GPS, LST, LSA e Pós-Sinalização _____	118
Gráfico 4.9 - Número de profissionais - Coleta de dados e Tecnologia _____	122
Gráfico 4.10 - Tempo de coleta de dados e Tecnologia _____	122
Gráfico 4.11 - Número de pontos e Tecnologia _____	123
Gráfico 4.12 - Produtividade e Tecnologia _____	124
Gráfico 4.13 - Custo Operacional e Tecnologia _____	125
Gráfico 4.14 - Segurança Ocupacional e Tecnologia _____	126

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES

3D	3 dimensões
AGL	<i>Above Ground Level</i> - Altura ao nível do solo
AHP	<i>Analytical hierarchical process</i>
ALS	<i>Airborne Laser Scanning</i>
ALTM	<i>Airborne Laser Terrain Mapper</i>
AMD	Apoio Multicritério à Decisão
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
bits	<i>Binary digiT</i>
ca	Centiare
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Desenho Auxiliado por Computador
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CDRH	<i>Center for Devices and Radiological Health</i>
cm	Centímetro
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CO	Custo Operacional
CPD	Centro de Processamento de Dados
CPU	Unidades Centrais de Processamento
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
CW	<i>Continuous Wave</i> - Onda contínua
DoD	Departamento de Defesa dos EUA
E	Coordenada Este
EFVM	Estrada de Ferro Vitória Minas
FLOPS	<i>Floating Operations per Second</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPRO	<i>Ground Processing</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GR	Grau de Risco
GSO	Grau de Segurança Ocupacional
H	Coordenada altitude

h	Hora
ha	Hectare
Hz	Hertz
IB(I, II, III)	Instalação de Beneficiamento I, II e III
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
kHz	Kilohertz
km	Quilômetro
Km/h	Quilometro por hora
Km/s	Quilometro por segundo
Kts	<i>knots</i> - nós
LaDAR	<i>Laser Detection And Ranging</i>
Laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance</i>
Laser P	<i>Laser Pulsado</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LSA	<i>Laser Scanner Aerotransportado</i>
LST	<i>Laser Scanner Terrestre</i>
m	metro
MB	Megabytes
MDT	Modelo Digital de Terreno
MDS	Modelo Digital de Superfície
MHz	Mega hertz
min	minuto
mm	milímetro
MMAD	Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão
MP	Mega Pixel
N	Coordenada Norte
NAVSTAR	<i>Navigation System with Time and Ranging</i>
nm	Nanômetro
nmi	milhas náuticas
NR	Norma Regulamentadora
NSF	<i>National Science Foundation</i>
PDI	Processamento Digital de Imagens
PDOP	<i>Positional Dilution of Precision</i>
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica

ppm	parte por milhão
Radar	<i>Radio Detection And Ranging</i>
RC	Razão de Consistência ou Razão de Consistência
RGB	Red, Green, Blue
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
S	Coordenada Sul
SAD-69	<i>South American Datum - 1969</i>
SDRAM	<i>Synchronous Dynamic Random Access Memory</i>
SE	Sudeste
seg	segundo
TGO	<i>Trimble Geomatics Office</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
TSC1	<i>Trimble System Controller</i>
TSC2	<i>Trimble Survey Controller</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UTM	Universal Tranversa de Mercator
VT28	Vértice Topográfico 28
W	<i>West - Oeste</i>
XYZ	Coordenadas Planialtimétricas

## RESUMO

RIBEIRO JÚNIOR, Sebastião, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2011. **Determinação de volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto.** Orientador: Carlos Antônio Oliveira Vieira. Coorientador: Joel Gripp Júnior.

A inovação em métodos e técnicas de sensoriamento remoto, bem como nos processos de obtenção de modelos digitais de terrenos, permitem a utilização de novas metodologias na coleta de dados em campo para a determinação de volumes de materiais. Seguindo essa linha de abordagem, é desenvolvido esse trabalho que, objetivamente, enfoca a aplicação das tecnologias GPS (*Global Positioning System*), *Laser Scanner* Terrestre, *Laser Scanner* Aerotransportado e a técnica de Pós-Sinalização nos levantamentos para cubagem de minério estocado. O ambiente de desenvolvimento dos trabalhos é o pátio do embarcadouro, área de estocagem de minérios da mina de Alegria da Companhia Vale. São comparados os resultados obtidos pela aplicação das diferentes tecnologias, tomando como referência a tecnologia GPS, assim como as variáveis e características influenciadoras em cada uma delas. Especificamente, também são comparados os resultados obtidos no fechamento contábil de produção e estoque da mina de Alegria, diante da utilização dos dados volumétricos provenientes das diferentes tecnologias aplicadas. Finalmente, mostra-se, através de análises multicritério, que as técnicas e metodologias empregadas podem ser aplicadas na determinação de volumes de grandes massas, sendo apresentado um *ranking* de preferência entre essas tecnologias em função do problema proposto e das variáveis analisadas. A tecnologia Pós-Sinalização obteve o melhor índice de preferência, seguida do *Laser Scanner* Terrestre, do *Laser Scanner* Aerotransportado e, finalmente, da tecnologia GPS.

## ABSTRACT

RIBEIRO JÚNIOR, Sebastião, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2011. **Determination of material volumes in mining activities utilizing remote sensing tools.** Adviser: Carlos Antônio Oliveira Vieira. Co-Adviser: Joel Gripp Júnior.

The innovation in remote sensing methods and techniques as well as the procedures for obtaining digital terrain models allow the use of new methodologies in collecting field data for the determination of material volumes. Following this line of approach, this project is developed focusing on the application of GPS technology (Global Positioning System), LST (Terrestrial Laser Scanning), LSA (Airborne Laser Scanning) and Post-Signalization technique (PÓS) in surveying for ore stockpile cubing. The project's development environment is the wharf patio, which is an ore storage area for the Alegria Mine that belongs to Vale Company. The results obtained through the application of different technologies are compared, having as reference the GPS technology as well as the dominating characteristics and parameters in each one of them. The results obtained for the accounting closure of Alegria Mine's production and stock are specifically compared against the use of volumetric data from the different technologies applied. Finally, it is shown through multicriteria analysis that the techniques and methodologies used can be applied to determining the volume of large masses. A ranking of preference among these technologies is also presented according to the proposed problem and analyzed variables. The Post-Signalization technique obtained the best preference index, then the Terrestrial Laser Scanning, the Airborne Laser Scanning and finally, the GPS technology.

## CAPÍTULO 1      INTRODUÇÃO

---

### 1.1      CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A determinação de volumes na mineração se faz necessário desde a fase de pesquisa, no dimensionamento de corpos mineralizados, passando pelas operações de mina, como nos desmontes e disposições de materiais, até a fase final de produção com a medição dos produtos gerados.

Ao longo dos tempos, as metodologias utilizadas para essas determinações têm tido como base os levantamentos topográficos, cujas técnicas têm evoluído constantemente, propiciando resultados cada vez mais rápidos e precisos.

Atualmente, na maioria das minerações, os volumes de grandes massas são determinados baseados em levantamentos topográficos que utilizam a tecnologia GPS (*Global Positioning System*). Porém, existem vários fatores que influenciam nos processos de coleta de dados e nas respostas obtidas, interferindo assim, na confiabilidade dos resultados. Dentre outros fatores, são apresentadas como exemplo, as variadas e irregulares conformações físicas das pilhas de minério e a segurança dos operadores nas atividades de campo.

Torna-se assim, importante avaliar e comparar alternativas tecnológicas, utilizando ferramentas de levantamentos por sensoriamento remoto terrestre e aerotransportado, para aplicação na cubagem de materiais sólidos na mineração.

Pelas técnicas de sensoriamento remoto é possível se ter um enorme volume de informações posicionais em três dimensões, por meio de captação de energia refletida da superfície, sem o contato físico direto entre esta superfície e o sistema sensor de medição.

## **1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA**

Aparentemente, a mensuração do resultado de produção de uma empresa, ao final de um período, é bastante fácil: basta comparar seu estoque atual com o do início do período, considerando entradas e saídas, para se detectar se a empresa teve ganhos ou perdas de produção (LOZECKY, 2004). No entanto, a realidade não é tão simples assim. A mensuração do resultado envolve variáveis que precisam ser observadas e analisadas de forma a garantir segurança e confiabilidade do processo. Às vezes um procedimento operacional indevido, pode se transformar num prejuízo de grandes proporções e comprometer a qualidade de uma mensuração.

Todos os métodos e técnicas utilizados nas coletas de dados que compõem uma base cartográfica, utilizada nas mensurações de volumes, têm suas particularidades (vantagens e desvantagens) e variáveis que devem ser analisadas em função do tipo de aplicação.

Esta pesquisa propõe o estudo da aplicabilidade de produtos de levantamentos topográficos por sensoriamento remoto terrestre e aerotransportado, como alternativas tecnológicas para a determinação de volumes de produtos sólidos armazenados nos pátios da mineração, para utilização em fechamentos contábeis de produção e estoque, considerando as variáveis influenciadoras nas operações de coleta de dados, como: nº de pessoal envolvido na coleta dos dados, produtividade, custos, segurança, dentre outros.

O fechamento contábil de produção e estoque na área de mineração é realizado em função de sua produção, das saídas de minério e do material ainda estocado, que, constantemente, deve ser apurado.

### 1.3 HIPÓTESE

A hipótese assumida nesta tese pode ser formulada como: “Através de levantamentos por sensoriamento remoto é possível melhorar a confiabilidade nos dados utilizados para a determinação de volumes de minério estocados, bem como as condições de segurança nos trabalhos de campo, propiciando uma melhor precisão no fechamento contábil de produção e estoque”.

### 1.4 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é identificar e avaliar alternativas tecnológicas para a coleta de dados, utilizados na determinação de volumes de produtos sólidos de mineração, depositados em pátios de estocagem, a partir de levantamentos por sensoriamento remoto.

### 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender ao objetivo geral proposto, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- i)** Estudar as técnicas de levantamento topográfico por GPS, aplicadas na determinação de volumes de minério depositados em pátios de estocagem de mineração;
- ii)** Estudar as técnicas de levantamento topográfico por sensoriamento remoto terrestre e aerotransportado, através de varredura a *Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radianc)*, aplicadas na determinação de volumes de minério depositados em pátios de estocagem de mineração;
- iii)** Estudar as técnicas de levantamento topográfico por aplicação da tecnologia denominada de Pós-Sinalização, aplicadas na determinação de volumes de minério depositados em pátios de estocagem de mineração;
- iv)** Analisar os resultados obtidos por sensoriamento remoto e os obtidos, tradicionalmente, pela aplicação da tecnologia GPS, utilizando técnicas de apoio

multicritério à decisão, especificamente, o Processo Analítico Hierárquico (AHP).

## 1.6 JUSTIFICATIVAS

Nestes tempos de globalização, a agilidade, confiabilidade e precisão na geração de informações são fundamentais, possibilitando um maior controle operacional e de custos, que resultam num gerenciamento mais eficaz.

Técnicas de sensoriamento remoto, como as varreduras a *Laser* (terrestre e aerotransportada) e a Pós-Sinalização, em função de suas características, permitem a obtenção de informações topográficas tridimensionais da superfície terrestre, inclusive em regiões inacessíveis, com precisão, rapidez e elevado grau de detalhamento.

Um princípio importante relacionado ao uso de dados de sensoriamento remoto é que diferentes objetos na superfície da Terra e na atmosfera refletem, absorvem, transmitem ou emitem diferentes proporções de energia eletromagnética, e essas diferenças permitem identificar seus componentes. Sensores instalados em aeronave ou plataformas de satélite registram a magnitude do fluxo de energia refletida ou emitida através de objetos na superfície da Terra (MATHER, 2003).

Os produtos de levantamentos por sensoriamento remoto apresentam grandes potencialidades para aplicações em operações de pesquisa e produção mineral, bem como no planejamento e implantação de novos projetos. Tem sido, conforme Reis *et al.* (2007), amplamente utilizado na seleção de ambientes prospectivos, mapeamento de unidades geológicas e na identificação de depósitos minerais.

Ainda, de acordo com Reis *et al.* (2007), a maior diversidade de imagens obtidas por sensoriamento remoto, aliada à redução de custos dos programas de processamento de imagens, possibilitou seu uso extensivo na exploração mineral. Ultimamente, a utilização de imagens de levantamentos por sensoriamento remoto é premissa básica para qualquer programa de mapeamento geológico. Na prospecção mineral, por exemplo, a interpretação dessas imagens propicia maior rapidez e eficiência para a definição de alvos.

Portanto, o estudo de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas na coleta de dados para a determinação de volumes sólidos em mineração se justifica, uma vez que a

utilização do sensoriamento remoto tem se expandido por diversas áreas, principalmente na mineração.

## **1.7 ESTRUTURA DA TESE**

Este trabalho está estruturado em 7 capítulos. No primeiro capítulo, juntamente com uma introdução, é caracterizado o problema alvo dos estudos, a hipótese que se pretende provar, os objetivos propostos e as justificativas para a realização das pesquisas.

No segundo capítulo, é desenvolvida uma revisão literária sobre as técnicas abordadas para coleta e tratamento de dados, de modo a promover um melhor entendimento no desenvolvimento dos estudos.

No terceiro capítulo, são tratados os materiais e métodos utilizados no trabalho. São destacados a área de estudos, os equipamentos e aplicativos computacionais, assim como a metodologia de desenvolvimento da pesquisa.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados.

No quinto capítulo, são realizadas as análises e avaliações dos resultados obtidos.

No sexto capítulo, são apresentadas as considerações finais relativas aos estudos desenvolvidos e, finalizando, no capítulo sete, as referências bibliográficas.

## **CAPÍTULO 2 REVISÃO DE LITERATURA**

---

Consta deste capítulo uma revisão de literatura, envolvendo alguns conceitos e definições relativas às tecnologias GPS, *Laser Scanner* e Pós-sinalização, que julgam-se importantes para um melhor entendimento desta pesquisa.

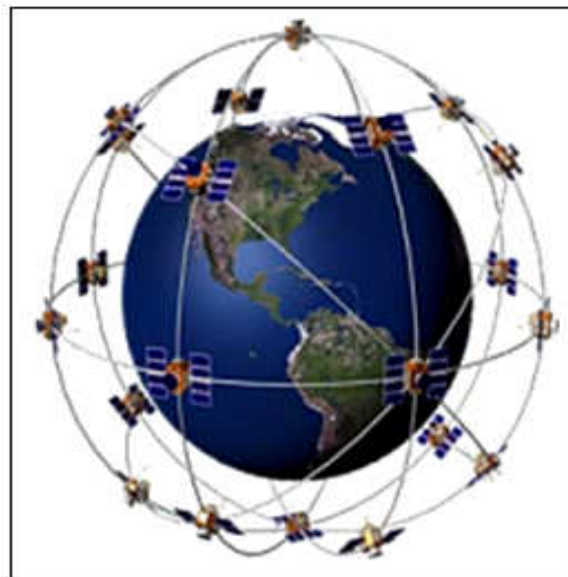
### **2.1 SISTEMA GPS - *GLOBAL POSITIONING SYSTEM***

Originalmente desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA (DoD) para usos militares estratégicos nas décadas de 70 e 80, século XX, o GPS transformou-se num sistema de utilização global.

Representa, nos últimos tempos, uma nova alternativa de posicionamento para a Cartografia e ciências afins, tendo o uso de GPS crescido significativamente em diversos tipos de aplicações. Este sistema de posicionamento beneficia usuários no mundo todo, incluindo aplicações na navegação aérea, rodoviária e marítima, telecomunicações, serviços de emergência, agricultura, pecuária, mineração, dentre outros, fornecendo o posicionamento instantâneo e preciso, sobre ou próximos à superfície terrestre, através de coordenadas tridimensionais.

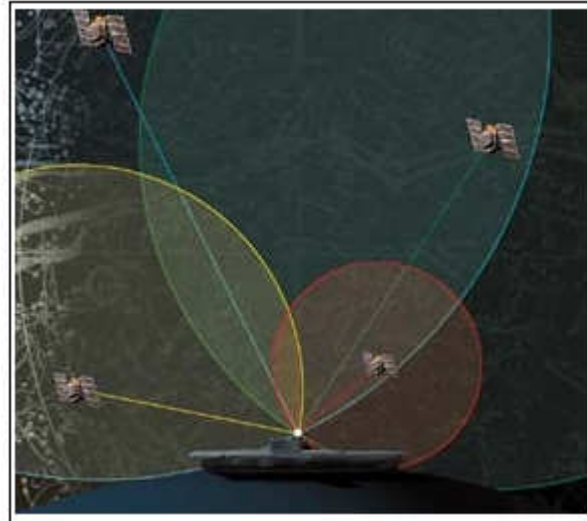
O Sistema GPS é constituído por uma rede de vinte e quatro satélites ativos e outros reservas prontos para serem utilizados se necessário, que compõem a constelação NAVSTAR (*Navigation System with Time and Ranging*), colocados em órbita ao redor da Terra em posições estratégicas e por receptores no solo (aparelhos que recebem o sinal e calculam a distância entre o receptor e os satélites).

Segundo Beraldo & Soares (1995), os satélites do GPS circulam a Terra em órbita elíptica (quase circulares), inclinadas de  $55^\circ$  em relação ao Equador. Os satélites encontram-se em seis planos orbitais, em intervalos longitudinais de  $60^\circ$  e com pontos de cruzamento nas longitudes  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $240^\circ$  e  $300^\circ$ . Cada órbita suporta quatro satélites, defasados entre si de  $90^\circ$  na órbita, com uma altitude média de 20.200km. Os satélites não são geoestacionários e possuem período orbital (tempo em que um satélite dá uma volta completa na Terra) de aproximadamente 12 horas siderais. Essas órbitas são apresentadas ilustrativamente na Figura 2.1.



**Fig 2.1 - Órbitas dos Satélites. Constelação NAVSTAR**  
**Fonte: Beneto (2006)**

O princípio básico de funcionamento do sistema GPS é a triangulação e, de acordo com Ribeiro Júnior (2006), sabendo a distância que separa um receptor GPS de 4 pontos, pode-se determinar a sua posição tridimensional (X, Y, Z) relativa a esses mesmos 4 pontos através da interseção de 4 circunferências cujos raios são as distâncias medidas entre o receptor e os satélites, como mostra a Figura 2.2.



**Fig 2.2 - Posicionamento GPS**  
**Fonte: Ribeiro Júnior (2006)**

Cada satélite transmite um sinal que é recebido pelo receptor, este por sua vez mede o tempo que os sinais demoram a chegar até ele. Multiplicando o tempo medido pela velocidade do sinal (a velocidade da luz), obtém-se a distância receptor-satélite.

A distância pode ser determinada através dos códigos modulados na onda enviada pelo satélite ou pela integração da fase de batimento da onda portadora.

Segundo Fortes (2005), tanto as observações de código quanto as da fase das portadoras podem ser tratadas a partir de pelo menos duas estações observadoras simultâneas dos mesmos satélites. Essa consideração proporciona à minimização, ou até mesmo o cancelamento, dos efeitos de alguns erros sistemáticos que incidem de forma semelhante em ambas as estações (erros das órbitas dos satélites, refração troposférica e ionosférica).

Os métodos de posicionamento pelo sistema GPS dividem-se em posicionamento absoluto e posicionamento relativo. No método de posicionamento absoluto “*point positioning*” a distância entre o satélite e a antena do rastreador é obtida por meio dos códigos transmitidos por ondas eletromagnéticas que se deslocam, aproximadamente, na velocidade da luz.

O método de posicionamento relativo é aquele em que, posições absolutas obtidas por um receptor móvel, são corrigidas por outro receptor fixo, estacionado num ponto de coordenadas de referência.

Várias técnicas são utilizadas na aplicação do método de posicionamento relativo como, o **Posicionamento Estático**, onde, segundo Maia (1999), um receptor é

instalado sobre um marco geodésico e um segundo receptor no ponto onde se quer determinar as coordenadas. Rastreamento simultaneamente as estações por um intervalo de tempo (30 min a 4 h) são calculadas as coordenadas tridimensionais para o ponto desconhecido.

Maia (1999), também descreve a técnica de **Posicionamento Cinemático** como aquela em que, inicialmente, um dos receptores é instalado sobre um ponto de coordenadas conhecidas e um segundo receptor sobre um ponto qualquer. A partir daí, as duas antenas receptoras passam a coletar dados simultaneamente por alguns minutos com o objetivo de resolver as ambigüidades. Depois, a antena que estava sobre o ponto desconhecido move-se por um percurso selecionado, sendo possível determinar com bastante precisão a trajetória feita por esta antena móvel.

Finalmente, é apresentada a técnica de **Posicionamento Semi-Cinemático (STOP-AND-GO)**. Este método é uma derivação do cinemático puro, visto que o usuário tem a opção de registrar pontos específicos do levantamento ao longo do deslocamento da antena remota. De acordo com Hofmann-Wellenhof *et al.*(2001) em Pereira (2008), são realizados posicionamentos em vários pontos de interesse, registrando observações em épocas distintas. As coordenadas desses pontos são então, determinadas pelo processamento das médias dos registros.

A grande vantagem desse método em relação ao cinemático puro é o aumento da precisão no posicionamento, devido a um maior número de observações, em diferentes períodos de tempo em cada ponto de interesse.

De acordo com Viçoso (2005) em Ribeiro Júnior (2006), esta técnica de posicionamento é usada em 90% das medições, servindo para levantamento de pontos soltos, como extremidades de cerca, linhas de pé e crista de taludes, poste, meio-fio, lotes, bueiros e outros.

O sistema de posicionamento por satélites vem, ao logo dos tempos, passando por contínua evolução, principalmente no que diz respeito aos equipamentos eletrônicos e programas computacionais. Essa constante expansão do sistema GPS é devida às vantagens que oferece quanto à precisão, produtividade e velocidade na obtenção de resultados.

Dentre as várias áreas de utilização do sistema GPS, destaca-se, neste trabalho, a aplicação do sistema GPS na mineração, através dos levantamentos de dados para a

geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), necessários para a determinação de volumes (cubagem) de produtos sólidos estocados em pátios.

A Figura 2.3 (a, b) mostra uma operação de campo no levantamento dos dados para o cálculo do volume de minério depositado.



**Fig 2.3 - Levantamento GPS para cálculo de volume de minério**  
**Fonte: Cortesia Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) - Mina de Fábrica (2006)**

## 2.2 O LASER

O termo *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) refere-se à amplificação de luz por emissão estimulada de radiação.

A luz *Laser* é direcional, cobre uma faixa estreita de comprimentos de onda e é mais coerente que luz comum. Um dispositivo *Laser* é geralmente um tubo cilíndrico que tem espelhos no interior ou nos extremos e está repleto por material como cristal, vidro, líquido ou gás. Estes materiais têm átomos, íons ou moléculas capazes de serem excitadas por luz ou por descarga elétrica até atingir um estado de carga máxima de energia. A descarga desta energia é conseguida pela emissão de fótons que formam um feixe de luz paralelo chamado *Laser* (<http://www.lidar.com.br/glossario.htm> - acesso 22/02/2010). Em essência o *Laser* é um dispositivo eletro-óptico que emite radiação coerente baseada no princípio da emissão estimulada.

Sob o ponto de vista da ótica, Galo (2008), apresenta o conceito de coerência como sendo quando a diferença de fase entre os feixes luminosos é constante ou, quando existe uma variação fixa da fase entre o campo elétrico em diferentes posições ou em diferentes instantes.

Galo (2008), também define a Emissão Estimulada da Radiação como sendo o processo pelo qual um fóton incidente em um sistema, interage com este sistema produzindo dois fótons. Este efeito ocorre quando se tem um átomo ou um íon num estado energético ( $E_2$ ) e com a incidência de um fóton, mais um fóton emerge do sistema, fazendo com que o átomo ou íon inicial mude para um estado de menor energia ( $E_1$ ). Isso se repetindo permite a geração de mais fótons, gerando um processo em cadeia no qual todos os fótons emitidos possuem algumas características em comum como, mesma energia do fóton incidente, mesma fase, mesma direção e mesma polarização. Este princípio é ilustrado na Figura 2.4, onde  $E_2$  corresponde a um estado de maior energia (*excited level*) e  $E_1$  ao estado fundamental (*ground level*).

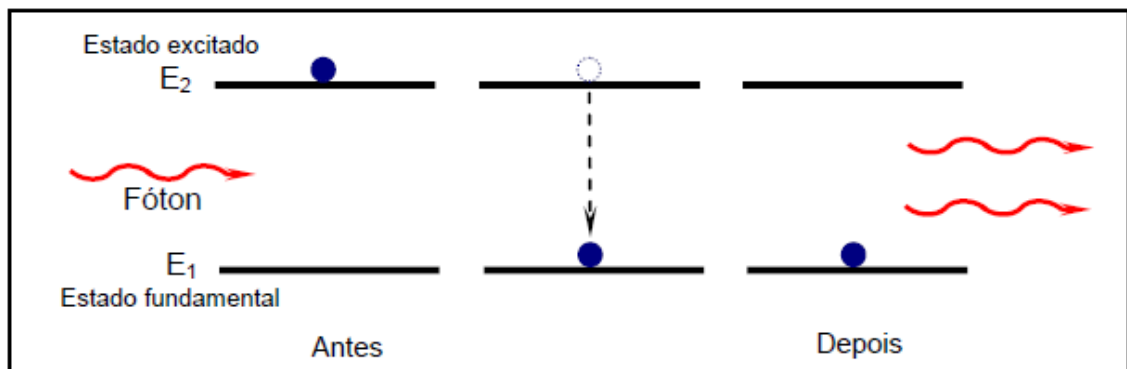


Fig 2.4 - Princípio da emissão estimulada  
Fonte: Galo (2008)

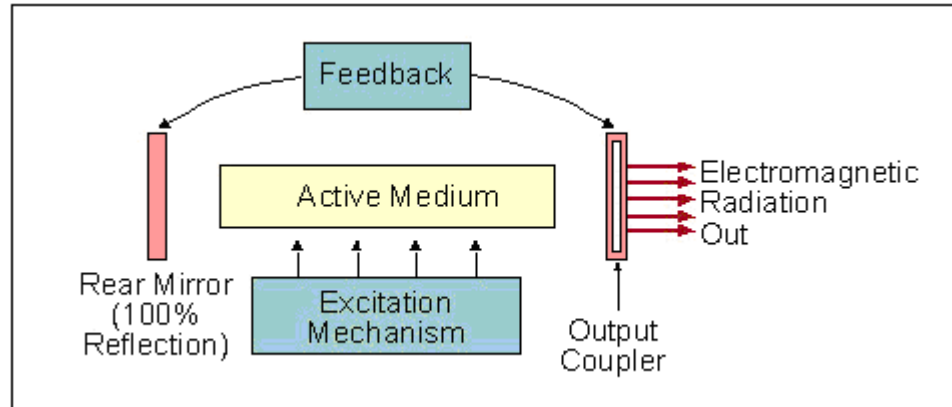
Segundo Arieli (2010), um sistema *Laser* pode ser descrito como composto por quatro unidades estruturais, mostradas pela Figura 2.5:

Meio ativo (*Active medium*) - que gera a luz do *Laser*;

Mecanismo da excitação (*Excitation mechanism*) - que provê a energia necessária para que o meio gere luz amplificada;

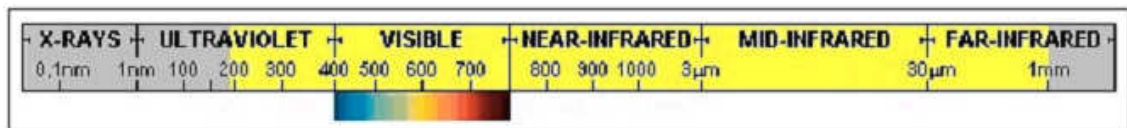
Gabarito ótico (*Optical feedback*) - responsável pela concentração da luz gerada;

Acoplador de emissão (*Output coupler*) - permitir a emissão, na forma contínua ou pulsada, da radiação eletromagnética.



**Fig 2.5 - O Sistema Básico do Laser**  
 Fonte: Arieli (2010)

O princípio de funcionamento do sistema *Laser* constitui a emissão estimulada de ondas eletromagnéticas na região do visível, do infravermelho e do ultravioleta. Na Figura 2.6, a parte sombreada em amarelo ilustra o intervalo de comprimento de onda próprio da radiação *Laser*, que vai de 180nm a 1mm, ou seja, do ultravioleta ao infravermelho distante.



**Fig 2.6 - Intervalo do Espectro Eletromagnético onde o Laser atua**  
 Fonte: Brandalize (2003)

Quando o *Laser* foi inventado, em 1960, foi classificado como uma solução à procura de um problema, sendo que, atualmente, é aplicado em muitas áreas diferentes como: medicina, comunicação, forças armadas, engenharia, indústria, dentre outras.

De acordo com Brandalize (2003), as características do *Laser* como: comprimento de onda, potência, duração e taxa de repetição, diâmetro e divergência do feixe, permitem avaliar a quais riscos ou perigos estão sujeitos aqueles que vierem a se expor a este tipo de radiação.

Dentre os sistemas biológicos passíveis de danos encontram-se os olhos e a pele humana. Pesquisas confirmam que os olhos são muito mais vulneráveis à radiação *Laser* que a pele e o pior caso de exposição ocorre, quando aqueles focalizam diretamente o feixe de radiação a certa distância, ou, quando o feixe focalizado é refletido por uma superfície espelhada.

O controle preventivo aos riscos de exposição varia de acordo com a classificação atribuída ao *Laser*, ao ambiente de utilização do *Laser* e em função dos operadores dos sistemas e das pessoas que se encontram em sua vizinhança. Portanto, é de fundamental importância que operadores de sistemas *Laser* tenham conhecimento a respeito dos riscos e procedimentos de segurança envolvidos por esse tipo de radiação.

Os *Lasers* são classificados, segundo padrões internacionais, tais como:

Padrão Internacional IEC 60825-1 - Editado pela *International Electrotechnical Commission* (IEC). Trata, basicamente, da segurança dos produtos *Laser* referente aos danos causados aos olhos e à pele.

Padrões Americanos ANSI Z136.1 e CDRH 21 CFR - respectivamente, regulamentado *pelo American National Standards Institute* (ANSI) e pelo *Center for Devices and Radiological Health* (CDRH). Refere-se ao padrão de desempenho de produtos *Laser* em geral e ao padrão de desempenho de produtos *Laser* de propósitos específicos, como os utilizados em levantamentos, nivelamentos e alinhamentos (construção civil), na medicina e em demonstrações.

A Tabela 2.1 apresenta a classificação dos produtos *Laser* segundo a IEC 60825-1:2001 e a Tabela 2.2 apresenta a classificação dos produtos *Laser* segundo o CDRH, constando os riscos, os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) e os tipos de *Laser* relativos a cada classe.

Nesta pesquisa, aplicando a tecnologia *Laser Scanner* Terrestre (sistema *I-Site* 4400CR/LR) foi utilizado *Laser* Classe 3R Civil, de acordo com o fabricante *I-Site* e, aplicando a tecnologia *Laser Scanner* Aerotransportado (sistema ALTM 3100EA), foi utilizado *Laser* Classe IV, de acordo com o fabricante *Optech*.

Tabela 2.1 - Classificação no Padrão IEC 60825-1:2001.

Classificação Laser - Padrão IEC 60825-1:2001			
Classe	Riscos	Laser	AEL
1	Não perigoso mesmo para longas exposições e com uso de instrumentos óticos de aumento	Potência muito baixa ou encapsulada	40 $\mu$ W
1M	Potencialmente perigosos aos olhos se observados por meio de instrumentos óticos	Potência muito baixa, colimado e de diâmetro grande ou altamente divergente	40 $\mu$ W
2	Seguros para exposições não intencionais e observações não prolongadas (<0,25s)	Potência baixa e visível	1mW
2M	Potencialmente perigosos aos olhos se observados por meio de instrumentos óticos	Potência baixa, visível, colimado e de diâmetro grande ou altamente divergente	1mW
3R	Seguros quando manipulados com cuidado e potencialmente perigosos aos olhos se observados por meio de instrumentos óticos	Potência baixa	200 $\mu$ W a 5mW
3B	Perigosos aos olhos nus quando observados diretamente (feixe e reflexões especulares)	Potência média	5mW a 500mW
4	Perigosos para a pele e olhos, inclusive na observação de reflexões difusas	Potência alta	>500mW

Fonte: Modificado de Brandalize (2003)

Tabela 2.2 - Classificação no Padrão CDRH.

Classificação Laser - Padrão CDRH			
Classe	Riscos	$\lambda$ (nm)	Laser
I	Não são considerados perigosos	180 a 1,0 x10 <sup>6</sup>	CW ou P
IIa	Considerados perigosos se observados em um intervalo de tempo superior ou igual a 1 x 10 <sup>-3</sup> s	400 a 710	CW
II	Apresentam riscos crônicos à visão	400 a 710	CW
IIIa	Apresentam tanto riscos severos como crônicos à visão e riscos severos se observados diretamente por meio de instrumentos óticos	400 a 710	CW
IIIb	Apresentam riscos severos à visão e à pele nas exposições diretas	180 a 1,0 x10 <sup>6</sup>	CW ou P
IV	Apresentam riscos severos à visão e à pele nas exposições diretas e indiretas	180 a 1,0 x10 <sup>6</sup>	CW ou P

Fonte: Modificado de Brandalize (2003)

### 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento Remoto é a técnica de se adquirir informações sobre a superfície da Terra por meio da captação da energia refletida ou emitida pela superfície, a qual é gravada e processada para ser analisada nas mais diversas áreas (SAUSEN, 2005).

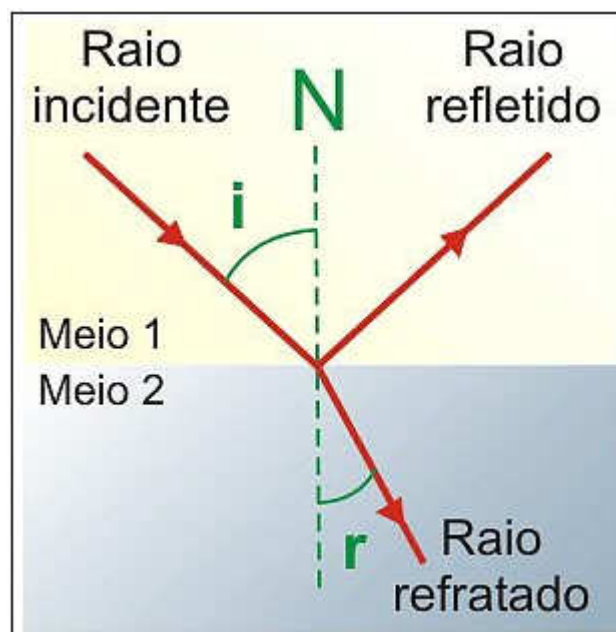
Segundo Mather (2003), o termo sensoriamento se refere à obtenção dos dados e, remoto ao fato desses dados serem obtidos à distância, sem que haja contato físico entre o sistema sensor e o objeto ou área a ser estudada.

Destacam-se no sensoriamento remoto as fases de aquisição de dados e a fase de análise e interpretação dos dados. A primeira fase compreende os processos de detecção e registro de dados e a segunda, responsável pelo tratamento e extração das informações ali presentes de acordo com a finalidade da coleta.

A aquisição dos dados por sensoriamento remoto se dá a partir da captação, por sistemas sensores, de radiações eletromagnéticas refletidas ou emitidas por objetos na superfície da Terra, que se movem no espaço em forma de ondas, à velocidade da luz.

A principal fonte natural dessas radiações eletromagnéticas é o sol. Este ilumina a superfície terrestre, através da propagação da radiação eletromagnética pelo espaço, sem necessidade de um meio físico para se propagar. A radiação atinge a superfície da Terra, e parte dela é refletida para o espaço, podendo ser captada por um sistema sensor. Dos dados captados pela reflexão da radiação é possível obter informações sobre a cobertura e superfície do solo.

A Figura 2.7 ilustra o comportamento da radiação eletromagnética ao atingir um meio diferente daquele em que está se propagando.



**Fig 2.7 - Radiação Eletromagnética – Comportamento**  
 Fonte: <http://www.images.google.com.br> (acesso 25/02/2010)

Cada objeto reflete, absorve e transmite a radiação eletromagnética em proporções diferentes, que podem variar em função das suas características moleculares. A energia refletida de cada objeto pode ser determinada através de medidas feitas ao longo do espectro eletromagnético e pode ser representada por meio de curvas espectrais que representam o comportamento espectral dos objetos. Esta diferença na radiação refletida pelos objetos faz com que seja possível identificá-los e diferenciá-los nas imagens obtidas por sensores remotos.

Segundo Steffen (2008), o fator que mede a capacidade de um objeto de refletir a energia radiante indica a sua reflectância, enquanto que a capacidade de absorver energia radiante é indicada pela sua absorptância e, da mesma forma, a capacidade de transmitir energia radiante é indicada pela sua transmitância. A reflectância, absorptância e a transmitância geralmente são expressas em percentagem (ou por um número entre 0 e 1).

Ainda, de acordo com Steffen (2008), pode-se medir a reflectância de um objeto para cada tipo de radiação que compõe o espectro eletromagnético e então perceber que a reflectância de um mesmo objeto pode ser diferente para cada tipo de radiação que o atinge. A curva da Figura 2.8 apresenta como uma folha verde tem valores diferentes de reflectância para cada comprimento de onda, desde o azul até o infravermelho próximo. Esse tipo de curva, que mostra como varia a reflectância de um objeto para cada comprimento de onda, é denominada assinatura espectral e depende das propriedades do objeto.

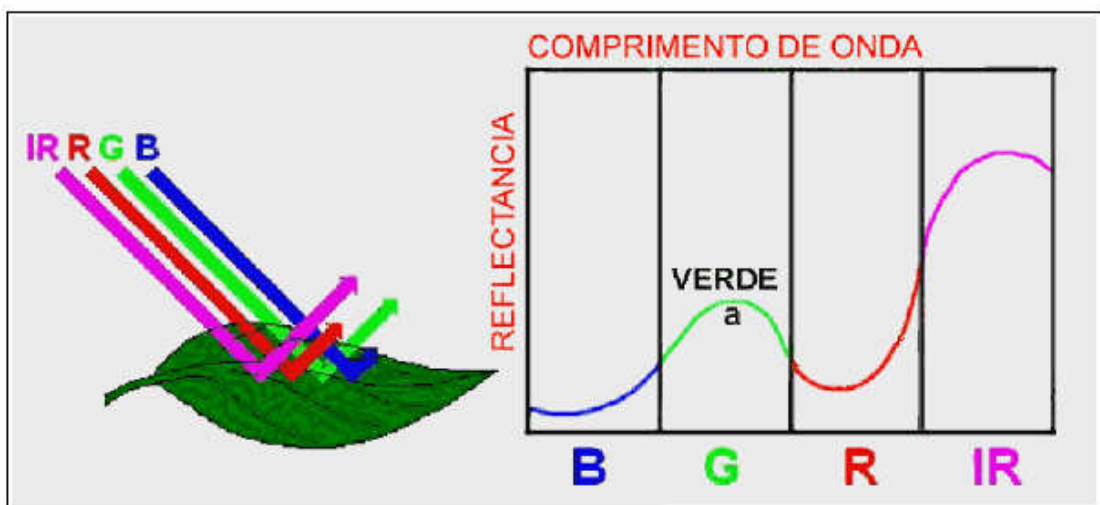


Fig 2.8 - Assinatura Espectral de uma folha verde  
Fonte: Modificado de Steffen (2008)

Deste modo, pode-se então afirmar que uma área de floresta apresenta uma radiação refletida e uma curva espectral diferente de uma área urbana, de um corpo d'água ou de uma área agrícola.

### 2.3.1. Sensores Remotos

A aquisição de dados de sensoriamento remoto é feita por meio de equipamentos eletrônicos denominados sensores remotos. Os sensores remotos captam e registram a energia refletida e emitida pelos alvos na superfície da Terra.

De acordo com Sausen (2005), um exemplo típico de sensor remoto são os olhos humanos. Através da propagação das ondas eletromagnéticas, que incidem sobre os nossos olhos, recebemos informações sobre objetos à distância. Como outros exemplos de sensores remotos podem-se citar as câmaras fotográficas, as câmaras de vídeo e os sistemas imageadores a bordo de satélites artificiais.

Os sensores, em função da fonte de energia que utilizam podem ser classificados em ativos e passivos. Ativos são aqueles que possuem sua própria fonte de energia eletromagnética, como os radares e os sensores a *Laser*. Passivos são aqueles que utilizam como fonte de energia a radiação do sol refletida ou radiação emitida pelos objetos, como os sensores óticos. A Figura 2.9 ilustra a classificação dos sensores quanto à fonte de energia utilizada.

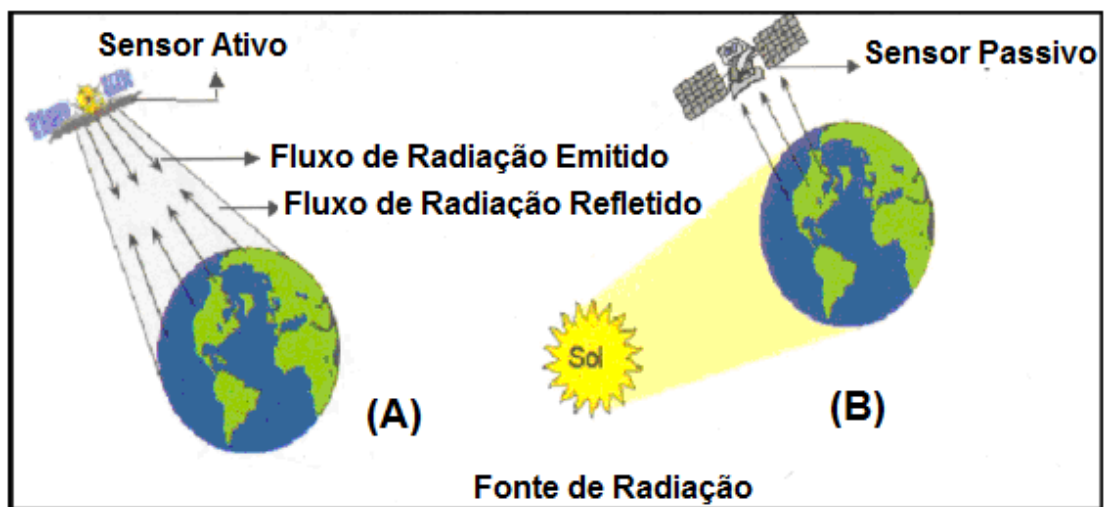


Fig 2.9 - Sensores Ativo e Passivo  
Fonte: Modificado de Moreira (2003)

Também, em função do tipo de produto que produzem, podem ser classificados em imageadores e não imageadores. Os sensores não imageadores apresentam os dados de saídas em dígitos ou gráficos como os radiômetros, ao passo que os sensores imageadores fornecem uma imagem da superfície observada, com informações sobre a variação espacial da superfície em forma de fotografias ou imagens digitais.

Os sensores do tipo radar possuem uma fonte própria de energia na faixa eletromagnética das microondas, permitindo a captura de dados tanto durante o dia quanto à noite e em qualquer condição meteorológica, incluindo tempo nublado e com chuva.

### **2.3.2. Resoluções de um Sistema Sensor**

Resolução é uma medida da habilidade que um sistema sensor possui de distinguir entre respostas que são semelhantes espectralmente ou próximas espacialmente. A resolução pode ser classificada em espacial, espectral, radiométrica e temporal.

#### **2.3.2.1 - Resolução Espacial**

A Resolução Espacial se refere ao menor elemento ou superfície que pode ser distinguida ou imageada no terreno, por um sistema sensor. Este tipo de resolução tem um papel importante na interpretação das imagens, porque nos dá o nível de detalhe das informações adquiridas pelo sensor. Por exemplo, uma resolução de 0,5 metros implica que objetos distanciados entre si a menos de 0,5 metros, em geral não serão discriminados pelo sistema.

#### **2.3.2.2 - Resolução Espectral**

Em Mather (2003), vê-se que a maioria dos sensores que operam nas faixas espectrais visíveis e infravermelhas coleta imagens multiespectrais, que são gravadas separadas em faixas espectrais distintas.

De acordo com Moreira (2003), a resolução espectral refere-se ao poder do sensor em discriminar diferentes alvos sobre a superfície. Esta possibilidade é função da largura da faixa espectral que o sensor opera.

### 2.3.2.3 - Resolução Radiométrica

A resolução radiométrica refere-se à quantidade de intensidade que pode ser detectada por um sistema sensor. Numa imagem digital a intensidade é representada por níveis de cinza. Os dados referentes a esses níveis de cinza são armazenados na forma de números binários (*bits*) e expressos como potencia de 2. Uma imagem de 8 bits ( $2^8$ ) indica que sua representação é dada por 256 níveis diferentes de cinza. Em uma imagem colorida, as cores são representadas pela soma dos três canais R (*Red*), G (*Green*) e B (*Blue*).

A Figura 2.10 apresenta os níveis de cinza utilizados na composição de uma imagem digital.

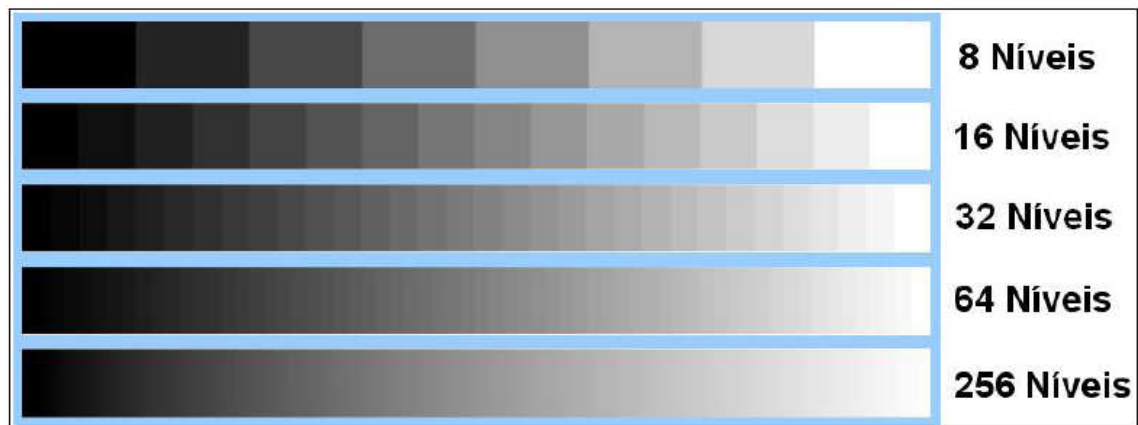


Fig 2.10 - Níveis de Cinza para uma Imagem  
Fonte: Esteio (2008)

### 2.3.2.4 - Resolução Temporal

Resolução Temporal refere-se à frequência com que são obtidas imagens de um determinado local por um determinado sistema sensor em plataforma orbital. De acordo com Mather (2003), a resolução temporal se refere ao tempo entre as datas sucessivas de aquisição de dados para um mesmo ponto na terra.

### 2.3.3. Sistema *Laser Scanner*

A descoberta e controle do *Laser* provocaram grandes saltos tecnológicos em diversas áreas do conhecimento. Na engenharia e arquitetura, por exemplo, o sistema *Laser Scanner* ou sistema de Varredura a *Laser* revolucionou a forma de se registrar informações topográficas e de detalhes construtivos.

De acordo com Sallem Filho (2007), as experiências iniciais com esta metodologia datam de 1993 e foram realizadas por um grupo de pesquisadores alemães que, posteriormente, desenvolveram um método de perfilamento a *Laser* considerado como o primeiro projeto demonstrativo da técnica.

O sistema de varredura a *Laser* pode ser instalado sobre plataformas terrestres (*Laser Scanner Terrestre*) ou aéreas (*Laser Scanner Aerotransportado*), sendo projetado para a obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos em uma superfície. Registra não somente a localização espacial, mas também a cor natural e textura do objeto alvo, além das intensidades dos raios *Laser* que são refletidos de milhares de pontos a cada segundo, em áreas mineiras, industriais e urbanas, tanto na superfície quanto em subsolo.

De acordo com Botelho *et al.* (2005), a partir dos dados obtidos pelo *Laser Scanner* é possível construir o modelo digital de superfície (MDS), obtendo-se as alturas dos objetos presentes na região imageada e o modelo digital do terreno (MDT).

A tecnologia *Laser Scanner* é tratada também por outras denominações comuns como, *LiDAR (Light Detection And Ranging)*, ou seja, detecção e medição de distância usando luz e *LaDAR (Laser Detection And Ranging)*, ou seja, detecção e medição de distância usando *Laser* (CENTENO *et al.*, 2007).

O sistema *Laser Scanner* funciona baseado na utilização de pulsos de *Laser* disparados na direção dos objetos e na captação dos pulsos refletidos dos mesmos, sem a necessidade de utilização de refletores. A tecnologia combina as vantagens de um *scanner a Laser* com as qualidades dos instrumentos de geomensura e a alta resolução de câmeras digitais panorâmicas. Assim, ao mesmo tempo, a varredura a *Laser* resulta em um levantamento fotográfico, métrico/dimensional e num modelo digital em três dimensões de altíssima precisão, com as cores originais e com as tonalidades reais dos objetos como se apresentavam sob a luz e condições climáticas na ocasião de

levantamento. Trata-se, portanto, de uma fotografia tridimensional metrificada (VEIGA, 2010).

### 2.3.3.1 - Princípios de Funcionamento e Medições

As operações de um sistema *Laser Scanner* são baseadas na geração e emissão de pulsos de *Laser* que, com auxílio de espelhos de varredura, são direcionados às superfícies dos objetos, atingindo-as em vários pontos. Estes objetos refletem os pulsos incidentes e parte deles volta para o sistema.

Dados como, intensidades dos pulsos e intervalo de tempo entre a emissão e recepção dos pulsos, são registrados, permitindo com isso que se tenha o posicionamento tridimensional dos pontos alvos. O conjunto desses dados tridimensionais é geralmente denominado nuvem de pontos, pois pode ser representado por uma densa concentração de observações no espaço tridimensional.

De acordo com Dalmolin & Santos (2004), existem basicamente dois princípios distintos de medições utilizados pelo sistema *Laser Scanner*: o princípio por triangulação e o baseado no intervalo de tempo (*Time of Flight*).

#### i) Princípio de Medição por Triangulação

Os sistemas que funcionam pelo princípio de triangulação utilizam um emissor *Laser* e uma câmara para determinar a posição do ponto do *Laser* emitido.

Um pulso de *Laser* é emitido pelo sistema e a luz refletida pelo objeto é registrada por um ou mais sensores CCD (*Charge Coupled Device*) de câmaras digitais. Esse tipo de sensor transforma a luz refletida em sinais elétricos que por sua vez, são convertidos em *bits* (*Binary digiT*) através de um circuito denominado conversor analógico/digital.

De acordo com Tommaselli (2003), o ângulo de varredura dos pulsos é registrado no sistema *Laser Scanner* a cada pulso emitido. Conhecendo-se a base fixa entre o sensor *Laser* e a câmara, determina-se a posição dos pontos refletidos pelo objeto e, utilizando os conceitos da interseção fotogramétrica, calculam-se as coordenadas tridimensionais dos pontos iluminados pelo feixe *Laser*.

A câmara, o ponto na superfície e o emissor *Laser* formam um triângulo (triangulação), como é ilustrado pela Figura 2.11.

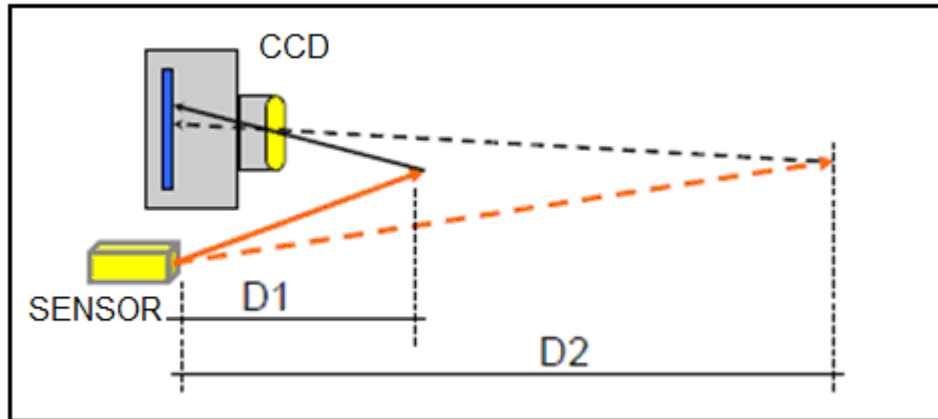


Fig 2.11 - Esquema representativo do princípio de medição por Triangulação  
 Fonte: Adaptado de Centeno *et al.* (2007)

ii) **Princípio de Medição baseado no Intervalo de Tempo (*Time-of-Flight*)**

Os sistemas que funcionam com o princípio *Time-of-flight*, baseiam-se na medição do tempo entre a emissão e o retorno do pulso refletido. A Figura 2.12 apresenta o esquema deste princípio de medição.

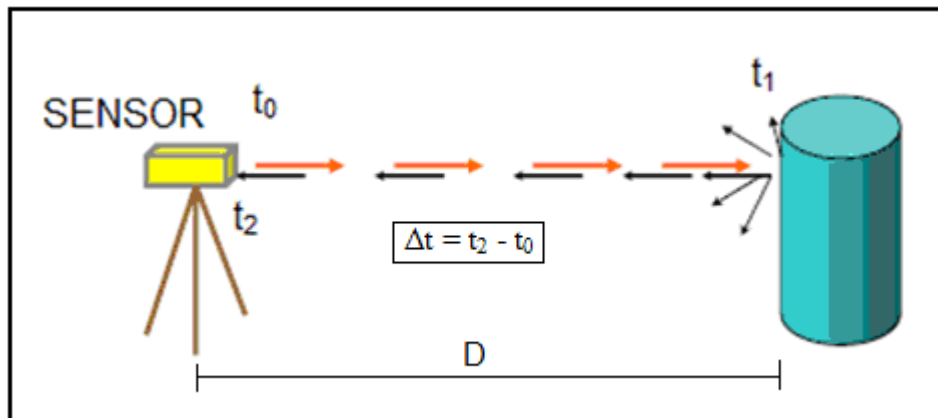


Fig 2.12 - Esquema representativo do princípio de medição (*Time-of-Flight*)  
 Fonte: Adaptado de Centeno *et al.* (2007)

Pela Figura 2.12, temos no instante:

$t_0$ : O pulso é disparado na direção do objeto;

$t_1$ : Ao atingir a superfície dos objetos, parte do mesmo é refletida na direção do sensor;

$t_2$ : No sensor, são medidos: o tempo decorrido entre a emissão e a captação do retorno (Equação 2.1) e a intensidade do retorno.

$$\Delta t: \text{Intervalo de tempo} \quad \boxed{\Delta t = t_2 - t_0} \quad (2.1)$$

A distância entre o sensor e o objeto pode ser calculada a partir do intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), decorrido entre a emissão e o registro do retorno do *Laser*. Calcula-se a distância ( $D$ ) sensor-objeto, utilizando-se a velocidade da luz ( $c \approx 300 \times 10^3$  km/s). A constante  $\frac{1}{2}$  é utilizada, pois é considerado o tempo de ida e de volta do sinal (Equação 2.2) - (WUTKE, 2006).

Velocidade ( $c$ ) = distancia ( $D$ ) / tempo ( $\Delta t$ )

$$D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta t$$

(2.2)

### 2.3.3.2 - Posicionamento dos Alvos (Pontos Atingidos)

O posicionamento dos pontos atingidos pelos pulsos *Laser* é definido através da determinação de suas coordenadas. Conhecendo-se a distância sensor/objeto e o posicionamento do sensor, por suas coordenadas, é possível determinar as coordenadas do objeto.

A seguir, pelas Figuras 2.13, 2.14 e 2.15, são demonstradas três situações de determinação das coordenadas de objetos atingidos pelos pulsos *Laser*, respectivamente:

Coordenadas bidimensionais quando o pulso *Laser* percorre uma trajetória horizontal;

Coordenadas bidimensionais quando o pulso *Laser* percorre uma trajetória inclinada em relação à horizontal. Neste caso, é conhecido o ângulo ( $\alpha$ ) de inclinação da visada e,

Coordenadas tridimensionais quando o pulso *Laser* percorre uma trajetória inclinada em relação aos três eixos do sensor. Neste caso, são conhecidos os ângulos ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ) de inclinação do sensor.

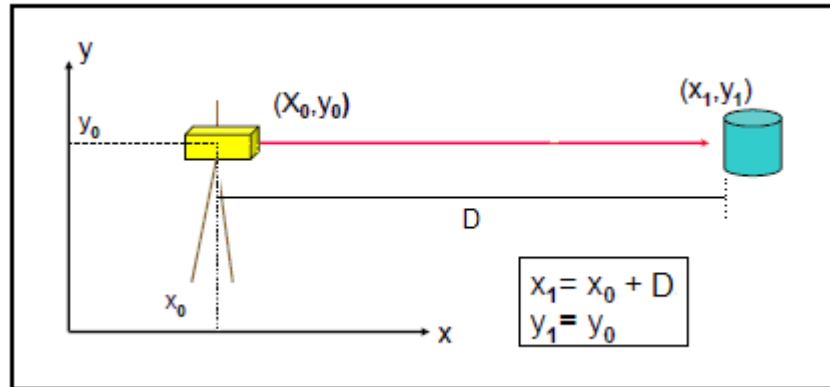


Fig 2.13 - Coordenadas bidimensionais - Trajetória horizontal  
 Fonte: Adaptado de Centeno *et al.* (2007)

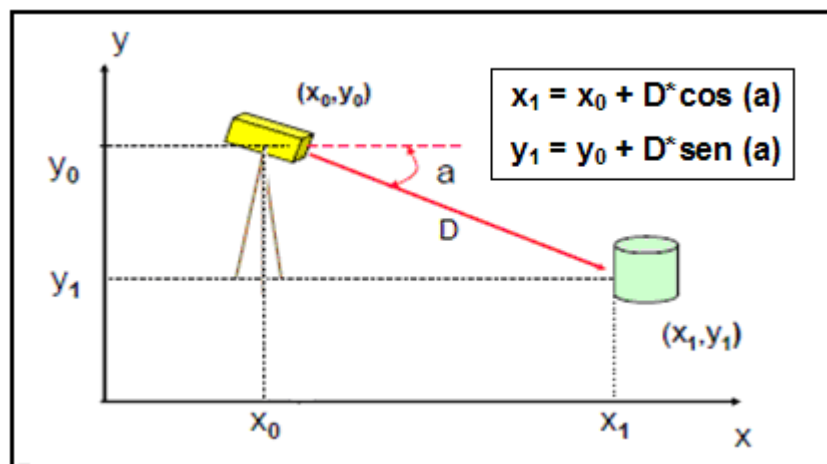


Fig 2.14 - Coordenadas bidimensionais - Trajetória inclinada  
 Fonte: Adaptado de Centeno *et al.* (2007)

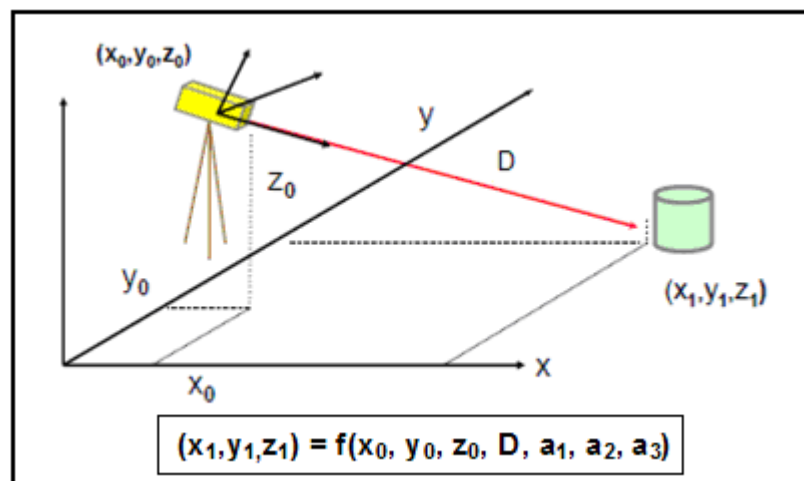


Fig 2.15 - Coordenadas tridimensionais - Trajetória inclinada  
 Fonte: Adaptado de Centeno *et al.* (2007)

### 2.3.3.3 - Características do Sistema *Laser Scanner*

Segundo Wutke (2006), a varredura *Laser* apresenta várias características importantes, como segue:

É um sistema ativo que não depende da luz visível refletida;

Realiza operação remota;

O princípio geométrico de cálculo das coordenadas pode ser a triangulação ou o intervalo de tempo, dependendo do modelo;

A resposta está disponível em tempo real. Após o término da varredura o operador tem à sua disposição milhões de pontos com coordenadas conhecidas;

O sistema fornece informações sobre os objetos, como distâncias entre peças, dimensões, volumes, verticalidade de superfícies, etc.;

Alta densidade de pontos coletados;

É possível realizar o controle de qualidade durante a coleta e refazer a varredura, caso necessário;

De operação simples e flexível; basta um operador para operar o sistema;

É possível combinar vários modelos numéricos gerados de diferentes posições, o que permite cobrir quase toda superfície visível dos objetos;

Alguns sistemas possuem *software* para a obtenção de descrições paramétricas dos objetos por ajuste à nuvem de pontos, o que permite uma acurácia ainda maior que a dos pontos isolados; além disto, devido à alta densidade de pontos as ferramentas automáticas de alguns sistemas fazem a busca pelos pontos pertencentes aos mesmos objetos ou superfícies, com pouca interação com o operador, o que aumenta substancialmente a produtividade.

### 2.3.3.4 - Áreas de Aplicações do Sistema *Laser Scanner*

O produto de um levantamento *Laser Scanner* é ideal para ser aplicado em mapeamentos topográficos, uma vez que apresenta um conjunto de pontos com suas respectivas coordenadas tridimensionais.

O sistema pode ainda, ser aplicado para diversas outras finalidades como no planejamento e desenvolvimento urbano, na implantação, gerenciamento e manutenção

de infra-estruturas, processos ecológicos, uso militar, monitoramento de monumentos históricos e obras de arte, dentre outras.

De acordo com Lima (2009), são destacadas algumas aplicações da tecnologia *Laser Scanner*, especificamente em uma mineração:

- Cubagens de desmontes;
- Controle de ângulo de talude;
- Controle dos avanços na cava;
- Levantamentos noturnos ou de minas subterrâneas;
- Cubagens de pilhas pulmão e depósito de estéril;
- Levantamento de volumes de caçambas e conchas dos equipamentos;
- Levantamentos de infra-estruturas civis como estradas e ferrovias;
- Levantamento de estruturas geológicas como falhas e dobras;
- Distinção dos contatos litológicos por cores e texturas;
- Monitoramento de cavidades, erosões, deslizamentos, etc.

#### **2.3.3.5 - Sistema *Laser Scanner* Terrestre (Estático)**

De acordo com Barchik *et al.* (2007), a tecnologia *LiDAR*, há algum tempo, vem-se tornando uma das ferramentas de grande potencial e aplicabilidade, inserida à ciência do sensoriamento remoto e suas ramificações. Sua alta capacidade de aquisição de dados, entre outras características, faz com que esta técnica vá muito além dos métodos tradicionais de levantamentos já conhecidos.

Os sistemas *LiDAR* apoiados sobre plataformas terrestres (*Laser Scanner* Terrestre ou Estático), tem ganhado seu espaço e vem provando ser um recurso eficaz nos processos de mapeamento.

O *Laser Scanner* Terrestre (LST) efetua uma varredura das feições de interesse, registrando informações tridimensionais totalmente digitais e gerando modelos densos e precisos. O baixo tempo de aquisição traz benefícios e agilidade em seu uso. Ainda, possui a vantagem de não necessitar de alvos refletivos e pode ser operado na ausência da luz.

O LST conduz à medida direta das distâncias a partir da medida do tempo entre a emissão e recepção de um pulso do *Laser* sobre uma superfície ou alvo. Estes são os mesmos princípios empregados pelos equipamentos de medição direta de

distâncias por reflexão de onda, as Estações Totais. As varreduras a *Laser*, assim como as Estações Totais, medem também os ângulos com que o feixe de *Laser* é emitido pelo instrumento, obtendo assim, com exatidão, as medidas de distâncias e as posições no espaço (RATCLIFFE & MYERS, 2006).

Um *scanner a Laser* terrestre difere de uma Estação Total pelo fato de, em vez de levantar pontos específicos, individualmente, promove a cobertura densa e automatizada de centenas de milhares de pontos, pela emissão de *Laser* com duas variações de rotação (horizontal e vertical). Com uma cobertura densa de pontos se obtém características específicas das superfícies que não seriam obtidas por outros processos de medição.

A Figura 2.16 exemplifica o sistema de varredura *Laser*, numa variação angular horizontal e vertical no momento de emissão do feixe.

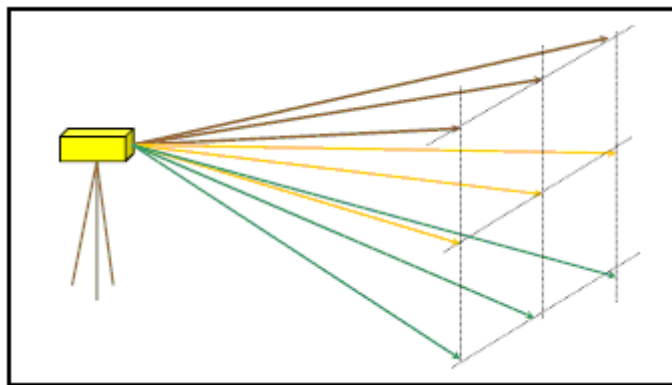


Fig 2.16 - Variação angular, horizontal e vertical, de um sistema *Laser*  
Fonte: Adaptado de Centeno *et al.* (2007)

A ausência de dados das superfícies é observada freqüentemente em varreduras do *Laser* quando, a refletância do material está abaixo do valor mínimo de detecção do sensor, em um ângulo fora da abertura angular do *scanner* ou quando há obstruções estruturais. A detecção dos sinais refletidos é função do tipo de equipamento a *Laser* e da sensibilidade do sensor. Uma instalação alternativa mais próxima do alvo pode resolver alguns problemas causados devido à baixa reflexão. Uma inspeção inicial rápida da varredura do instrumento no campo pode revelar a existência de alguns inconvenientes na captação dos dados, e uma instalação alternativa pode ser então escolhida.

Ratcliffe & Myers (2006), definem que o *scanner a Laser* é um instrumento de “exame” de um local. Sua ação e funções são altamente integradas com os trabalhos

realizados pelos topógrafos, sem necessidade de complexos treinamentos. Destacam ainda, que as explorações com *Laser* oferecem aos topógrafos vantagens operacionais que são difíceis de associarem a outras tecnologias como, por exemplo, os sistemas fotogramétricos, ou seja:

Reduzido tempo de treinamento em campo. Os conceitos, as definições das estações e pontos de amarração já são conhecidos por todos os profissionais de geomensura;

A instalação do equipamento é rápida e torna-se rotineira não havendo necessidade de calibrações no local de serviço;

Os dados georreferenciados são obtidos automaticamente no processo da medida;

Faces de taludes, pilhas estocadas e falhas estruturais não exigem a marcação com piquetes ou refletores para o geo-posicionamento exato. Esta é a principal vantagem de segurança, especialmente em um ambiente de mineração.

A estrutura física e computacional de um sistema *Laser Scanner* Terrestre é formada por um equipamento *Scanner Laser* com suas baterias e câmara digital integrada, um coletor e armazenador de dados (*notebook* ou *tablet*), cabos de conexão e os *softwares* específicos de acordo com os fabricantes dos sistemas. A estrutura é complementada por um tripé responsável pela sustentação física do *Scanner*.

A Figura 2.17 mostra a estrutura física de um sistema *Laser Scanner* Estático.



**Fig 2.17 - Estrutura física de um Sistema *Laser Scanner***  
 Fonte: <http://www.isite3d.com.br> - (acesso em 12/02/2010)

### 2.3.3.6 - Sistema *Laser Scanner* Aerotransportado

A tecnologia *LiDAR*, graças ao desenvolvimento e aos avanços alcançados por outras áreas da ciência, vem ampliando substancialmente o conjunto de técnicas e sistemas de medição. Tal tecnologia compreende, entre outras, a técnica de varredura *Laser* aerotransportada, também conhecida como técnica ALS (*Aiborne Laser Scanning*).

O sistema é instalado em uma plataforma móvel, geralmente uma aeronave, que sobrevoa a superfície do terreno, obtendo assim, dados necessários para a modelagem tridimensional da superfície.

Apesar da tecnologia *LiDAR* já existir a mais de três décadas, apenas na última, os sistemas de varredura *Laser* aerotransportados conseguiram atingir o nível de desenvolvimento e eficácia que os tornou capazes de competir com processos tradicionais de obtenção de dados espaciais, como por exemplo, os levantamentos aerofotogramétricos.

Segundo Brandalize (2003), o sistema *Laser Scanner* Aerotransportado foi introduzido no Brasil em 2001, quando uma empresa nacional de aerolevantamentos adquiriu o primeiro sistema ALS comercial da América do Sul. A partir de então, esta técnica vem sendo empregada como meio de agilizar a coleta de dados de elevação e o consequente processo de geração de MDT em diversos serviços de mapeamento.

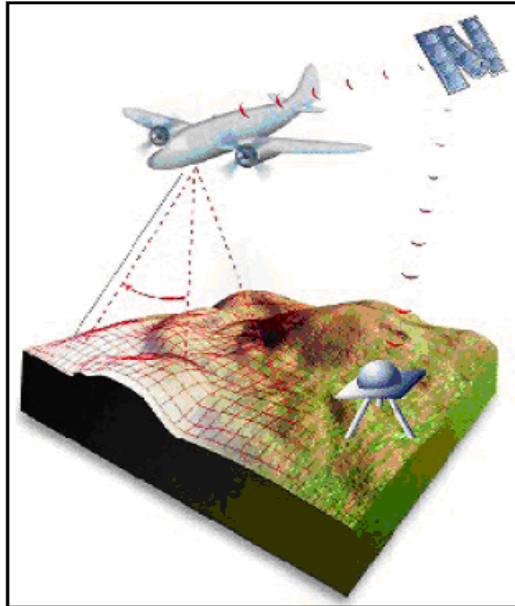
A precisão nominal do sistema é de +/- 15 cm para a altimetria e para o posicionamento planimétrico, o fator  $H/2000$  (onde  $H$  é a altura de vôo em metros) estima a precisão nominal, ou seja, para altura de vôo de 1000 m, o erro médio quadrático esperado é de +/- 50 cm (BOTELHO, 2007).

O pulso *Laser* de um sistema *LiDAR* tem uma frequência muito próxima do infravermelho, portanto, qualquer obstrução de luz visível também se torna uma obstrução para o *Laser*. Em determinadas condições de névoa ou chuva fina, onde a passagem de luz é possível, o sistema opera.

De acordo com Burtch (2002), sobre a água, o sinal infravermelho é parcialmente absorvido, resultando em quase nenhum retorno do sinal. Porém, em sistemas batimétricos são usados sinais *Laser* da porção azul-verde do espectro eletromagnético que penetram na água e permitem também a captura dos retornos dos sinais.

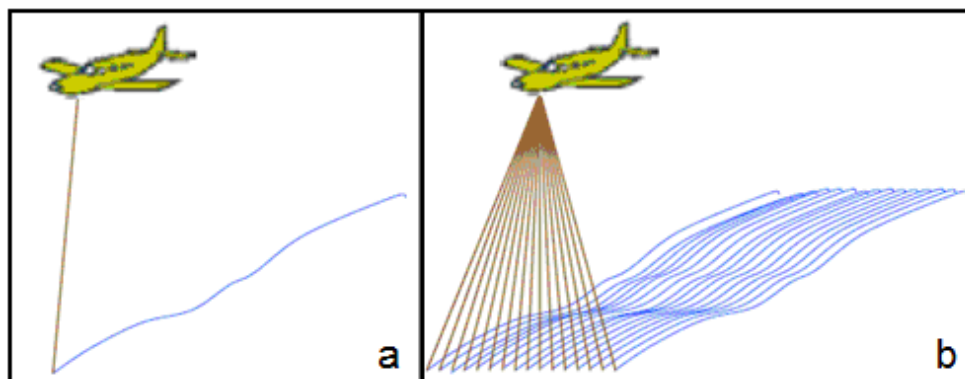
Conforme Dias & Brito (2007), o alto índice de penetração de feixes *Laser* na vegetação permite o mapeamento, com grande precisão, mesmo em região de mata fechada como a Mata Amazônica, por exemplo.

A Figura 2.18 mostra um esquema de um sistema ALS.



**Fig 2.18 - Estrutura de um levantamento aerotransportado a Laser**  
**Fonte: Sallem Filho (2007)**

A emissão dos pulsos *Laser* (varredura) é feita no sentido transversal à direção da linha de vôo, com o ângulo de divergência configurável pelo sistema, permitindo a determinação da largura da faixa abrangida pelo *Laser*. Se o feixe fosse emitido em apenas uma direção (p.ex.: ao longo da direção de vôo) apenas um perfil do terreno seria obtido. Portanto, para se obter as informações altimétricas ao longo de uma faixa de terreno, é necessário direcionar o feixe *Laser* no sentido perpendicular à direção de vôo. A Figura 2.19 (a e b) apresenta as duas situações.



**Fig 2.19 - Direções de emissão do feixe Laser**  
**Fonte: Adaptado de Centeno et al. (2007)**

Com a realização do vôo, o sistema obtém dados brutos com informações tridimensionais de vegetação, estruturas e terreno sobrevoados. Esses dados são de posição, orientação da aeronave e de cada pulso emitido e intervalos de tempo (medida *Laser*). Os dados são posteriormente integrados, gerando um grande conjunto de pontos que devem ser processados para modelar a superfície do terreno tridimensionalmente (SCHAFER & LOCH, 2005).

A Figura 2.20 apresenta um fluxograma das etapas a serem desenvolvidas em um aerolevanteamento *Laser*, envolvendo atividades de campo, vôo e tratamento de dados.

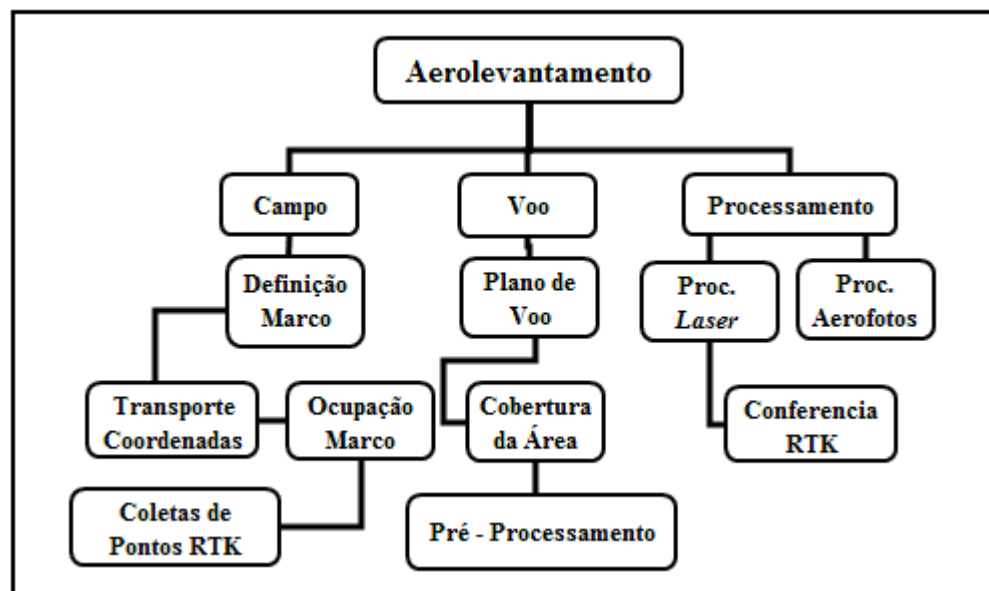


Fig 2.20 - Etapas de um levantamento aerotransportado a *Laser*  
 Fonte: Modificado de GEOID (2009)

Os trabalhos de um aerolevanteamento *Laser* compreendem três etapas: os serviços de campo, o sobrevôo à área e a etapa de processamento dos dados.

Em campo, sobre um marco georreferenciado, é instalado um aparelho GPS para a coleta de dados, pelo método estático, necessários para o pós-processamento dos dados GPS da aeronave e para o georreferenciamento dos pontos coletados pelo sistema *Laser Scanner*. Caso na região, não exista marcos georreferenciados, é necessário que se proceda ao transporte de coordenadas, definindo assim, uma base de referencia. São também coletados em solo, alguns pontos GPS destinados a conferencia e validação dos pontos *Laser*.

A etapa de sobrevôo compreende o plano de vôo, previamente definido em função das características e objetivos do trabalho e um pré-processamento durante o vôo, destinado à verificação da existência ou não de falhas operacionais do sistema *Laser*. Se detectado algum tipo de falha no sistema, antes do pouso, é feita nova varredura à região.

A última etapa envolve o processamento dos dados GPS (solo e aéreo), dos pontos *Laser* e das aerofotos, assim como, a obtenção dos produtos finais.

Como produtos finais de um aerolevanteamento *Laser Scanner*, podem ser obtidos:

Pontos *Ground* - pontos de representação do solo;

Pontos Elevação - pontos de representação das elevações (vegetação, edificações etc.);

Pontos Ground/Elevações - ponto de representação da superfície (MDS);

Imagem Intensidade - gerada a partir dos valores de intensidade dos pulsos refletidos;

Imagem Hipsométrica - representação de zonas de altitudes;

Imagem Bicolor (Áreas em amarelo: solo e áreas em verde: vegetação e edificações);

Curvas de Nível de até 0,20 x 0,20 m.

#### **2.3.4. Fotogrametria**

De acordo com Brito (2007) a fotogrametria é uma tecnologia através da qual se obtém informações sobre objetos físicos e a superfície terrestre, por meio de medições e interpretações de imagens e energia eletromagnética radiante.

A fotogrametria tem como objetivo principal a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço objeto, a partir de imagens bidimensionais, chamadas de espaço imagem. Entende-se por espaço objeto qualquer elemento, ou conjunto de elementos tridimensionais a serem imageados e por espaço imagem, tudo aquilo que é registrado por uma câmara.

Trata-se, então, de uma transformação entre o sistema bidimensional, definido por coordenadas de calibração de cada câmara, e o sistema tridimensional, no caso mais

comum, representado pelas coordenadas do terreno sobre o qual se obtém as imagens. Para essa transformação é necessário a utilização de um conjunto de pontos de controle no espaço objeto que, uma vez locados no espaço imagem fornecem parâmetros de relação entre os sistemas.

#### **2.3.4.1 - Fotogrametria Digital**

De acordo com Ribeiro (2002), “A Fotogrametria Digital é a parte da fotogrametria que trata dos aspectos geométricos do uso de fotografias, com a finalidade de obter valores precisos de comprimentos, alturas e formas, baseando-se no uso de imagens digitais, armazenadas em meio magnético, na forma de pixels. Ela é totalmente baseada no princípio da estereoscopia e na orientação analítico-digital das fotos”.

Em Fotogrametria Digital trabalha-se com imagens no formato digital (*softcopy*). A obtenção das imagens digitais pode ser através de *scanners* de alta precisão geométrica e fidelidade de cor ou, diretamente, a partir de câmaras digitais.

A automatização na fotogrametria digital é quase que completa, devido a equipamentos de informática que permitem o rápido processamento do grande volume de dados envolvidos. Mesmo assim, os processos ainda exigem a supervisão e eventual intervenção humana.

#### **2.3.4.2 - Aerofotogrametria**

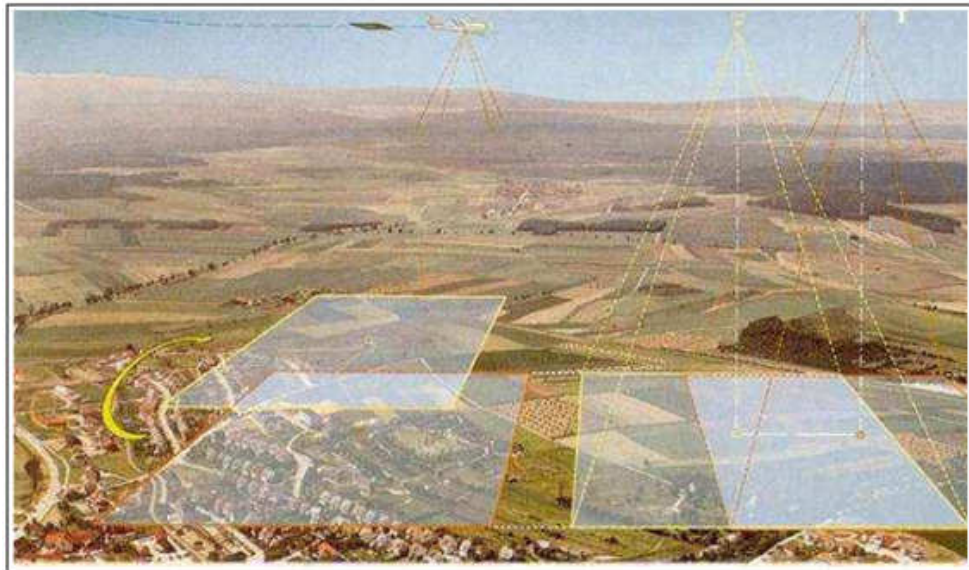
A Fotogrametria aérea ou Aerofotogrametria é uma subdivisão da fotogrametria, na qual as fotografias do terreno são tomadas por uma câmara de precisão instalada em uma aeronave (TOMMASELLI, 2009).

De acordo com Santos (2010), pela aerofotogrametria a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos sobre a superfície terrestre baseia-se do princípio da visão ocular do ser humano que, por um sistema binocular, visualiza a profundidade dos objetos no espaço físico. As informações armazenadas na retina dos olhos são transmitidas ao cérebro que as funde, fazendo com que o ser humano visualize tridimensionalmente os objetos.

Similarmente, funciona o princípio da fotogrametria, ou seja, as fotografias são obtidas em série, ao longo de uma faixa de vôo, com sobreposições longitudinais e

laterais em relação à sua fotografia sucessiva, possibilitando a reconstrução tridimensional dos objetos ou a medição de suas posições planimétrica e altimétrica. Deste princípio tem-se a denominação de recobrimento estereoscópico entre duas fotografias, que é chamado par estereoscópico ou estéreo par de fotografias.

A Figura 2.21 apresenta as sobreposições de fotografias em um levantamento aerofotogramétrico.



**Fig 2.21 - Sobreposição longitudinal e lateral em vôo fotogramétrico**  
**Fonte: Redweik (2007)**

Ainda segundo Santos (2010), usualmente, o recobrimento longitudinal varia de 60% a 65% com sobreposição lateral mínima de 10% entre duas fotografias tomadas com câmaras métricas convencionais.

Convencionou-se chamar de câmara fotogramétrica, a câmara que possui como característica especial um maior rigor métrico na definição de seus parâmetros, propiciando assim, a extração precisa de informações métricas das imagens adquiridas.

As câmaras fotogramétricas aéreas devem permitir a tomada de uma grande quantidade de fotos em uma seqüência muito rápida, mantendo as mesmas especificações. Como esta seqüência de fotos deve ocorrer enquanto a aeronave se move, normalmente em alta velocidade (acima de 200 km/h), a câmara deve ter um ciclo de funcionamento muito rápido, com lentes rápidas e obturadores eficientes, além de serem resistentes às variações nas condições de temperatura e vibrações (TOMMASELLI, 2009).

Toda câmara fotogramétrica vem acompanhada de um certificado de calibração, ou seja, um documento que atesta os valores precisos de determinados parâmetros fundamentais, que serão utilizados nos processos fotogramétricos posteriores. Em geral, as informações que constam nos certificados de calibração das câmaras são:

- Coordenadas do ponto principal;
- Distância focal calibrada;
- Coordenadas das marcas fiduciais;
- Coeficientes para correção das distorções e respectivos desvios padrão.

#### **2.3.4.3 - Estereoscopia**

Segundo Santos (2010), estereoscopia é um fenômeno natural que ocorre quando se observam, simultaneamente, duas imagens fotográficas de uma mesma cena, tomadas a partir de duas estações diferentes, com as devidas sobreposições. Associado a esse conceito, o citado autor define Visão Estereoscópica como sendo a sensação de profundidade que pode ser obtida através de processo binocular ou método estereoscópico.

Para que duas fotografias formem um par estereoscópico é necessário que sejam satisfeitas as seguintes condições:

A partir de centros de exposição diferentes, devem abranger, em sua totalidade ou parcialmente, a mesma área;

Os eixos da câmara, em cada exposição do par, devem ser aproximadamente coplanares;

A distância entre as estações de exposição (base) não deve ser muito grande se comparada com a distância do objeto;

As fotografias devem ter aproximadamente a mesma escala (variação de até 5%).

Em aerofotogrametria a modelagem digital do terreno pode ser obtida utilizando pares estereoscópicos da região de interesse.

#### 2.3.4.4 - Restituição Fotogramétrica

De acordo com Sato (2009), a restituição fotogramétrica objetiva a interpretação das diversas feições presentes no terreno, extraíndo-as geograficamente referenciadas (coordenadas no espaço-objeto), de modo a compor a base cartográfica daquela região, em uma dada escala.

Para a edição de cartas topográficas de precisão é necessário reconstruir a posição exata de cada fotografia no momento da exposição. Esse procedimento, conforme Temba (2000), é conhecido como Orientação Interior do modelo estereoscópico.

Pela orientação interior é promovida a reconstrução do feixe perspectivo, ou seja, o referenciamento da imagem em relação à câmara. Inicialmente, as imagens obtidas encontram-se independentes uma das outras, sendo salvas em arquivos digitais, sem nenhuma informação métrica, isto é, utilizando apenas o sistema de coordenadas em pixels, próprio das imagens digitais. Para que haja uma correlação entre essas imagens, faz-se necessário reconstituir o sistema interno câmara-imagem correspondente ao momento em que as fotografias foram obtidas. Somente assim, poderão ser efetuadas medidas com precisão sobre as imagens fotográficas.

Em fotogrametria digital, a orientação interior é realizada a partir do cálculo dos parâmetros de transformação entre os sistemas de coordenadas da imagem digital (linha e coluna do *pixel*) e o sistema fotográfico (métrico). Após a orientação interior é possível, dado qualquer ponto na imagem digital, imediatamente ter suas coordenadas no sistema métrico da câmara, que é altamente rígido e preciso, pois se baseia em parâmetros de calibração da mesma.

Outra etapa necessária para a edição de cartas topográficas de precisão é a aplicação de procedimentos para uma segunda orientação, ou seja, o relacionamento entre as imagens de um mesmo vôo com o espaço objeto, conhecida como Orientação Exterior. O principal objetivo da orientação exterior é a obtenção da posição e atitude de cada foto em relação ao referencial do espaço objeto. Uma imagem estará orientada exteriormente se forem conhecidos os seis parâmetros de orientação exterior, ou seja: as coordenadas no espaço objeto do centro de perspectiva ( $X_o$ ,  $Y_o$  e  $Z_o$ ) e os ângulos de rotação ou atitude do sensor ( $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$ ). Essas incógnitas são determinadas através da aplicação das equações de colinearidade e as coordenadas tridimensionais no sistema de

espaço-objeto, para qualquer ponto que esteja na área de superposição de um par de imagens, são determinadas pela aplicação do algoritmo Interseção Espacial.

Após as aplicações dos processos de orientação das imagens, outros processos podem ser aplicados às mesmas, tais como:

Aerotriangulação - que permite a obtenção de coordenadas de vários pontos no terreno a partir da interpolação de apenas alguns pontos de campo;

Retificação - que consiste em projetar a imagem, segundo seu próprio feixe perspectivo, para um plano horizontal, eliminando assim, as distorções causadas pelos ângulos de atitude da câmara;

Normalização - Diferentemente da retificação, que é feita imagem a imagem, a normalização é “orientada” ao par estereoscópico, porém sem restringir-se à área de superposição das imagens.

Uma imagem fotogramétrica estará preparada para a restituição fotogramétrica após as aplicações dos processos descritos.

#### **2.3.4.5 - Aplicações, Produtos e Vantagens da Fotogrametria**

Várias são as aplicações para a fotogrametria, dentre as quais se podem mencionar a produção de cartas topográficas, projetos, planejamentos e manutenções de estradas, inventários florestais e minerais, aplicações em arqueologia, geologia, planejamento e cadastro urbano, cadastro rural, etc.

Os principais produtos fotogramétricos são fotografias aéreas, mosaicos, ortofotografias, ortofotomosaicos e ortofotocartas, cartas planimétricas, cartas topográficas, mapas temáticos, modelo digital do terreno e de superfícies.

A Fotogrametria apresenta uma série de vantagens sobre os processos diretos de medição, tanto para mapeamento quanto para outras aplicações, como: o objeto a ser medido não é tocado (sensoriamento remoto), a aquisição dos dados é rápida, os fotogramas armazenam grandes quantidades de informações semânticas e geométricas, as fotografias são documentos legais relativos à época de sua tomada, podem ser medidos movimentos e deformações, os fotogramas podem ser medidos a qualquer momento que se desejar, podendo-se repetir a medida várias vezes, a precisão pode ser aumentada de acordo com as necessidades particulares de cada projeto, superfícies complicadas podem ser facilmente determinadas, etc. (DEMARQUI, 2010).

### 2.3.5. Pós-Sinalização

A Pós-Sinalização é uma tecnologia que se apresenta como uma solução complementar às técnicas convencionais de topografia e aerolevantamentos em mapeamentos terrestres.

Esta tecnologia tem como foco auxiliar na operação de apoio de campo, aerotriangulação e complementação topográfica em serviços de aerolevantamentos, além de solucionar problemas existentes em outras técnicas de levantamentos topográficos, como: defasagens de tempo, densidade de informações, áreas de difícil acesso ou com restritos ângulos de visada, com aplicação restrita a pequenas e médias áreas.

A Pós-Sinalização pode ser caracterizada como uma solução híbrida Terrestre/Aérea para as atividades de monitoramento e mapeamento terrestre. O conjunto de dados coletados em solo é associado a imagens panorâmicas (inclinadas) obtidas por câmeras métricas digitais de pequeno formato, que são acopladas a uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), que sobrevoa, de forma não estruturada, a região de interesse a baixas alturas. O controle da ARP, bem como da coleta de dados, são feitos através de sistema de controle remoto por um operador posicionado em solo.

As atividades aéreas são realizadas em alturas entre 30 e 150 metros em relação ao nível de decolagem, a distâncias máximas de 500 metros do controlador de vôo, podendo ser realizada em condições climáticas adversas, como em períodos de chuva e neblina, com grande cobertura de nuvens, céu parcialmente ou totalmente encoberto. O período de tempo envolvido em cada coleta de dados é em torno de 10 minutos.

De acordo com Huguet (2003), a metodologia empregada pela Pós-Sinalização consiste na utilização de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) para gerar informações que são utilizadas no desenvolvimento do processo de reconstrução geométrica a partir de blocos de ajuste de imagens inclinadas de pequeno formato. A estratégia adotada é a de se utilizar dados de pontos de apoio e técnicas de segmentação de objetos, sobre as cenas captadas, para guiar o processo de reconstrução.

O processo pode ser desmembrado em quatro etapas, a demarcação do apoio em campo (aproximadamente 1 ponto por hectare), a coleta de múltiplas imagens inclinadas sobre a área, a reconstrução geométrica utilizando estereoscopia múltipla a

partir de ajuste em bloco de imagens inclinadas e segmentação de objetos, e uma pós-correção do modelo através do conhecimento de suas características básicas. O resultado obtido é analisado numericamente e visualmente, através de técnicas de Visão Computacional e PDI.

As técnicas de processamento digital de imagens encontradas na literatura como segmentação, estereoscopia e retificação de imagens, são alteradas de seus métodos tradicionais e aplicadas na reconstrução geométrica das imagens utilizadas na Pós-Sinalização.

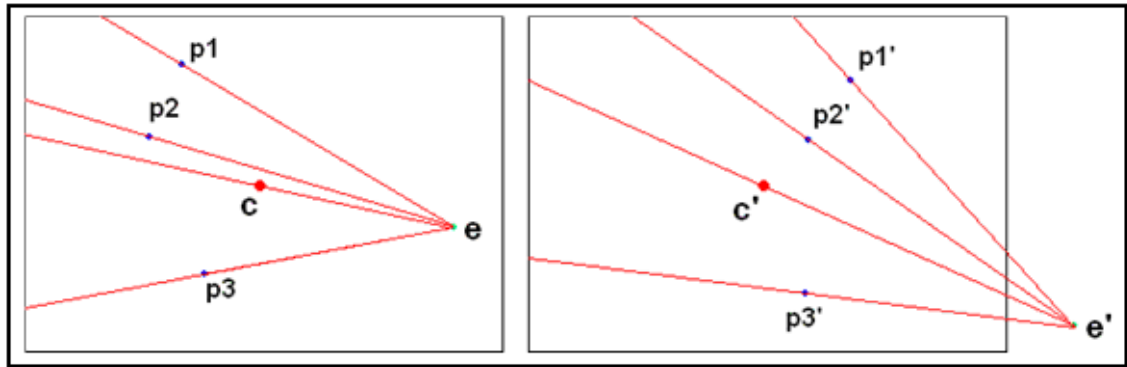
O método *watershed segmentation*, faz parte de uma classe de técnicas que tratam a imagem como uma superfície 3D, onde as elevações são correlacionadas com valores de intensidade do pixel. A técnica de segmentação utilizada na Pós-Sinalização é uma variação da segmentação por *watershed*, onde são adicionadas informações referentes à textura dos objetos, cor e intensidade. Os resultados de segmentação das imagens são então, utilizados como forma de direcionar os métodos de estereoscopia aplicados.

Por meio da estereoscopia múltipla fazem-se correlações entre pixels de várias imagens (vários pares estéreos sobrepostos), gerando correlações e possíveis pontos altimétricos. Os resultados são dispostos em imagens de disparidade, contendo tanto informações úteis, como erros. Durante o processo são geradas imagens retificadas baseadas em linhas epipolares que são, posteriormente, utilizadas para eliminar os erros apresentados, auxiliar no isolamento das informações úteis e na adequação ao apoio de campo.

Linhas epipolares são aquelas formadas por pontos de uma imagem e o ponto chamado de epípólo presente na mesma. Um epípólo é o ponto em uma imagem, onde o centro de seu par seria visto.

Cada linha epipolar de uma imagem tem uma linha correspondente na outra imagem de cada par.

A Figura 2.22 mostra os pontos centrais ( $c, c'$ ), epípólos ( $e, e'$ ) e pontos comuns ( $p_1, p_1'$ ;  $p_2, p_2'$ ;  $p_3, p_3'$ ) entre as imagens de um par estéreo.



**Fig 2.22 - Linhas epipolares**  
**Fonte: Modificado de Huguet (2003)**

Os múltiplos pares de imagens retificadas são uma simplificação para o processo de obtenção da disparidade por múltipla combinação estéreo, que é executado combinando-se diversos pares de linhas epipolares.

Os mapas de disparidade identificam o mapeamento espacial entre os pixels de diversos pares de imagens retificadas. Esse mapeamento pode ser realizado independentemente para cada par de linhas retificadas, ou seja, a disparidade é apenas o deslocamento horizontal relativo entre cada par de pixels. O problema central da estereoscopia, auxiliado pela combinação de múltiplos pares, é justamente descobrir qual o deslocamento válido para cada pixel, com maior precisão e minimização dos erros.

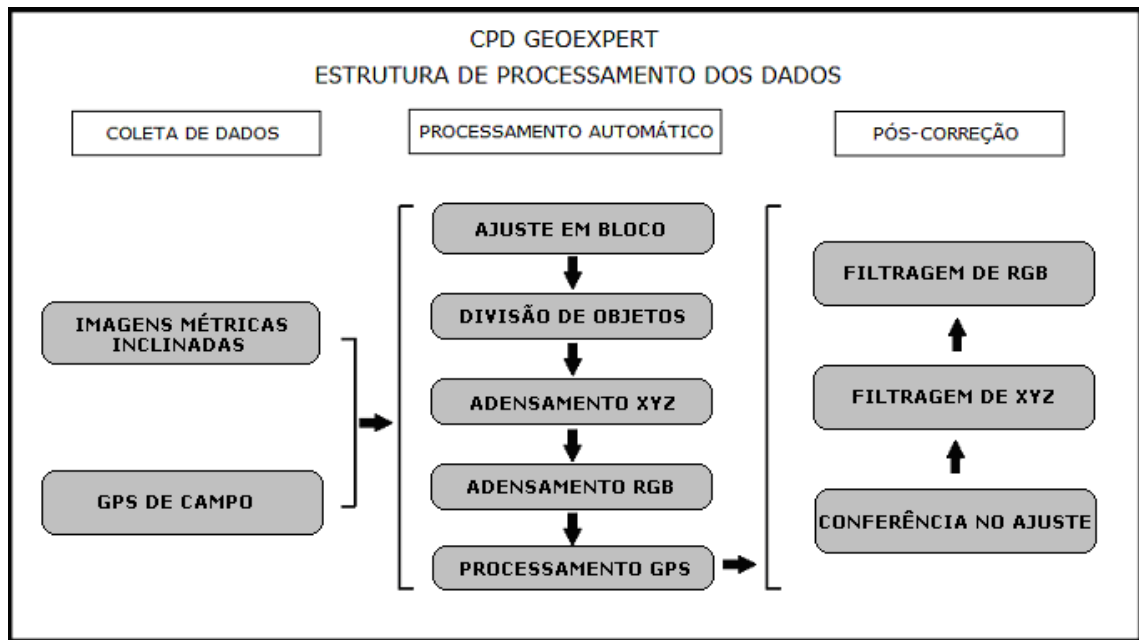
Durante a conferência e seleção das informações adequadas, nos múltiplos pares estéreo, são cadastrados os diversos pontos de apoio feitos em campo, a partir da representação física de cada ponto nas respectivas imagens. Através deste cadastro é feita a adequação das nuvens de pontos, obtidas a partir da extração automática e já filtradas, em áreas restritas de ajuste, permitindo o alcance de uma maior precisão nas coordenadas XYZ finais dos mesmos.

Informações complementares são encontradas em HUGUET (2003).

Todas as etapas de processamento dos dados de campo são administradas pela Central de Processamento de Dados - CPD *Geoexpert* que, de acordo com Oliveira (2009), foi desenvolvida para ser um sistema automático com o mínimo de intervenção humana. O sistema recebe como dados de entrada fotos brutas e parâmetros de posicionamento e, com uma estrutura de processamento em paralelo, permite que várias

Unidades Centrais de Processamentos (CPU) trabalhem em cada imagem ao mesmo tempo. Como dados de saída, o sistema gera Modelos Digitais de Superfície, Modelos Digitais de Terrenos e Ortofotos.

A Figura 2.23 mostra o fluxograma com as etapas de coleta, processamento automático e pós-correção de dados, específicas para aplicação da tecnologia de Pós-Sinalização.



**Fig 2.23 - Fluxograma de aplicação da tecnologia Pós-Sinalização**  
**Fonte: Cortesia HGT Geoprocessamento**

Na Etapa de coleta de dados em campo, são obtidas imagens inclinadas das áreas alvo. Essas imagens são obtidas por um par de câmeras com lente intercambiáveis, devidamente calibradas. Ao todo a capacidade de coleta de dados do sistema é de 37 MP, dispostos em 3 CCD, 2 de 16 MP e 1 de 5 MP. Os dados obtidos pelo GPS de campo (*rover*) são coletados a uma distância máxima de 5 km da base de referencia, com tempo de rastreamento mínimo de 5 minutos, para dados com precisão superior a 5 cm.

Na etapa de processamento automático são promovidos os ajustes em bloco das imagens, que são divididas em pares estéreos e realizados os ajustes epipolares. Posteriormente, os pares de imagem com áreas coincidentes são ajustados em um bloco, chamado de bloco de ajuste, ainda sem o uso dos pontos de apoio. O cálculo altimétrico é feito utilizando ao mesmo tempo as “n” linhas epipolares coincidentes a partir dos “n” pares utilizados no ajuste em bloco, garantindo maior precisão e eliminação de erros no

processo, obtendo-se “n” imagens de disparidade para cada bloco. Após o cálculo altimétrico automático é feita a correspondência de cor RGB a cada informação XYZ mapeada. Como última etapa de ajuste são cadastrados os pontos de apoio, a partir dos quais é feito o ajuste final das coordenadas XYZ obtidas, com correspondência às posições mapeadas para os apoios.

Na etapa de pós-correção os múltiplos pares estéreos de cada bloco são abertos de forma coincidente, em paralelo para uso por um operador manual, que através de foto-interpretação e estéreo-restituição deverá isolar os pontos válidos dos erros visíveis do processo, gerando assim, os produtos e sub-produtos, como modelo de terreno, modelo de superfície, curvas de nível, curvas de superfície, pé e crista.

Nesta fase, tem-se a responsabilidade final pela consolidação da qualidade dos produtos a serem obtidos.

A tecnologia de Pós-Sinalização pode ser empregada com as mais diversas finalidades dentre as quais, destacamos:

O adensamento de pontos com conseqüente aumento no nível de detalhamento em levantamentos topográficos;

Complementação de área mapeada e aumento de detalhamento Fotográfico;

Mapeamento de áreas de Risco e de difícil acesso humano;

Mapeamento de erosões, encostas, vales e locais com grandes irregularidades topográficas, respeitando detalhes de áreas como inclinações negativas.

Validação de aerolevantamentos e projetos topográficos já realizados.

## **2.4 MODELO DIGITAL DE TERRENO**

De acordo com Li *et al.* (2005), um Modelo Digital do Terreno é um modelo matemático (ou digital) da superfície do terreno. Emprega-se uma ou várias funções matemáticas para representar a superfície de acordo com métodos específicos e em função do conjunto de dados existentes. Essas funções matemáticas são referidas, geralmente, como funções de interpolação.

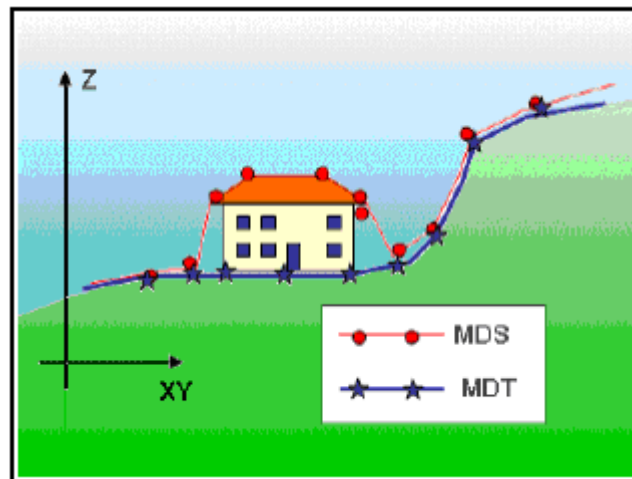
A representação do relevo ou terreno, em formato digital, é uma componente fundamental em um processo cartográfico e consiste de um conjunto de dados que

explicitam as coordenadas (X, Y, Z) do terreno e a forma como os mesmos estão relacionados.

A determinação e utilização de MDT vêm crescendo continuamente nos últimos anos devido ao desenvolvimento tecnológico computacional, através da computação gráfica e tecnologias de imageamento. Associados a esses desenvolvimentos, destacam-se o aumento da velocidade com que os dados relativos à superfície terrestre são adquiridos e tratados, devido à crescente evolução dos equipamentos e sensores utilizados para esse fim, e os *softwares* de apresentação e visualização dos modelos de terrenos.

Também há de se considerar o Modelo Digital de Superfície (MDS) como um produto da aplicação das mais avançadas técnicas de levantamento topográfico, onde as altitudes de superfícies elevadas, como copas de árvores e telhados são amostradas.

Esclarecendo a diferença entre um MDT e um MDS, Abreu (2005), explica que o MDT armazena as altitudes apenas dos pontos na superfície do terreno, ao passo que no MDS são incluídos outros objetos de superfície tais como árvores e edificações. A Figura 2.24 ilustra um exemplo de MDT e MDS.



**Fig 2.24 - Diferença entre MDT e MDS**  
**Fonte: Centeno & Mitishita (2007)**

Na Cartografia, o MDT é utilizado para a geração de ortofotos, mapas topográficos, curvas de nível etc. O modelo digital do terreno, também tem aplicações em outras áreas, como por exemplo, na engenharia civil, mineração, mapeamento batimétrico, mapeamento geológico e geofísico, simulação e visualização do terreno, engenharia militar, entre outras.

Felgueiras & Câmara (2006), dentre algumas utilizações do MDT apontam:

Armazenamento de dados de altimetria para mapas topográficos;  
Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;  
Elaboração de mapas de declividade e exposição para apoio a análise de geomorfologia e erodibilidade;  
Determinação de volumes;  
Planejamento urbano;  
Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;  
Apresentação tridimensional.

Neste trabalho, as conformações físicas das pilhas de minério estocado são tratadas como MDT, uma vez que, apesar de estarem sobre um terreno “primitivo”, constituem superfícies sobre as quais são possíveis presenças e movimentações de pessoas e equipamentos.

#### **2.4.1. Fases de uma Modelagem Digital de Terreno**

##### **2.4.1.1 - Aquisição dos dados**

Os dados de modelo digital de terreno estão representados pelas coordenadas  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , onde  $Z$ , a coordenada a ser modelada, é função de  $XY$ , ou seja:  $Z = f(X,Y)$ . Estes dados são usualmente adquiridos segundo uma distribuição irregular no plano  $XY$ , ou ao longo de linhas com mesmo valor de  $Z$  (isolinhas) ou mesmo, por uma distribuição com espaçamento regular.

A aquisição dos dados de referencia (amostragem) pode ser realizada por levantamentos de campo (Estação Total, GPS), digitalização de mapas, captações fotogramétricas a partir de modelos estereoscópicos e por aplicação direta de técnicas de sensoriamento remoto (*laser*).

Na amostragem, a densidade de pontos deve ser tal que represente fielmente a superfície. Ela é função do espaçamento entre os pontos de solo, de maneira a representar todos os detalhes de feições da superfície e das elevações.

Os MDT não são elaborados apenas pelos dados amostrados, mas também a partir dos modelos gerados no formato de grade regular ou irregular. Estes formatos

simplificam a implementação dos algoritmos de aplicação e os tornam mais rápidos computacionalmente.

#### **2.4.1.2 - Geração de Grades**

A elaboração do modelo de uma superfície consiste no agrupamento dos pontos que descrevem a superfície real, em unidades lógicas denominadas de estruturas de dados e na determinação de funções de interpolação, de forma que todo o conjunto simule de modo idealizado o comportamento da superfície original (ABREU, 2005).

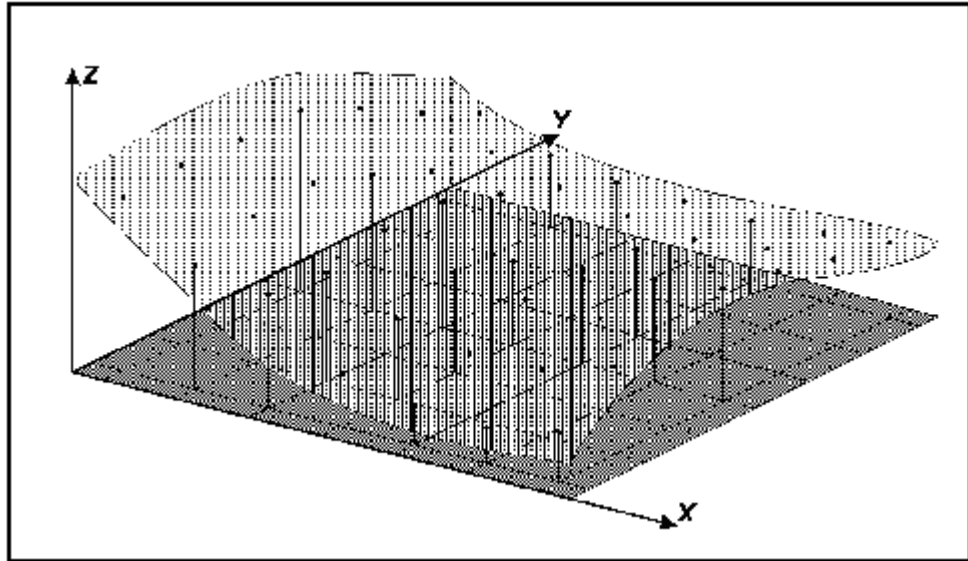
De maneira geral os pontos amostrados são interligados formando polígonos e estes formam um poliedro. As técnicas de interligações mais empregadas, ou seja, as estruturas de dados são a grade regular e a malha irregular de triângulos (*Triangular Irregular Network* - TIN).

##### **i) Grade Regular**

A grade retangular ou regular é um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares. Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos amostrados caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas posições XY que definem a grade desejada.

A geração de grade regular ou retangular deve ser efetuada quando os dados amostrados na superfície não são obtidos com espaçamento regular. Assim, a partir das informações contidas nas isolinhas ou nos pontos amostrados, gera-se uma grade que representa de maneira mais fiel possível a superfície. Os valores iniciais a serem determinados são os espaçamentos nas direções X e Y de forma que possam representar os valores próximos aos pontos da grade em regiões com grande variação e que, ao mesmo tempo, reduzam redundâncias em regiões quase planas.

A Figura 2.25 mostra um exemplo de superfície gerada por uma grade retangular.

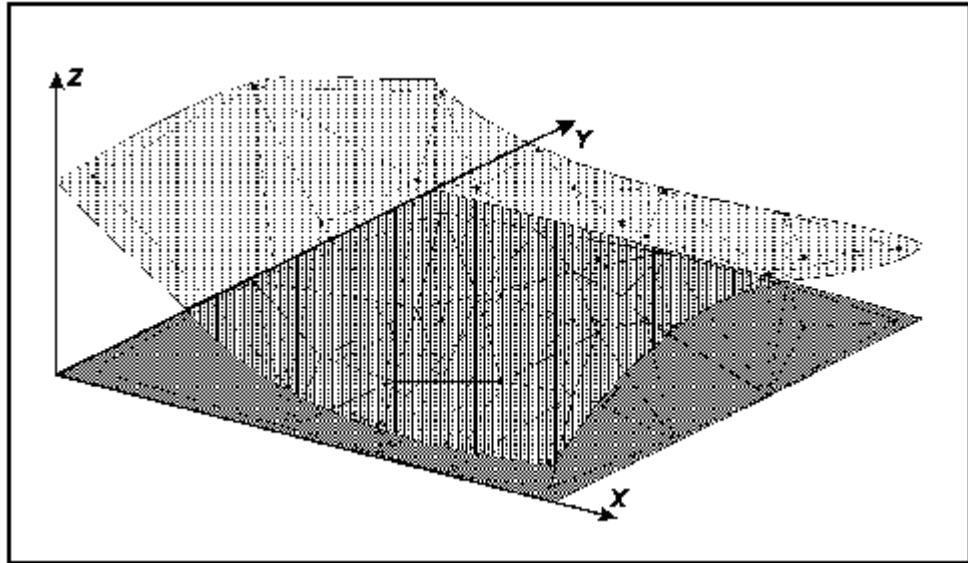


**Fig 2.25 - Superfície gerada a partir de uma grade retangular**  
Fonte: Felgueiras & Câmara (2006)

O espaçamento da grade, ou seja, a resolução em X ou Y deve ser idealmente menor ou igual à menor distância entre duas amostras com cotas diferentes. Ao se gerar uma grade muito fina (densa), com distância entre os pontos muito pequena, existirá um maior número de informações sobre a superfície analisada, necessitando maior tempo para sua geração. Ao contrário, considerando distâncias grandes entre os pontos, será criada uma grade grossa que podendo acarretar perda de informação. Desta forma para a resolução final da grade deve haver um compromisso entre a precisão dos dados e do tempo de geração da grade (FELGUEIRAS & CÂMARA, 2006).

## **ii) Grade Irregular**

Na modelagem da superfície por meio de grade irregular triangular, cada polígono que forma uma face do poliedro é um triângulo, como mostrado pela Figura 2.26. Esta modelagem permite que as informações morfológicas importantes como as discontinuidades, representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração da grade triangular, possibilitando modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas da superfície.

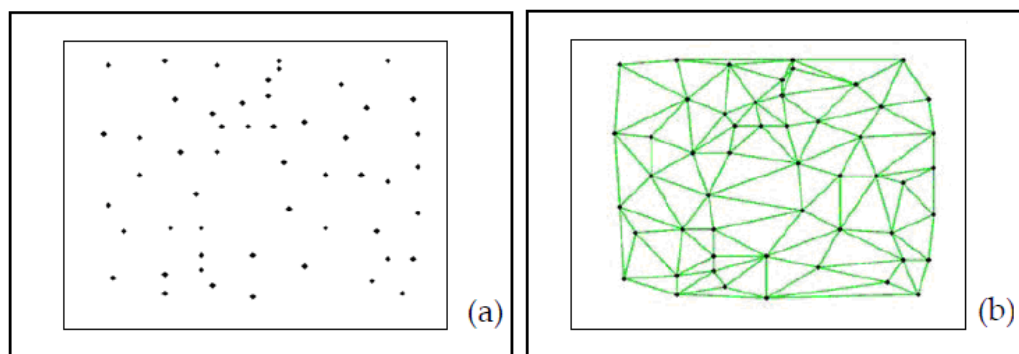


**Fig 2.26 - Superfície gerada a partir de uma grade triangular**  
Fonte: Felgueiras & Câmara (2006)

O número de redundâncias é bastante reduzido comparado à grade retangular, uma vez que a malha é mais fina em regiões de grandes variações e mais espaçada em regiões quase planas. As discontinuidades da superfície podem ser modeladas através de linhas e pontos característicos.

A grade triangular tem a vantagem de utilizar os próprios pontos amostrados para modelar a superfície, sem a necessidade de qualquer tipo de interpolação sobre os mesmos. A desvantagem da grade irregular é que os procedimentos, para obtenção de dados derivados, tendem a ser mais complexos e conseqüentemente mais demorados que os da grade retangular (FELGUEIRAS & CÂMARA, 2006).

A Figura 2.27 (a) e (b) mostra, respectivamente, um conjunto de pontos levantados irregularmente e uma estrutura TIN, formada a partir da triangulação de Delaunay.



**Fig 2.27 - Estrutura Triangular Irregular – TIN**  
Fonte: Idoeta (2007)

As grades triangulares são formadas considerando ou não linhas de quebra. As grades formadas incluindo as linhas de quebra possibilitam uma representação mais real do terreno, pois não suavizam as superfícies ao longo de feições como cristas e vales. Já as grades que desconsideram as linhas de quebra promovem um modelo de terreno com suavidades ao longo dessas linhas.

Felgueiras & Câmara (2006), apresentam a Tabela 2.3 comparativa, com as principais diferenças entre os modelos de grade retangular e de grade irregular triangular.

**Tabela 2.3 - Comparação entre os Modelos de Grade Retangular e Triangular.**

Grade Regular Retangular	Grade Irregular Triangular
Apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo	Não apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo
Os vértices dos retângulos são estimados a partir das amostras	Os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto amostral
Apresenta problemas para representar superfícies com variações locais acentuadas	Representa melhor superfícies não homogêneas com variações locais acentuadas
Estrutura de dados mais simples	Estrutura de dados mais complexa
Relações topológicas entre os retângulos são explícitas	É necessário identificar e armazenar as relações topológicas entre os triângulos

Fonte: Felgueiras & Câmara (2006)

#### 2.4.2. Interpoladores

Os interpoladores, de acordo com Botelho *et al.* (2005), como o próprio nome sugere, têm por função estimar valores a novos pontos que estão fora dos vértices de referências da malha quadrada ou da rede irregular de triângulos. O produto da interpolação gera uma malha contínua, regular ou irregular, com valores interpolados nas novas posições criadas pela malha original.

De acordo com Felgueiras & Câmara (2006), a interpolação envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste com o objetivo de se obter uma representação contínua do fenômeno a partir das amostras. Essas estruturas são definidas de forma a possibilitar uma manipulação conveniente e eficiente dos modelos pelos algoritmos de análise contidos em aplicativos computacionais.

Existem vários métodos de interpolação que podem ser utilizados para auxiliar no refinamento de dados coletados em campo, possibilitando a geração de modelos digitais de terrenos como: vizinho mais próximo, vizinho natural, inverso da distância, interpolação linear, interpolação bivariada, *Kriging*, curvatura mínima, regressão poligonal, média simples, média ponderada, média ponderada por quadrante e média ponderada por cota e por quadrante etc.

Dentre os vários métodos de interpolação citados, destacamos a interpolação linear e a interpolação bivariada que foram utilizadas nos experimentos deste trabalho.

#### 2.4.2.1 - Interpolação Linear

A partir de um modelo de grade triangular é possível criar-se um modelo de grade retangular, utilizando, por exemplo, um interpolador linear para a determinação da coordenada altimétrica de seus pontos.

De acordo com Li *et al.* (2005), os três vértices de cada triângulo da malha triangular, definem um plano no espaço tridimensional a partir do qual será estimado o valor de qualquer ponto de sua superfície. Dessa forma, para qualquer ponto a ser estimado deve-se buscar o triângulo que o contém e, através de uma álgebra simples de solução de sistemas lineares, obtém-se facilmente o valor de cota desse ponto.

A função matemática de um plano é assim representada: (Equação 2.3) - (LI *et al.*, 2005).

$$z = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (2.3)$$

Onde:

$a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  - são os coeficientes e

$x$ ,  $y$  e  $z$  - as coordenadas de um ponto interno à superfície.

Para a definição dos coeficientes, são consideradas as coordenadas de três pontos de referência, por exemplo,  $P_1 (x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2 (x_2, y_2, z_2)$  e  $P_3 (x_3, y_3, z_3)$ , estabelecendo-se (Equação 2.4) as relações:

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Uma vez determinados os coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ , a coordenada altimétrica  $z_i$  será determinada, considerando as coordenadas  $(x_i$  e  $y_i)$  na Equação 2.3.

Este modelo de interpolação é utilizado normalmente para as redes irregulares de triângulos.

### 2.4.2.2 - Interpolação Bivariada

Assim como a interpolação linear, outra técnica de interpolação, a bivariada, pode ser utilizada para a determinação das coordenadas altimétricas de pontos não pertencentes à amostragem.

Neste caso, a interpolação é feita a partir de um polinômio cuja função matemática é da forma: (Equação 2.5) - (LI *et al.*, 2005).

$$z = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy \quad (2.5)$$

Onde:

$a_0, a_1, a_2$  e  $a_3$  - são os coeficientes e

$x, y$  e  $z$  - as coordenadas de um ponto interno à superfície.

Os coeficientes serão definidos a partir das coordenadas de quatro pontos de referência, por exemplo,  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $P_3(x_3, y_3, z_3)$  e  $P_4(x_4, y_4, z_4)$  estabelecendo-se (Equação 2.6) as relações:

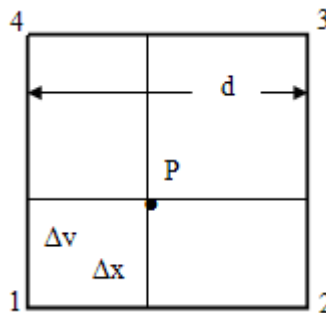
$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3 y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4 y_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Uma vez determinados os coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ , a coordenada altimétrica  $z_i$  será determinada, considerando as coordenadas  $(x_i$  e  $y_i)$  na Equação 2.5.

Segundo Li *et al.* (2005), se os pontos de referência são distribuídos sob a forma das grades quadradas, a coordenada altimétrica de um ponto “P” pode ser determinada pela seguinte fórmula: (Equação 2.7).

$$Z_p = z_1 \left( 1 - \frac{\Delta x}{d} \right) \left( 1 - \frac{\Delta y}{d} \right) + z_2 \left( 1 - \frac{\Delta y}{d} \right) \left( \frac{\Delta x}{d} \right) + z_3 \left( \frac{\Delta x}{d} \right) \left( \frac{\Delta y}{d} \right) + z_4 \left( 1 - \frac{\Delta x}{d} \right) \left( \frac{\Delta y}{d} \right) \quad (2.7)$$

Na Equação 2.7, os pontos 1, 2, 3, e 4 pertencem à amostragem e “d” representa a distancia entre esses pontos, como é apresentado na Figura 2.28.



**Fig 2.28 - Interpolação bivariada. Grade quadrada**  
 Fonte: Modificado de Li *et al.* (2005)

No caso de uma amostragem em grade triangular, conforme indicado pela Figura 2.29, a interpolação bivariada pode ser feita de maneira similar. Com auxílio das coordenadas dos pontos 1 e 2, (Equações 2.8 e 2.9), pode-se estimar a coordenada altimétrica de um ponto “P” (Equações 2.10).

Nesta situação, os pontos 1 e 2 situam-se sobre os alinhamentos AB e AC, respectivamente, de tal forma que:  $y_P = y_1 = y_2$

$$z_1 = z_A + (z_B - z_A) \times (x_1 - x_A) / (x_B - x_A) \quad (2.8)$$

$$z_2 = z_A + (z_C - z_A) \times (x_2 - x_A) / (x_C - x_A) \quad (2.9)$$

$$z_P = z_I + (z_2 - z_I) \times (x_P - x_I) / (x_2 - x_I) \quad (2.10)$$

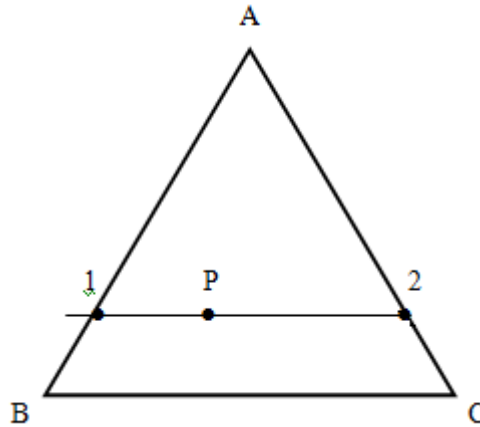


Fig 2.29 - Interpolação bivariada. Grade Triangular  
 Fonte: Modificado de Li *et al.* (2005)

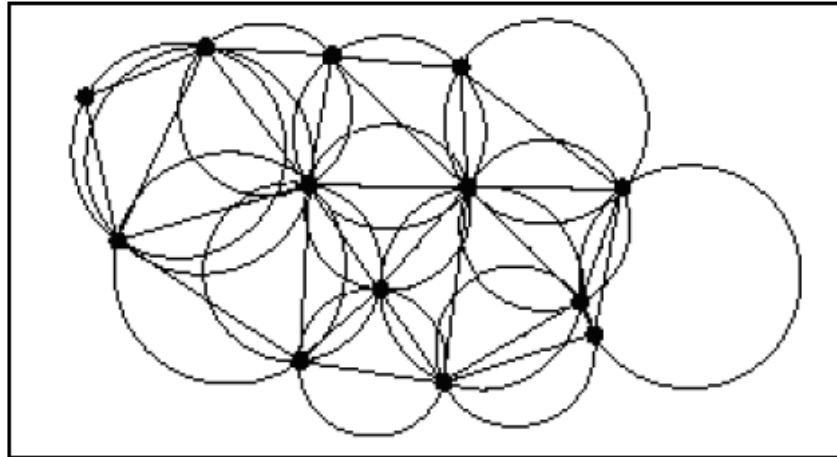
### 2.4.3. A Triangulação de Delaunay

De acordo com Moura *et al.* (2006), a Triangulação de Delaunay pode ser definida, em matemática e geometria computacional, para um conjunto de pontos  $P$  no plano, como a triangulação  $DT(P)$  tal que nenhum ponto em  $P$  está dentro do círculo-circundante de qualquer triângulo de  $DT(P)$ . Em outras palavras, essa regra estabelece que o círculo-circundante de um triângulo não deve conter outros pontos além dos pontos do triângulo.

A maioria dos polígonos que descrevem objetos do mundo real tem formato irregular e regiões pertencentes a diferentes áreas de interesse. Nesse contexto, a triangulação de Delaunay, conceitualmente, pode ser vista como uma estratégia de decompor uma área em triângulos, respeitando suas características geométricas. Assim, a triangulação de Delaunay funciona como uma espécie de gabarito para delimitar os espaços, através da criação de uma malha triangular.

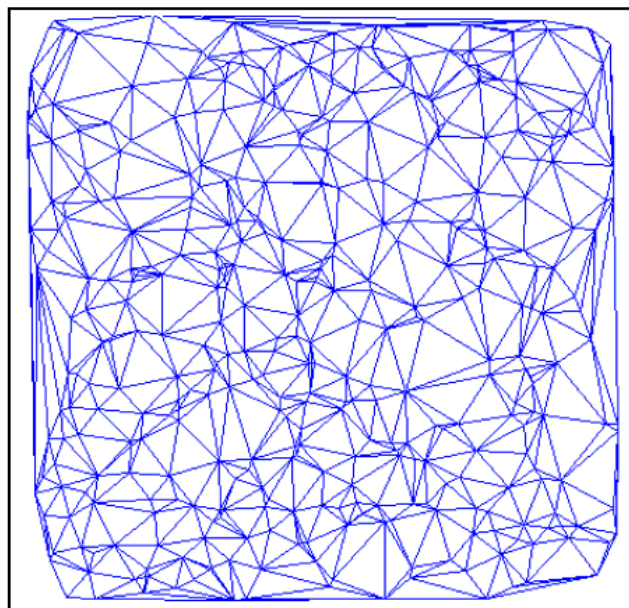
A triangulação de Delaunay maximiza o ângulo mínimo e minimiza o ângulo máximo de todos os triângulos, contribuindo assim, para a qualidade da malha final. Essa técnica foi inventada por Boris Delaunay em 1934.

A conceituação da triangulação de Delaunay é ilustrada pela Figura 2.30.



**Fig 2.30 - Cada triângulo de Delaunay tem um círculo circundante vazio**  
**Fonte: Moura *et al.* (2006)**

A Figura 2.31 apresenta uma triangulação de Delaunay sobre um conjunto de quatrocentos pontos no plano.



**Fig 2.31 - A triangulação de Delaunay sobre 400 pontos aleatórios**  
**Fonte: Moura *et al.* (2006)**

## **2.5 FECHAMENTO CONTÁBIL DE PRODUÇÃO**

Será tratada nesse tópico a metodologia (procedimentos) utilizada pela companhia Vale para a Consolidação e Conciliação de Fechamento Contábil de Produção e de Estoque.

O objetivo do procedimento de fechamento mensal é fazer a conciliação entre os dados de produção, as movimentações de saída de minério e o material estocado.

Ao final de cada mês, a equipe de Programação e Controle de Produção realiza o fechamento contábil de produção tendo como base os dados de densidade dos produtos, os volumes das pilhas de minério, as produções após as medições topográficas (dentro do mês específico), os dados de produção e alimentação da usina além das movimentações de mina.

A equipe de controle de qualidade de pátio efetua o cálculo do estoque físico atual (em toneladas) através dos dados de volumetria e densidade. Este cálculo é feito automaticamente na planilha contábil. Ao estoque físico determinado, deverão ser computadas as movimentações realizadas, caso tenham ocorrido entradas e saídas no estoque de produtos após a medição topográfica.

Todos esses dados são tabulados em planilhas pelas gerências dos diversos setores envolvidos e disponibilizados na rede interna da Vale. As diversas planilhas disponíveis na rede interna são importadas, pelo controlador de fechamento, e seus dados inseridos na planilha contábil.

A partir da determinação do estoque físico são apuradas as diferenças entre os estoques físicos medidos (topográfico) e o contábil (produção menos saída). No caso de se apurar desvios entre o estoque físico e contábil superior a 2%, a gerencia da área responsável pelo desvio deverá justificar o motivo da ocorrência. Caso haja desvios, e após as devidas justificativas, cabe ao controlador de fechamento promover a conciliação entre os valores apurados pela medição topográfica e os dados contábeis.

Após a finalização da planilha contábil pelo controlador de fechamento, ela é bloqueada, impedindo assim novas alterações, e disponibilizada no servidor da rede interna Vale.

A Figura 2.32 apresenta um fluxograma que representa o fechamento contábil de conciliação.

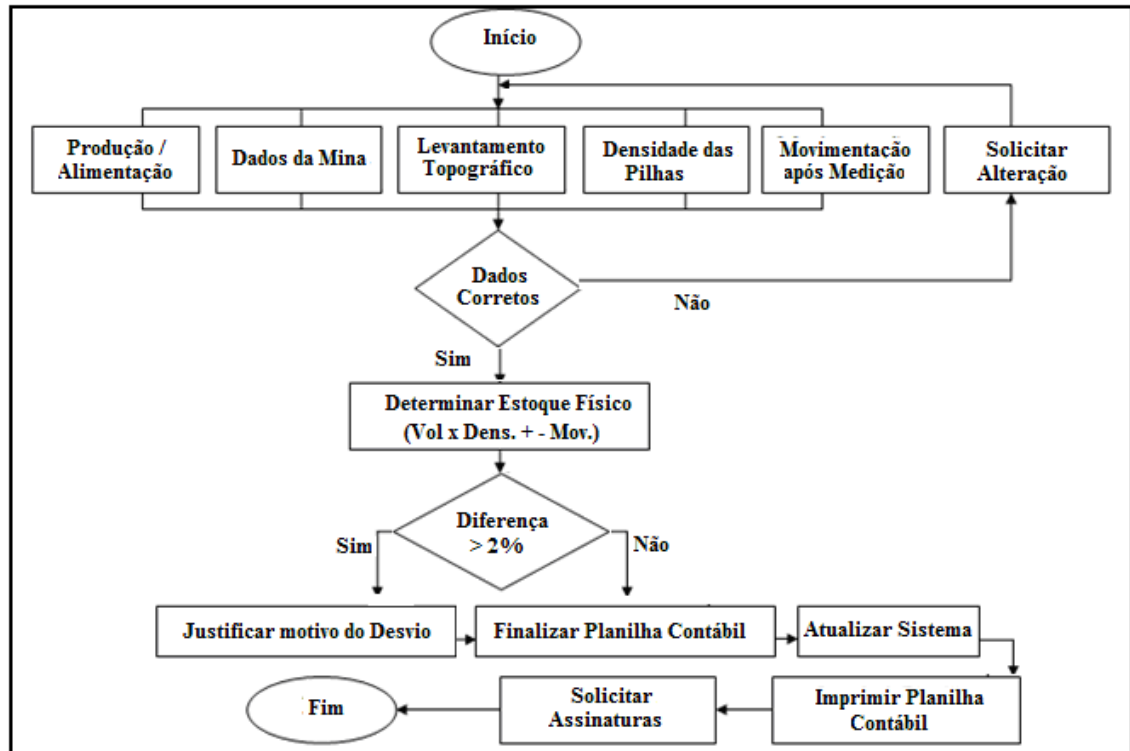


Fig 2.32 - Fechamento Contábil

Fonte: Adaptado - Cortesia Companhia Vale - Mina de Alegria (2009)

## 2.6 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Análise Multicritério ou Apoio Multicritério à Decisão (AMD), de acordo com Gomes *et al.* (2002), consiste em um conjunto de técnicas que auxiliam um indivíduo, grupo de pessoas ou comitê de técnicos ou dirigentes, na tomada decisões acerca de um problema complexo, avaliando e escolhendo alternativas para solucioná-lo segundo diferentes critérios e pontos de vista. Portanto, a Análise Multicritério tem como propósito, auxiliar pessoas e/ou organizações em situações nas quais é necessário identificar prioridades, considerando, ao mesmo tempo, diversos aspectos (LINS *et al.*, 2002).

A Análise Multicritério surgiu nos anos 60 e, como um instrumento de apoio à decisão, é aplicada na análise comparativa de projetos alternativos ou medidas heterogêneas. Através desta técnica, são considerados, simultaneamente, diversos critérios na análise de uma situação complexa. O método destina-se a ajudar aos responsáveis por decisões, a integrar diferentes opções em suas ações, refletindo sobre as opiniões de diferentes setores envolvidos.

A Análise Multicritério objetiva retratar o raciocínio e as convicções subjetivas das diferentes partes interessadas a cada questão em particular. É, normalmente, usada para sintetizar diferentes opiniões, para determinar prioridades, para analisar situações de conflito, para formular recomendações ou proporcionar orientações de natureza operacional.

Jannuzzi (2005) apresenta e define os seguintes elementos básicos do AMD: Decisores, Facilitadores, Analistas, Alternativas e Critérios.

Decisores são agentes que influenciam no processo de decisão de acordo com o juízo de valores que representam e/ou relações que se estabeleceram; estas relações devem possuir caráter dinâmico, pois poderão ser modificadas durante o processo de decisão devido ao enriquecimento de informações e/ou interferência de facilitadores;

Facilitadores são agentes que facilitam o processo de comunicação, focalizando a atenção na resolução dos problemas, coordenando os pontos de vista dos decisores, mantendo os decisores motivados e destacando o aprendizado no processo de decisão;

Analistas são agentes que auxiliam os facilitadores e os decisores na estruturação dos problemas e identificação dos fatores que influenciam na evolução, solução e configuração do problema;

Alternativas são as soluções possíveis para o problema. Uma alternativa para ser submetida ao processo de decisão necessita ser adequada e exequível, deve ser eficaz e ser possível de ser implantada com os recursos disponíveis;

Critérios são atributos, indicadores que permitem a comparação de alternativas segundo um ponto de vista. O critério também é definido como uma função de valor real sobre um conjunto de alternativas, que permita obter algum tipo de significado ao comparar duas alternativas de acordo com um ponto de vista particular.

Soares (2003) em Vilas Boas (2005) apresenta o desenvolvimento da técnica de Análise Multicritério descrevendo suas etapas, como:

Formulação do problema. Corresponde em se definir, claramente, sobre o que se quer decidir;

Determinação de um conjunto de ações potenciais. Os agentes envolvidos na tomada de decisão devem constituir um conjunto de ações (alternativas) que atendam ao problema colocado;

Elaboração de um conjunto coerente de critérios. Definição de um conjunto de critérios, através de variáveis e indicadores, que permitam avaliar seus efeitos diante do problema em questão;

Avaliação dos critérios. Esta etapa é, geralmente, formalizada através de uma matriz de avaliações ou tabela de performances, na qual as linhas correspondem às ações a avaliar e as colunas representam os respectivos critérios de avaliação previamente estabelecidos;

Determinação de pesos dos critérios e limites de discriminação. Os pesos traduzem numericamente a importância relativa de cada critério. A ponderação de critérios pode ser realizada através de várias técnicas como: hierarquização de critérios, notação, distribuição de pesos, taxa de substituição, regressão múltipla, etc.;

Agregação dos critérios. Consiste em associar, após o preenchimento da matriz de avaliação e segundo um modelo matemático definido, as avaliações dos diferentes critérios para cada ação. As ações serão em seguida comparadas entre si por um julgamento relativo do valor de cada ação.

A partir das etapas do processo AMD descritas, duas fases distintas de aplicação dos Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MMAD) são caracterizadas: a Estruturação e a Avaliação.

Para Gomes *et al.* (2000) em Cruz (2006), na Estruturação há o objetivo de “identificar, caracterizar e organizar os fatores considerados relevantes no processo de apoio à decisão”. Essa fase envolve ainda, a definição dos objetivos do decisor, identificação das alternativas possíveis e estabelecimento dos critérios.

Já a fase de Avaliação, “objetiva a aplicação de métodos de análise multicritério para apoiar a modelagem das preferências e sua agregação”. É considerada uma fase de síntese, onde através de análise de sensibilidade e robustez se esclarece a escolha. Realiza-se a valoração das alternativas ou ações potenciais, através da articulação e modelagem das preferências.

Com o problema claramente definido, as alternativas para sua solução levantadas, o conjunto de decisores identificados e especificados os critérios de avaliação das alternativas passa-se, então, à aplicação do procedimento quantitativo de análise multicritério.

De acordo com Jannuzzi *et al.* (2009), há diferentes técnicas e procedimentos quantitativos para busca da solução multicritério, como os relacionados em Gomes (2002), Cruz (2006) e Vilas Boas (2005).

Dentre os diversos métodos de apoio multicritério à decisão, destacamos o Processo Analítico Hierárquico (AHP).

Segundo Jordão & Pereira (2006), o processo analítico hierárquico foi desenvolvido pelo Dr. Thomas L. Saaty, no ano de 1971. Sua primeira aplicação (1972) foi em estudos de racionamento de energia para indústrias, para a *National Science Foundation* (NSF) dos Estados Unidos, chegando à sua maturidade aplicativa com o estudo dos transportes do Sudão, dois anos depois.

O AHP é um método de tomada de decisão bastante flexível, que auxilia na determinação de prioridades e também identifica a melhor opção dentro de várias alternativas possíveis, isto levando em conta tanto os aspectos quantitativos quanto os qualitativos (CICONE JÚNIOR, 2008).

O desenvolvimento do processo teve como base conceitos de álgebra linear, pesquisa operacional e psicologia, a partir dos quais é possível promover comparações e definições das diferenças de importância entre as variáveis envolvidas.

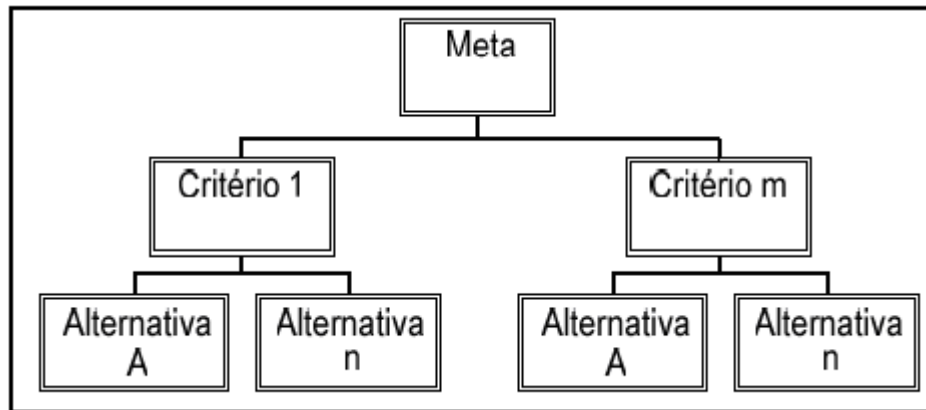
Em Vilas Boas (2005), tem-se que a aplicação do processo de decisão é apropriada para comparar alternativas de projetos, políticas e cursos de ação e também para analisar projetos específicos, identificando seu grau de impacto global. Desta forma, a metodologia dá ao grupo envolvido no processo de tomada de decisão, subsídios necessários para se obter uma solução que melhor se ajuste às suas necessidades.

O método AHP tem sido mundialmente utilizado para auxiliar os processos de decisão considerando os mais diversos fins, indo da análise de terrorismo até a disposição de recursos em questões governamentais (JORDÃO & PEREIRA, 2006).

O Processo Analítico Hierárquico tem como base a representação de um problema complexo através de uma estruturação hierárquica, onde estão presentes o objetivo global, os critérios e as alternativas ou variáveis. Esses elementos que formam a hierarquia, previamente selecionados, devem ser organizados de maneira descendente, onde o objetivo principal deve estar no primeiro nível da hierarquia, em seguida, os critérios e, finalmente, as alternativas. A estrutura hierárquica pode ter tantos níveis

quanto necessários, sendo o nível superior, sempre a meta a ser alcançada e o mais inferior as alternativas.

A Figura 2.33 exemplifica uma estrutura hierárquica para a metodologia AHP.



**Fig 2.33 - Estrutura Hierárquica para AHP**  
**Fonte: Cicone Júnior (2008)**

Segundo Baraças & Machado (2006), para o desenvolvimento do método AHP é necessário que se faça uma avaliação, determinando a influência que cada elemento exerce sobre outro dentro de um mesmo nível, e também, em relação aos elementos de outro nível. Ou seja, deseja-se encontrar a influência que cada alternativa exerce sobre cada um dos critérios utilizados. Deve-se, também, verificar qual é a influência que cada critério exerce sobre o objetivo geral. Desta forma, pode-se então determinar qual é o poder de cada alternativa sobre o objetivo geral, gerando uma escala de importância dessas alternativas.

Para medir os impactos que os elementos do nível mais baixo exercem sobre o objetivo geral, comparam-se os pares de alternativas disponíveis, com relação a cada critério utilizado. Também, os critérios são comparados par a par, de acordo com sua importância, para atingir o objetivo geral. Tal comparação pode ser fundamentada numa escala de intensidade de importância, com valores variando entre 1 e 9, proposta por Thomas Lorie Saaty (BARAÇAS & MACHADO, 2006), desenvolvedor do processo. Esta escala é mostrada pela Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Escala de Thomas. L. Saaty para o método AHP

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para os objetivos
3	Pequena importância de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem uma atividade levemente em relação a outra
5	Grande importância ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem uma atividade fortemente em relação a outra
7	Forte importância	Uma atividade é fortemente favorecida em relação à outra e pode ser demonstrada na prática
9	Importância Absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições

Fonte: Modificado de Baraças & Machado (2006)

Os resultados das comparações par a par entre os níveis inserem-se numa matriz de referência, a qual se apresenta sob a seguinte forma (Equação 2.11):

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Os elementos  $a_{ij}$  desta matriz são definidos pelas seguintes condições:

se  $a_{ij} = x$ , então  $a_{ji} = 1/x$ ;

se uma alternativa  $C_i$  é julgada de igual importância relativa que outra  $C_j$ , então  $a_{ij} = 1$  e  $a_{ji} = 1$  e especificamente  $a_{ii} = 1$ , para todo  $i$ , um elemento é igualmente

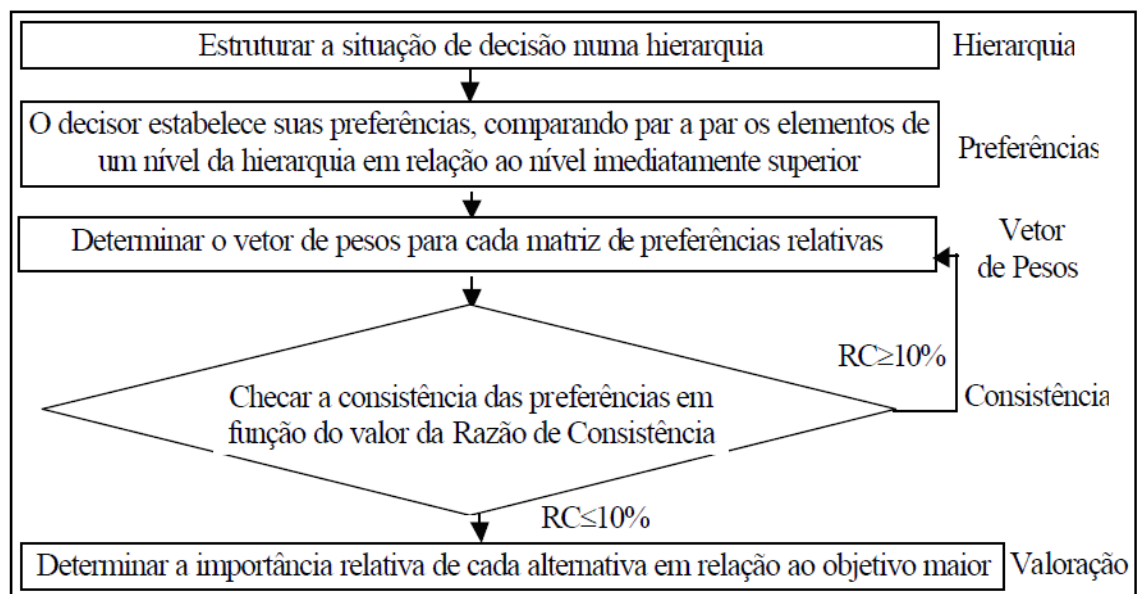
importante quando comparado com ele próprio. Portanto, a diagonal principal de uma matriz tem de consistir em números 1.

Segue-se, a etapa de cálculo dos pesos dos componentes dentro de cada nível hierárquico e a determinação da consistência relativa aos julgamentos comparativos realizados.

Os pesos dos componentes resultam em uma matriz de prioridades das alternativas em relação ao objetivo proposto, enquanto que, a consistência avalia o grau de pertinência dos julgamentos.

A consistência, representada pela Razão de Consistência (RC), deve ser menor que 0.10, permitindo assim, a validação dos julgamentos. Quando a razão de consistência é superior a 0.10 é necessário retornar aos julgamentos dos fatores, modificando-os, de modo a se obter uma consistência geral mais apropriada.

Schmidt (2003) em Vilas Boas (2005), exemplifica pela Figura 2.34, um fluxograma geral do método AHP.



**Fig 2.34 - Fluxograma geral do método AHP**  
 Fonte: Vilas Boas (2005)

## **CAPÍTULO 3      ÁREA DE ESTUDOS, MATERIAIS E MÉTODOS**

---

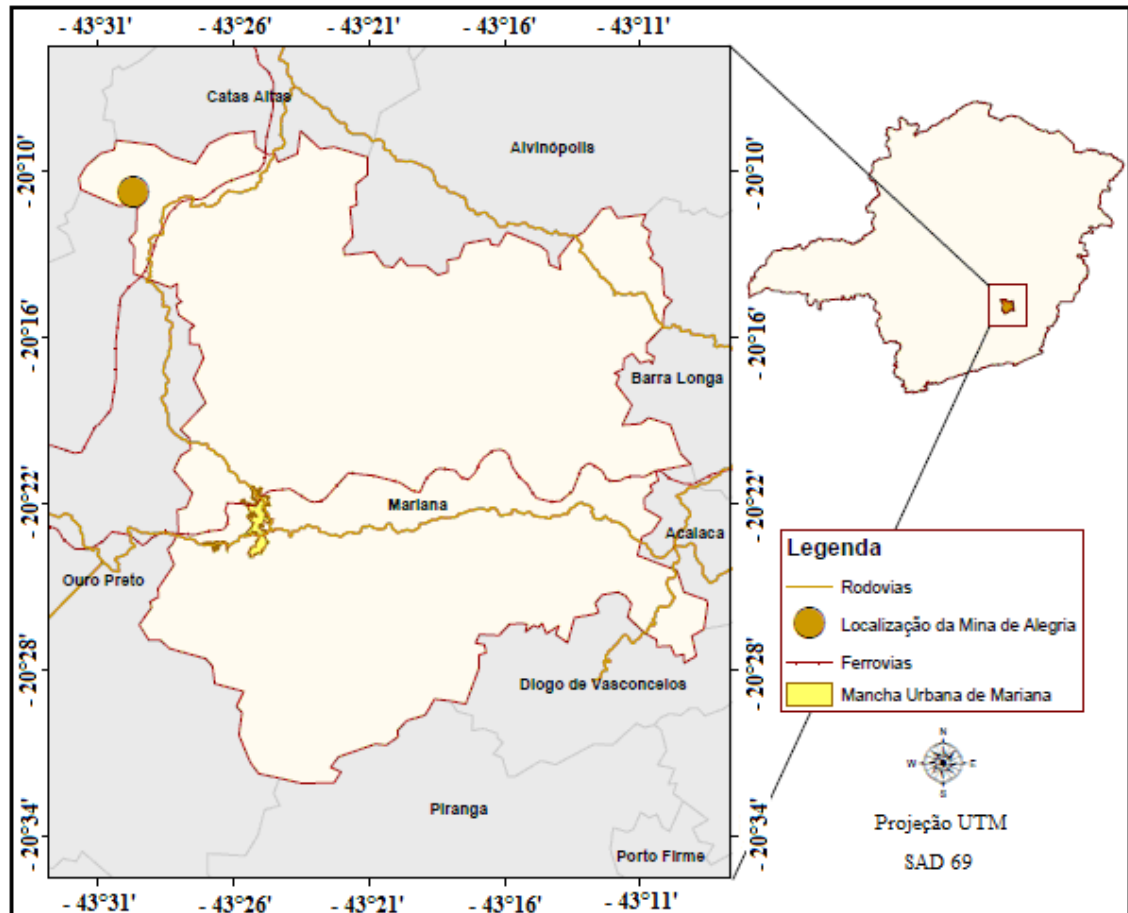
### **3.1      ÁREA DE ESTUDOS**

Os estudos e experimentos desta pesquisa foram realizados nas dependências da Companhia Vale na mina de Alegria no município de Mariana, Estado de Minas Gerais.

As coletas de dados de campo, necessárias para a determinação de volumes de minério, aplicando as tecnologias GPS, *Laser Scanner* Terrestre e Aerotransportado e Pós-Sinalização foram executadas no pátio do embarcadouro da mina de Alegria.

A mina de minério de ferro de Alegria, pertencente à Companhia Vale, foi fundada em 1942 e iniciou suas operações no ano de 1969. Localiza-se no município de Mariana, no estado de Minas Gerais, na parte SE do Quadrilátero Ferrífero, com área total de 496,28 ha. Geograficamente, entre as coordenadas latitude 20°07'00"S e 20°17'00"S, e longitude 43°25'00"W e 43°35'00"W, na zona metalúrgica de Minas Gerais.

A Figura 3.1 apresenta a localização do distrito de Mariana (MG) e da mina de Alegria.



**Fig 3.1 - Localização Mariana - Mina de Alegria**  
 Fonte: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) (2011)

A geologia é representada quase na sua totalidade pelo domínio de itabiritos da Formação Cauê, do Grupo Itabira, que neste local atinge a sua maior potencia aparente de 2.000 metros. Os corpos de minério representados por itabiritos enriquecidos supergenicamente a níveis de teor de ferro, superior a 60%, são encontrados nas partes altas e de relevo suave, descritos como relitos de antigas superfícies de erosão. Os corpos de minério classificados quimicamente como corpos de hematita (com teor de ferro maior ou igual a 64%) e corpos de itabiritos ricos (com teor de ferro entre 60% e 64%) são preservados da erosão pela cobertura de canga formada sobre eles (BARCELOS & BÜCHI, 1986).

A lavra é executada pelo método a céu aberto, com desenvolvimento vertical, em bancadas de 10 metros de altura e bermas com largura de 6 metros em *pit* final.

A mina de Alegria possui feição de cava fechada, com definição de fundos com variadas cotas e altura aproximada de 650 m. O banco mais alto está na cota 1.360 metros e o mais fundo cota 890 metros. (REVISTA *MINÉRIOS & MINERALES*, 2007).

A planta de beneficiamento da mina de Alegria é constituída por três instalações: IBI, IBII e IBIII, compostas das etapas de britagem, classificação e flotação com capacidade de produção de 12,3 milhões de toneladas por ano. Nessa planta são processados minérios itabiríticos e hematíticos, gerando o produto granulado, *sinter feed* e *pellet feed*. A recuperação mássica e metalúrgica são 74% e 80%, respectivamente.

Os produtos das instalações da mina de Alegria são armazenados, em pilhas e bancadas, no pátio do embarcadouro, com capacidade de estocagem de 1,5 milhões de toneladas. No pátio de armazenagem de minério há uma pêra ferroviária da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM), também de propriedade da Vale. A pêra ferroviária tem capacidade de receber composição de 80 vagões, de 70 toneladas cada, e disponibilidade de operação 24 horas por dia, durante todo o ano, independente das condições climáticas.

Os produtos são transportados através da EFVM que liga a mina de Alegria a importantes usinas siderúrgicas nacionais e ao porto de Tubarão, ao norte da cidade de Vitória, no Estado do Espírito Santo, de onde é dirigido ao mercado externo (BARCELOS & BÜCHI, 1986).

A Figura 3.2 apresenta, parcialmente, o pátio do embarcadouro da mina de Alegria com suas pilhas de minério estocado.



**Fig 3.2 - Vista Parcial do Pátio do Embarcadouro da mina de Alegria**

## 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, são apresentados os equipamentos utilizados e as metodologias empregadas para a determinação dos volumes de minério estocado, a partir dos dados de campo coletados por aplicação das tecnologias GPS, *Laser Scanner* Terrestre, *Laser Scanner* Aerotransportado e Pós-Sinalização, assim como, a técnica utilizada na análise dos resultados obtidos.

### 3.2.1 Tecnologia GPS

A tecnologia GPS foi aplicada baseada nas experiências adquiridas pela equipe de topografia da companhia Vale em levantamentos topográficos, particularmente, na mina de Alegria.

Os equipamentos utilizados foram os mesmos que, habitualmente, são empregados nos serviços topográficos na mina de Alegria e a metodologia aplicada na coleta e tratamento dos dados GPS também segue a mesma seqüência utilizada pela equipe de topografia da mina de Alegria.

#### 3.2.1.1 - Materiais utilizados na aplicação da tecnologia GPS

Nos trabalhos de campo, foram utilizados os coletores de dados **Trimble TSC 1** e **Trimble TSC 2** (Trimble System Controller) que, juntamente com os sistemas GPS Trimble 4800, GPS Trimble 5800 e GPS Trimble R8 GNSS (Global Navigation Satellite System).

Em campo, os trabalhos foram desenvolvidos com o levantamento de dados através dos sistemas GPS Trimble 4800, GPS Trimble 5800 e GPS Trimble R8 GNSS (Global Navigation Satellite System), juntamente com os coletores de dados **Trimble TSC 1** e **Trimble TSC 2** (Trimble System Controller).

Para o tratamento dos dados, foram utilizados os aplicativos computacionais Trimble Geomatics Office (TGO), responsável pela transferência dos arquivos gerados pelas coletoras para o computador de escritório; o software Excel, utilizado para ordenamento e conferência dos dados; o Software Datamine, responsável pela geração

de arquivos de mapa e o Topograph-98SE, software utilizado na geração de triangulações, interpolações, MDT e cálculo dos volumes.

As Figuras 3.3 e 3.4, apresentam, respectivamente, os coletores de dados TSC 1 e TSC 2.



**Fig 3.3 - Coletor de dados TSC1**  
Fonte: [www.trimble.com](http://www.trimble.com) (2009)



**Fig 3.4 - Coletor de dados TSC2**  
Fonte: [www.trimble.com](http://www.trimble.com) (2009)

As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam, respectivamente, os sistemas GPS Trimble 4800, Trimble 5800 e GPS Trimble R8 GNSS.



**Fig 3.5 - Sistema GPS 4800**  
Fonte: [www.trimble.com](http://www.trimble.com) (2009)



**Fig 3.6 - Sistema GPS 5800**  
Fonte: [www.trimble.com](http://www.trimble.com) (2009)



**Fig 3.7 - Sistema GPS R8**  
Fonte: [www.trimble.com](http://www.trimble.com) (2009)

### 3.2.1.2 - Metodologia aplicada com a tecnologia GPS

#### i) Metodologia empregada na coleta de dados em Campo

O desenvolvimento do levantamento topográfico por GPS requer operadores de campo que tenham conhecimentos e prática suficientes para saber escolher os pontos característicos a serem levantados, identificando os detalhes existentes e os pontos que constituem as linhas que definem o “pé” e a “crista” das pilhas e das bancadas de minério, necessárias para a modelagem geométrica dos sólidos.

Os levantamentos são desenvolvidos pelo método Cinemático em tempo real (*Real Time Kinematic - RTK*) *Stop and Go*, onde são coletadas as coordenadas dos pontos característicos, por rastreamento durante 10 segundos a cada ponto.

Há opções em se trabalhar com coordenadas geográficas, assim como, com coordenadas locais. Especificamente, na mina de Alegria todos os trabalhos topográficos são relacionados a um sistema de coordenadas local de referencia.

A coleta e registro dos dados iniciam-se com a definição do ponto de partida de cada linha, que é cadastrado por um código que representa “linha” e outro que representa “pé” ou “crista”. Há também os códigos que correspondem ao início e fim de cada linha de pontos levantada. São necessários os códigos de início e fim de cada linha para que o aplicativo de tratamento de dados, a ser usado posteriormente, possa identificar onde começam e terminam as linhas, ligando corretamente os seus pontos.

Dados do receptor GPS da base são utilizados para corrigir diferencialmente os dados dos receptores GPS *rover*.

Após a coleta de todos os dados no campo, esses são tratados por aplicativos específicos, como o Excel e *Datamine*, gerando novos arquivos que resultarão em um mapa, onde constam os pontos levantados de acordo com suas características.

As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam a coleta de dados pelo sistema GPS para a determinação de volumes de pilhas de minério estocados.



Fig 3.8 - Levantamento GPS para cálculo de volume de minério



Fig 3.9 - Levantamento GPS para cálculo de volume de minério

## ii) Metodologia aplicada no tratamento dos dados de campo

Nas minas de Alegria, os arquivos gerados pelos coletores de dados dos GPS são transferidos para o computador através do aplicativo *Trimble Geomatics Office*

(TGO), fornecendo informações tabeladas em colunas, constando o nome do ponto (seqüência numérica), coordenadas locais e código característico do ponto. Os códigos que caracterizam os pontos levantados têm os seguintes significados:

- 21 - início (1) de uma linha tracejada “pé” (2);
- 22 - pontos intermediários (2) que compõem as linhas tracejadas “pé” (2);
- 23 - ponto final (3) de uma linha tracejada “pé” (2);
- 11 - início (1) de uma linha contínua “crista” (1);
- 12 - pontos intermediários (2) que compõem as linhas contínuas “crista” (1);
- 13 - ponto final (3) de uma linha contínua “crista” (1);
- 41 - ponto inicial (1) de uma linha de destaque (4), que não seja “pé” nem “crista”, ou ponto isolado que se destaca;
- 42 - pontos intermediários (2) que constituem uma linha de destaque (4);
- 43 - pontos finais (3) de uma linha de destaque (4).

O arquivo é importado pelo aplicativo *Datamine* que gera arquivo de mapa, com todas as representações de linhas de cristas, pés e outras. Esse novo arquivo representa a realidade física das pilhas de minério e será base para a geração do MDT atualizado, que será utilizado para a determinação dos volumes.

A Tabela 3.1 exemplifica a edição preliminar dos dados GPS em planilha Excel, com as representações dos tipos das linhas, suas posições na linha, assim como, suas coordenadas locais tridimensionais.

**Tabela 3.1 - Arquivo de pontos GPS editados**

Tipo de Linha	Posição	Coord. Leste	Coord. Norte	Cota
2	1	5.647,580	8.534,349	913,453
2	2	5.647,138	8.533,943	913,479
2	2	5.645,937	8.532,479	913,647
2	3	5.639,860	8.450,275	914,435
1	1	5.641,651	8.450,447	915,324
1	2	5.641,738	8.450,623	915,611
1	2	5.639,979	8.452,916	914,747
1	3	5.642,404	8.446,685	917,369
2	1	5.642,418	8.446,631	917,355
2	2	5.642,334	8.446,709	917,621
2	2	5.641,794	8.446,691	917,656
2	3	5.641,642	8.446,732	917,614
1	1	5.641,641	8.446,700	917,617
1	2	5.641,715	8.446,982	917,429
1	2	5.642,234	8.447,784	916,664
1	3	5.641,851	8.450,404	915,337
4	1	5.647,005	8.451,279	913,491
4	2	5.646,171	8.450,560	913,886
4	3	5.657,395	8.466,519	913,712

**iii) Metodologia para determinação do volume das pilhas de minério**

A determinação de volumes de produtos sólidos em uma mineração pode se feita a partir da determinação de suas massas por intermédio de balanças e da densidade do produto, ou através de levantamentos topográficos que definem a conformação física desses produtos.

Especificamente, em nosso ambiente de pesquisa (mina de Alegria) os cálculos dos volumes das pilhas de minério depositado são realizados a partir de levantamentos topográficos. Os modelos digitais gerados a partir dos levantamentos de campo são comparados com a conformação física original do terreno, as chamadas “primitivas”, definindo assim os volumes de minério.

Como exemplo, um esquema de determinação de volume pode ser mostrado através da Figura 3.10 onde, a superfície “ABDHGCA” representa uma conformação física original, em uma época inicial “1” (primitiva) e a superfície “ABFHGEA” representa a conformação física em outra época posterior “2”. A diferença de relevo obtida a partir da subtração entre a época “2” e a época “1” nos dá o volume ali depositado.

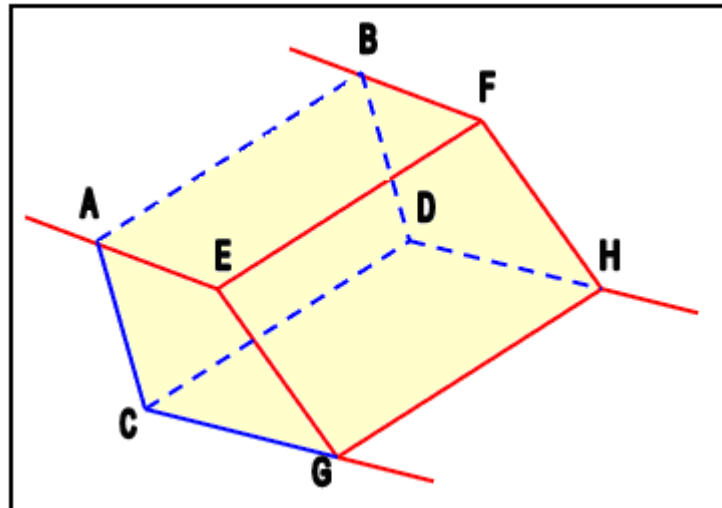


Fig 3.10 - Esquema representativo de determinação de volume

O cálculo dos volumes na mina de Alegria é feito, geralmente, a partir dos pontos levantados por GPS, utilizando o aplicativo computacional *Topograph-98SE*. A partir desses pontos é gerada uma Rede Irregular de Triângulos (TIN), através de uma triangulação de Delaunay, definindo assim, os modelos digitais das pilhas de minério. O método de triangulação de Delaunay encontra-se descrito na subseção “2.4.3” do Capítulo 2 deste trabalho.

Sobre o modelo gerado, é definida uma malha retangular, através da qual é determinado o volume de cada modelo. Esses volumes são obtidos a partir dos volumes dos prismas formados pela divisão dos retângulos da malha em dois triângulos e suas projeções sobre um plano horizontal de referência. O volume final de cada modelo será a soma dos volumes de todos os prismas formados dentro dos limites considerados. Esse processo é representado pela Figura 3.11, onde em (a) tem-se a visão da malha retangular sobre o terreno e a sua projeção sobre um plano horizontal. A Figura 3.11 (b) mostra a divisão da projeção “ABCD” de um retângulo pertencente à malha retangular, em dois triângulos, “ABD” e “BCD”. Esses dois triângulos serão as bases dos prismas cujos volumes serão calculados através da aplicação da Equação 3.1.

$$V_1 = A (h_a + h_b + h_d) / 3$$

(3.1)

Onde:

$V_1$  = volume do prisma ABDA'B'D'

A = área do triângulo ABD

$h_a$ ,  $h_b$  e  $h_d$  = alturas de projeção dos pontos A, B e D

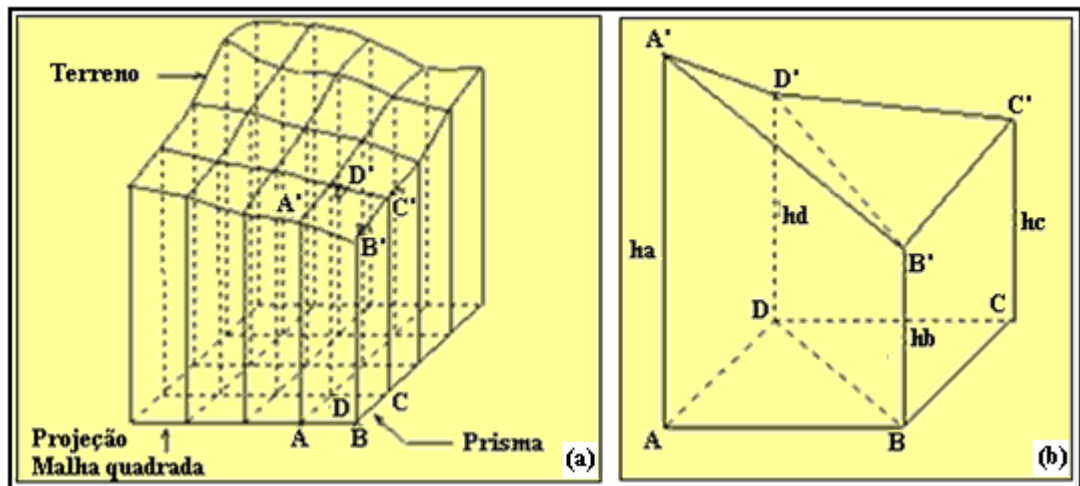


Fig 3.11 - Processo gráfico para determinação do volume de minério  
 Fonte: Ribeiro Júnior (2006)

Este tipo de procedimento de medição e cálculo de volumes de pilhas de minério, utilizando a tecnologia GPS, também é executado em outras minerações como apresentado em Xavier (2010).

Com os dados levantados pela técnica GPS foram promovidos novos experimentos, considerando as diferentes opções oferecidas pelos *softwares*, no que diz respeito a tipos de interpoladores, utilização de diferentes malhas de pontos e técnicas para cálculos de volumes, assim como a utilização de outros aplicativos computacionais.

Assim, esses dados foram novamente tratados pelo aplicativo *TopoGRAPH-98SE*, obtendo-se os volumes de minério por utilização de malha regular gerada a partir das técnicas de interpolação linear e bivariada, volumes por seções transversais (0,20 m), utilizando os métodos da “semi-soma” e “prisma”.

Outros tipos de interpoladores, como “vizinho mais próximo” e “inverso de uma distância”, também foram testados em cálculos de volumes a partir de dados levantados pela tecnologia *Laser Scanner Terrestre*, como visto em Botelho *et al.* (2005).

### 3.2.2 Tecnologia *Laser Scanner* Terrestre

Neste tópico são apresentados os equipamentos utilizados e metodologia desenvolvida por aplicação da tecnologia *Laser Scanner* Terrestre (LST), na coleta e tratamento dos dados necessários para a determinação de volumes de pilhas de minério depositado.

Os trabalhos de coleta de dados foram desenvolvidos pela empresa MAPTEK do Brasil, utilizando o sistema *Laser Scanner I-Site 4400*.

#### 3.2.2.1 - Materiais utilizados na aplicação da tecnologia LST

Os seguintes equipamentos e *softwares* foram utilizados na coleta e tratamentos dos dados utilizando a tecnologia LST:

i) ***Laser Scanner Estático I-Site 4400CR/LR*** - É um sistema de escaneamento a *Laser* que inclui o *Hardware* e o *Software* necessários para obter levantamentos em três dimensões em grande escala. O *scanner* I-SiTE registra até 4.400 medições por segundo, operando a um alcance máximo de 700 metros com uma precisão de 50 mm. Com uma câmera digital integrada são obtidas imagens panorâmicas de até 37 mega pixels em 360 graus.

ii) ***Tablet*** - O *tablet* é um notebook (coletor de dados) que, juntamente com o *Scanner*, controla e gerencia a captura de dados em campo. Possui *software* especialmente desenhado para controle do *scanner* e captura de dados em terreno.

A Figura 3.12 mostra o sistema *I-Site 4400CR/LR* com os *Hardwares* - *Laser Scanner* e *Tablet*.



**Fig 3.12 - Sistema I-Site 4400**  
**Fonte: Cortesia MAPTEK (2009)**

iii) *I-Site Studio* - É um *software* topográfico para processamento e análise de dados coletados por *Laser Scanner*.

### 3.2.2.2 - Metodologia aplicada com a tecnologia LST

#### i) Metodologia empregada na coleta de dados em Campo

Inicialmente, o *scanner* é instalado, nivelado e alinhado, como qualquer aparelho ótico de visada, em uma estação escolhida em função da maior visibilidade aos alvos. Faz-se a conexão do *tablet* (notebook / coletor de dados) ao *scanner* por meio de cabo específico. Após a conexão, faz-se a configuração do *tablet* por meio dos comandos *Setup* e *Acquire*, por onde são inseridas as características do escaneamento como: a altura de instalação do instrumento, nome e coordenadas da estação e do ponto de “ré” (necessárias para a orientação do levantamento). Também, são definidas a resolução e o alcance da varredura *Laser*, as possibilidades de se fazer uma varredura com ou sem referenciamento, o comando de fotografia, assim como da amplitude “janela” de varredura. O *scanner* pode trabalhar com uma amplitude global (360° na horizontal e 80° da vertical) ou respeitar uma amplitude definida graficamente de acordo com a área de interesse.

As resoluções e alcances das varreduras *Laser* podem ser associados de acordo com as opções:

*High e near* - Alta resolução (1,2 milhões de pontos), num intervalo de 5 a 400 metros de raio;

*High e far* - Alta resolução (1,2 milhões de pontos), num intervalo de 30 a 700 metros de raio;

*Standard e near* - Resolução padrão (600 mil pontos), num intervalo de 5 a 400 metros de raio;

*Standard e far* - Resolução padrão (600 mil pontos), num intervalo de 30 a 700 metros de raio;

Também, há as opções para comando de fotografias como:

*Combined* - Combinação de fotografia e varredura *Laser*;

*Photo only* - Apenas fotografia;

*Range only* - Apenas varredura *Laser*.

Para que se tenha uma varredura *Laser* referenciada, faz-se necessário “amarrá-la” a um ponto de “ré” (*back sight*). A obtenção das coordenadas da estação e ponto de “ré” é feita com o auxílio de um receptor GPS que é acoplado sobre o aparelho de varredura. Na falta do equipamento GPS o escaneamento deve-se iniciar a partir de um ponto (estação) anteriormente referenciado. As coordenadas da estação e também do ponto de “ré” devem ser inseridas na configuração do *tablet*.

A Figura 3.13 mostra o equipamento *I-Site 4400* com um receptor GPS acoplado.



**Fig 3.13 - Laser Scanner I-Site 4400 com GPS acoplado**  
**Fonte: Cortesia MAPTEK (2009)**

Definida a estação e as características do trabalho é iniciada a varredura *Laser*, tendo como origem o ponto de “ré” (0°) para trabalhos com amplitude global.

Como o objetivo do levantamento, é a obtenção do volume das pilhas de minério, é necessário que se tenha a conformação física das pilhas, ou seja, o MDT. Para tanto, faz-se varreduras *Laser* tantas quanto forem necessárias de modo a conseguir dados de todos os lados ou faces das pilhas. O aparelho registra dados relativos a pontos tais como podemos ver, ou seja, de uma mesma posição o que nós podemos ver será registrado pelo *scanner*, respeitadas as limitações de alcance e de amplitude vertical.

O desenvolvimento das atividades de campo requer apenas um operador, sendo necessário que o mesmo tenha conhecimentos e experiência para saber escolher os pontos de instalações (estações) do *scanner*. Havendo possibilidades trabalham-se duas pessoas conjuntamente, sendo a função da segunda, o auxílio ao transporte dos equipamentos para se mudar de estação.

Para cada varredura *Laser* deve haver nova configuração do *tablet*, com novas entradas de nomes, altura de instalação, coordenadas, etc. Porém, não há necessidade que todas as varreduras, de um mesmo levantamento, sejam referenciadas pelas atividades de campo. O referenciamento de apenas uma tomada de dados permite, por processamento posterior, que todas as outras se tornem também referenciadas.

## ii) Metodologia empregada no tratamento dos dados de campo

Após as coletas de dados *Laser scanner*, os arquivos gerados e gravados no *tablet* são descarregados no computador onde são tratados, passando por várias fases até a obtenção final dos volumes das pilhas de minério.

No aplicativo computacional *I-Site Studio* é criado e nomeado um arquivo para recebimento dos dados brutos coletados. Com esse arquivo aberto devem-se importar todos os arquivos de dados de varreduras do *tablet* do *Laser Scanner*.

Importados os arquivos, esses aparecerão na tela do computador como apresentado pela Figura 3.14, sendo recomendado para melhor identificação, que em cada arquivo os pontos coletados estejam em cores diferentes.

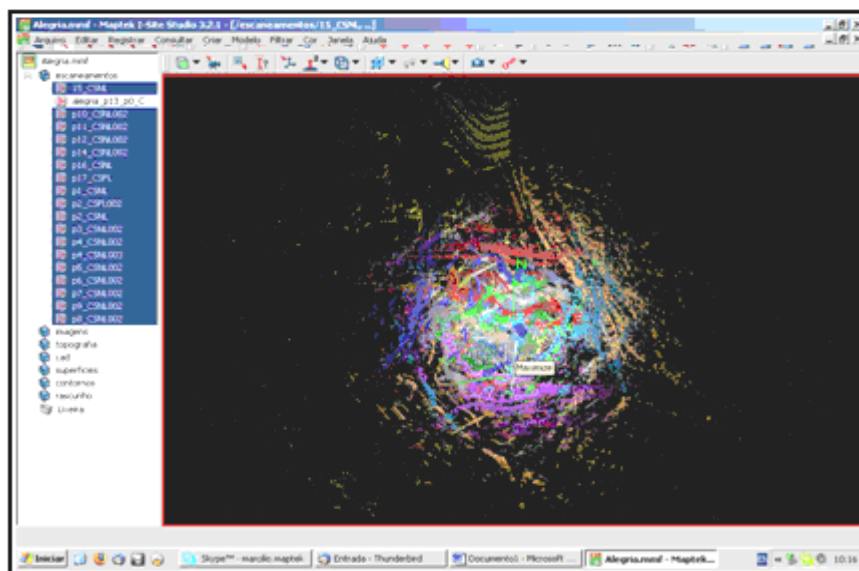


Fig 3.14 - Arquivos de pontos *Laser* em cores distintas

Com os arquivos baixados procede-se o referenciamento das Varreduras Laser. Uma varredura Laser é dita referenciada quando são conhecidas as coordenadas do ponto onde está instalado o Laser Scanner e a direção em relação a um ponto de “ré”, também de coordenadas conhecidas. A partir desses dados serão conhecidas as coordenadas de todos os pontos laser.

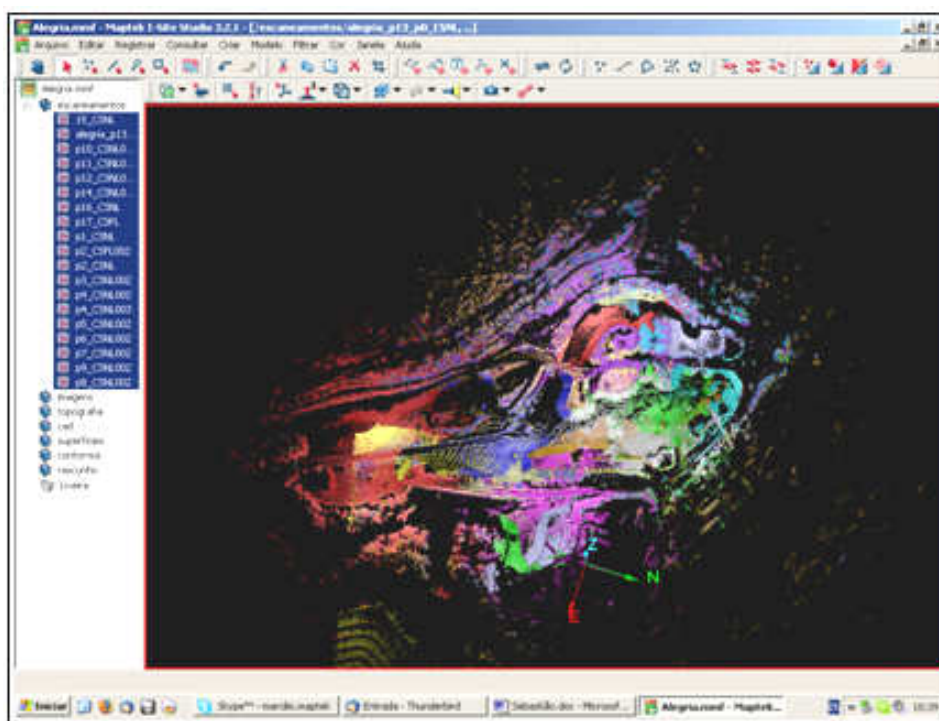
Neste trabalho, para a cobertura total da área em estudo, foram realizadas dezessete varreduras *Laser*, das quais apenas uma foi referenciada, ou seja, associada ao sistema de coordenadas local da mina de Alegria, servindo assim, de base para o referenciamento das demais varreduras.

O referenciamento ou Registro é feito arquivo por arquivo, por meio de movimentos de translação e rotação, promovendo a sobreposição do arquivo não referenciado ao arquivo de base através de um ou mais pontos em comum.

O aplicativo computacional *I-Site Studio* permite, de maneira automática, um ajustamento final (fino) no referenciamento das varreduras.

O referenciamento de todas as outras varreduras se faz, de maneira seqüencial e acumulativa, seguindo os mesmos procedimentos.

A Figura 3.15 apresenta a nuvem de pontos *Laser* após o processo de referenciamento.

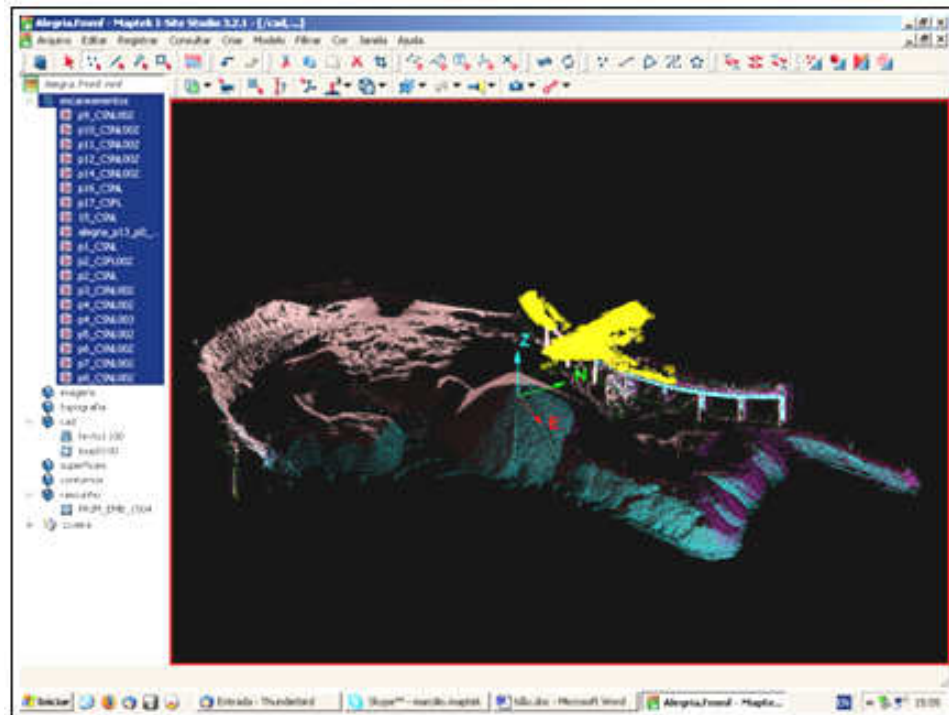


**Fig 3.15 - Resultado do referenciamento das varreduras *Laser***

Estando todos os arquivos *Laser* referenciados, passa-se à edição da nuvem de pontos por eliminação de todos os pontos que foram levantados e que não interessam aos estudos. A primeira exclusão é feita por filtragem a partir da definição de um polígono que envolva todos os pontos de interesse. Por meio da ferramenta “filtragem por polígono”, todos os pontos externos aos polígonos selecionados são, automaticamente, excluídos. Os polígonos utilizados nesta filtragem foram aqueles definidores dos limites de cada pilha de minério.

Após a filtragem automática, deve-se fazer uma edição fina manual, excluindo os pontos, que ainda fazem parte do arquivo, e que são indesejáveis como postes, árvores, equipamentos, etc. Esta etapa se desenvolve através da seleção dos pontos e de suas exclusões (*delete*) manuais.

A Figura 3.16 apresenta a seleção, para exclusão, de alguns pontos de uma estrutura física e a Figura 3.17 a situação após a edição final.



**Fig 3.16 - Seleção de pontos para edição manual**

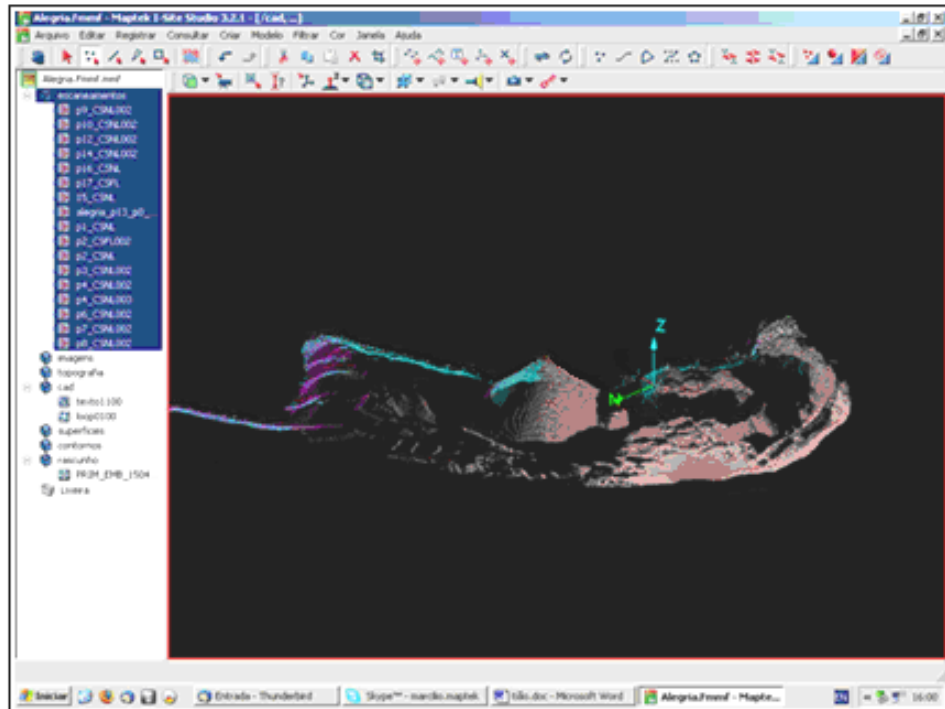


Fig 3.17 - Situação após a edição manual

Definidos os limites físicos finais de cada pilha de minério efetua-se a triangulação automática dos pontos coletados, gerando assim, as superfícies físicas das pilhas. O aplicativo computacional *I-site Studio* utiliza para esse fim a técnica de triangulação de Delaunay.

### iii) Metodologia aplicada na determinação dos volumes de minério

Após a geração dos modelos digitais de cada pilha de minério, seus volumes foram determinados pelo *software I-Site Studio*, por comparação entre os modelos digitais atuais e o modelo original do pátio do embarcadouro. Esse modelo referência, nomeado como “primitiva”, foi fornecido pela Gerencia de Planejamento a Curto Prazo da Mina de Alegria - Vale, através da Supervisão da área de topografia, sendo o mesmo, determinado a partir de levantamentos GPS realizados na data de 15/04/2009.

### 3.2.3 Tecnologia *Laser Scanner* Aerotransportado

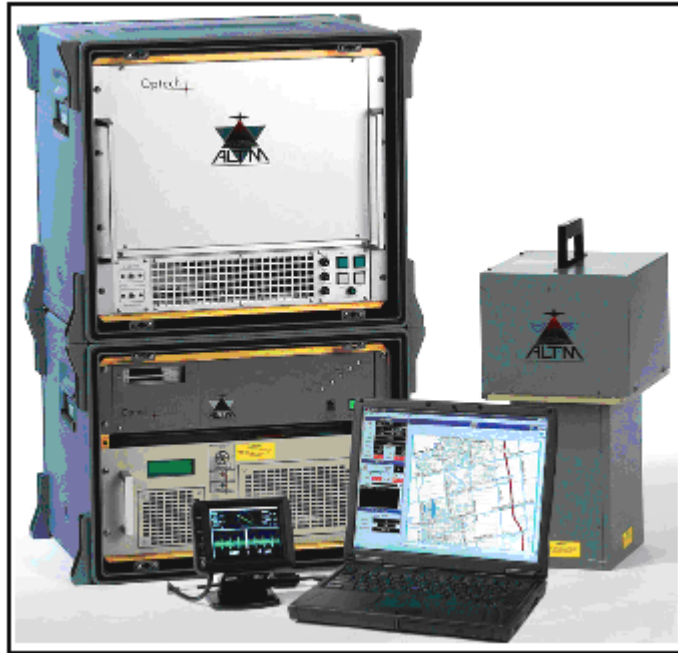
Neste tópico é abordado o processo de Levantamento *Laser Scanner* Aerotransportado (LSA) utilizado para obtenção dos modelos digitais das pilhas de minério.

Os dados de LSA foram adquiridos na data de 16/09/2009, por uma equipe de 03 funcionários da empresa GEOID Aerolevantamentos (piloto, operador do sistema aerotransportado e operador GPS em solo). Todas as fases do trabalho foram desenvolvidas de acordo com as Instruções de Serviço e de Trabalho adotadas pela GEOID Aerolevantamentos.

#### 3.2.3.1 - Materiais utilizados na aplicação da tecnologia LSA

Nos trabalhos de levantamento em campo foram utilizados um **Sistema Sensor Laser Optech 3100EA**, fabricado no ano de 2005 e responsável pela emissão e captação dos pulsos *laser*; uma **Câmera Fotogramétrica Digital Rollei-Metric** modelo **AIC-Pro 45**, fabricada em 2009 e utilizada na cobertura fotogramétrica; **Receptores GPS Trimble 5700** e **Trimble/Optech**, modelo específico para o sensor 3100EA; **Notebook** para controle do sistema aerotransportado e uma **Aeronave Sêneca II - EMBRAER 810 C**, responsável pela locomoção da equipe e equipamentos.

As Figuras 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22 apresentam, respectivamente, o sistema sensor *laser*, a câmera fotogramétrica digital e sua unidade de montagem, uma imagem aérea obtida por essa câmera e a aeronave utilizada nos trabalhos.



**Fig 3.18 - Sensor Laser**  
**Fonte: GEOID (2009)**



**Fig 3.19 - Rollei-Metric AIC**  
**Fonte: Hellmeier (2007)**



**Fig 3.20 - Unidade de montagem da Rollei-Metric AIC**  
**Fonte: Hellmeier (2007)**



Fig 3.21 - Exemplo de imagem obtida pela Rollei-Metric AIC  
Fonte: GEOID (2009)



Fig 3.22 - Aeronave Sêneca II  
Fonte: GEOID (2009)

Para o tratamento dos dados, foram utilizados os aplicativos computacionais **ALTM-NAV Planner**, utilizado na elaboração do plano de vôo; **ALTM-NAV Controller** - *Software* de controle da câmera durante o vôo; **PosPac versão 5.1.1**, utilizado no tratamento dos dados coletados pelos receptores GPS; **DASHMap**, *Software* proprietário da *Optech*, utilizado na configuração dos pulsos *laser* e na geração e referenciamento da nuvem de pontos; **TerraScan**, *Software* usado na classificação da nuvem de pontos *laser* e **TerraModeler / AutoCAD**, responsáveis pela geração das entidades de representação do relevo, ou seja, os Modelos Digitais de Terreno, assim como, do cálculo dos volumes.

### 3.2.3.2 - Metodologia aplicada com a tecnologia LSA

#### i) Metodologia empregada na coleta de dados em Campo

O planejamento e programação dos serviços caracterizam-se pela elaboração do plano de vôo sobre a área a ser mapeada e definição dos recursos (equipamentos, mão de obra, identificação da base georreferenciada) necessários à sua execução.

Durante o planejamento, estabelece-se uma relação entre as capacidades do sensor com as necessidades do projeto a executar, definindo assim o plano de vôo, contendo os dados de altura de vôo, ângulo de varredura, velocidade, equidistância dos pontos, frequência do *Laser*, etc..

Os trabalhos de campo em solo se desenvolvem a partir da instalação da base (GPS *Master*) para a amarração das coordenadas. Consiste na identificação e ocupação de um marco pré-existente. Na inexistência de um marco, sua implantação deverá ser promovida através do transporte de coordenadas de uma base georreferenciada. Neste trabalho não foi necessário o transporte de coordenadas por já existir na área de estudo um marco geodésico implantado, o VT28 de coordenadas SAD 69 - UTM, E = 657309.853; N = 7768698.051 e H = 933.637.

No solo, além do receptor GPS base, pontos de controle aleatórios foram coletados por outro receptor GPS *rover* RTK, nas proximidades da base, com a finalidade de aferir os dados levantados pelas varreduras *laser*.

O processo de operação do sistema do *Laser* aerotransportado consiste na execução de *softwares* específicos para controlar o sistema de varredura (*scanner*) acompanhado do monitoramento do sistema GPS, recobrimento da área e condições de vôo.

O operador do sistema é responsável pelo acionamento e encerramento do sistema *Laser*, de acordo com a programação previamente definida, bem como, pela verificação das possíveis falhas decorrentes das varreduras, de modo a poder corrigi-las ainda durante o sobrevôo. Antes, uma linha de teste deve ser coletada com um disparo preliminar do *Laser*.

A Figura 3.23 apresenta a tela do *notebook* a bordo da aeronave, responsável pelo controle do sistema *Laser* aerotransportado, a qual está relacionada todas as informações da varredura a *Laser*. Refere-se a uma simulação de sobrevôo, onde foram provocadas algumas possíveis falhas a título de ilustração.

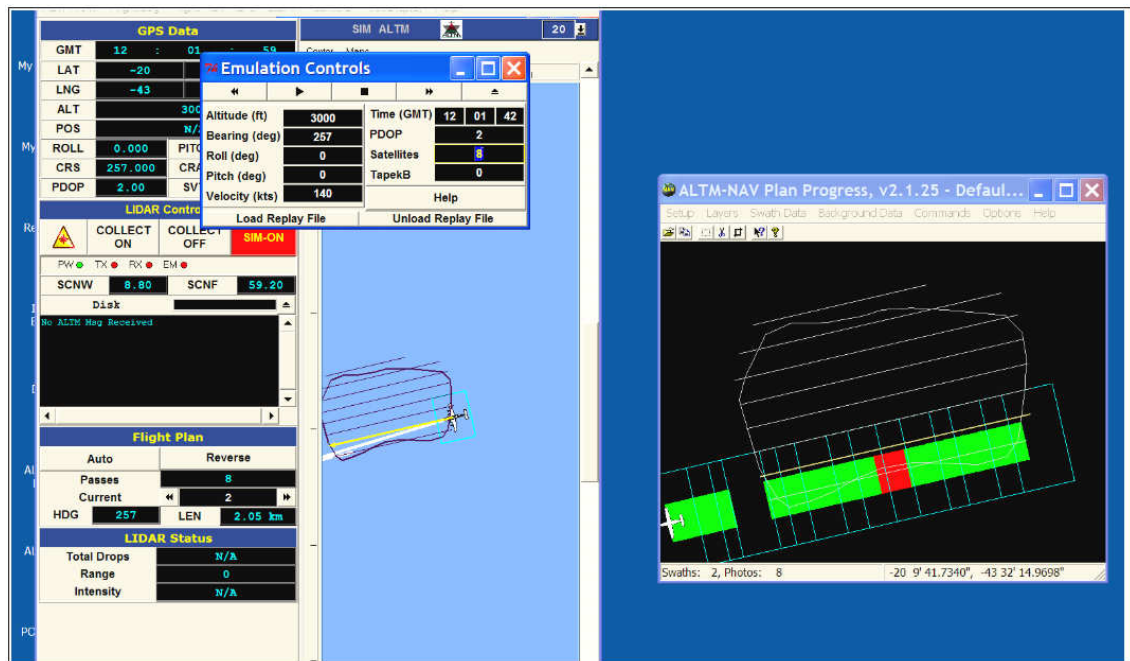


Fig 3.23 - Tela de controle o sistema *Laser Scanner*

A faixa verde representa a varredura a *Laser*, segundo uma direção definida no plano de vôo, com resultado satisfatório. O trecho em vermelho se refere a uma falha de posicionamento decorrente do sistema GPS, provocada, por exemplo, por PDOP (*Positional Dilution of Precision*) elevado ou por número insuficiente de satélites rastreados. O trecho escuro representa uma falha no sistema de varredura *Laser*, provocada por desligamento do aparelho ou pane. Ainda durante o sobrevôo, detectados erros ou falhas como as apresentadas, deverão o piloto e o controlador do sistema, proceder a uma nova cobertura sobre os trechos.

Os polígonos em azul claro representam as fotos aéreas adquiridas ao longo da direção de vôo.

A Figura 3.24 mostra uma das telas disponíveis ao piloto, através da qual o piloto recebe informações, principalmente relativas aos desvios da rota de vôo.

As informações presente na tela são:

DSTS (-2.9 km) - Distância da aeronave ao início do escaneamento;

DSTF (-753 m) - Distância da aeronave ao fim do escaneamento;

RNG (N/A) - Altura real de propagação do *Laser*;

DCRS (279.4) - Ângulo de Proa desejado;

ACRS (279.4) - Ângulo de Proa atual;

VEL (140 kts  $\approx$  260 km/h) - Velocidade de vôo (knots - nós);

Desvio de rota (-0 m) - Valor relativo ao desvio da rota proposta.

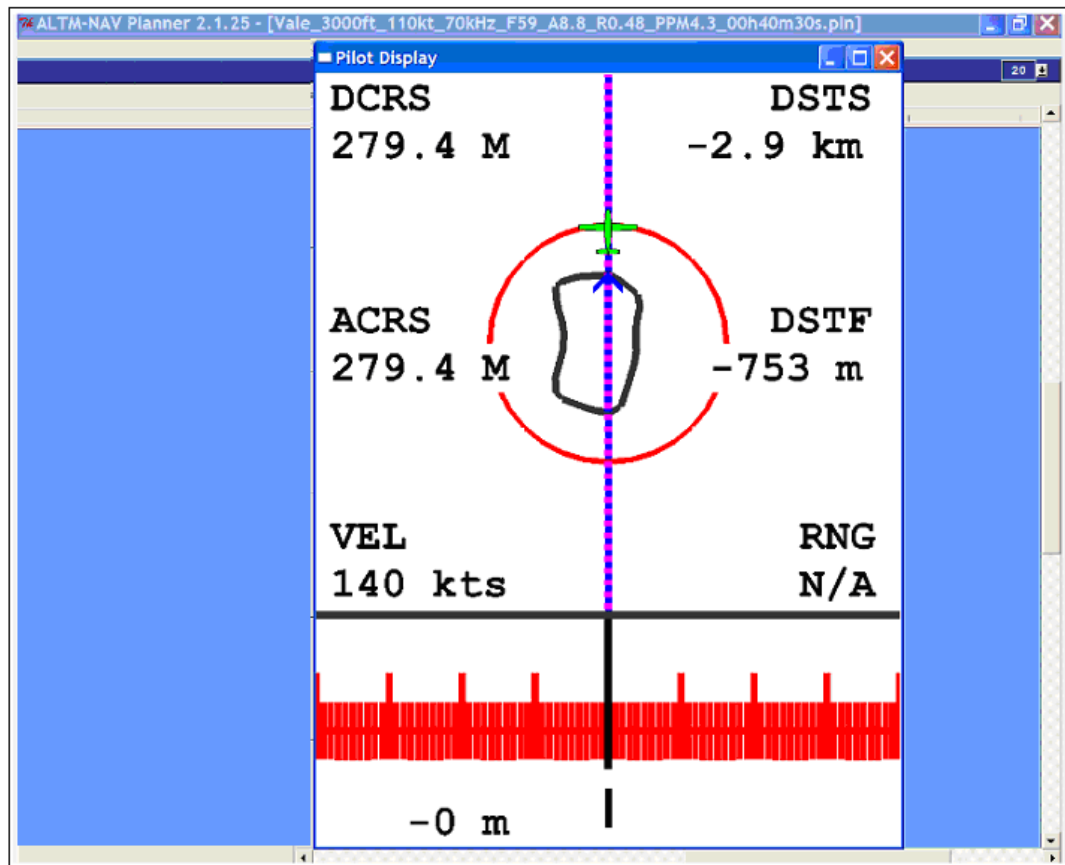


Fig 3.24 - Tela de controle de sobrevôo

Ao término da varredura, o sistema é desligado, sendo neste momento, notificado ao operador do receptor GPS base o término do levantamento.

Os dados coletados, gravados em arquivos específicos, são posteriormente processados em solo.

## ii) Metodologia aplicada no processamento dos dados de campo

O processamento dos dados se dá a partir da utilização de *softwares* específicos para computação e leitura dos dados *Laser* e de GPS (*master* e remoto),

gerando como produtos nuvens de pontos georreferenciados que serão utilizados no mapeamento e aferição do trabalho.

A aferição dos pontos coletados pela varredura *Laser* é realizada a partir de suas confrontações com os pontos levantados pelo receptor GPS *rover* na área mapeada.

Pelo *software* PosPac são importados os arquivos de dados do GPS do sistema, do GPS base e do GPS *rover*. São inseridas as coordenadas da base e é promovido o processamento dos arquivos, visando fazer as correções dos dados brutos obtidos pelo GPS do sistema em relação aos obtidos pela base de referencia, resultando em um arquivo GPS do sistema *Laser*, corrigido e georreferenciado. Esse arquivo define a trajetória de vôo da varredura *Laser*, que é, posteriormente, “amarrado” à nuvem de pontos levantada pelo *Laser Scanner*.

A nuvem de pontos *Laser Scanner* é gerada pelo *software* DASHMap (proprietário da Optech). Por esse aplicativo computacional importa-se o arquivo bruto de varredura, o arquivo de calibração do equipamento (previamente obtido) e o arquivo de dados do GPS do sistema *Laser*, já georreferenciado.

Define-se um polígono envolvendo a área a ser mapeada, excluindo do processamento, os dados levantados em excesso.

Deve ser configurada a ordem dos pulsos de retorno que interessam ao trabalho, ou seja, o primeiro pulso de retorno, o último pulso de retorno ou os pulsos de retorno intermediários. O equipamento *Laser Scanner* utilizado tem a capacidade de registrar até quatro pulsos de retorno para cada pulso *Laser* emitido, sendo o primeiro e o último, aqueles que interessam neste trabalho. Os primeiros pulsos definem pontos de elevação acima do solo, enquanto que os últimos definem pontos da superfície do solo.

A configuração da varredura *Laser* no planejamento de vôo estipula uma sobreposição de 35% entre as linhas de varredura. Essa sobreposição provoca a duplicidade de pontos naqueles trechos, que são excluídos através do aplicativo computacional *TerraScan* (macro *Cup Overlap*).

A fase seguinte é a classificação da nuvem de pontos, de acordo com a ordem dos pulsos de retorno, em diferentes arquivos representando o solo, a vegetação, as edificações e equipamentos existentes.

Sobre a nuvem de pontos *Laser* são sobrepostas as linhas limites das pilhas e pelo *software* *TerraScan* é promovida a exclusão de todos os pontos externos às pilhas.

Após a individualização das pilhas de minério é gerada, entre os pontos *Laser*, uma Rede Irregular de Triângulos (TIN), por aplicação da técnica de triangulação Delaunay, utilizando o *software AutoCAD Civil 3D 2010*, obtendo-se assim, a superfície física de cada pilha (MDT).

### **iii) Metodologia empregada na determinação dos volumes de minério**

De posse do MDT de cada pilha de minério e também de suas primitivas (bases) procedeu-se, automaticamente, à determinação de seus volumes, por comparação de superfícies, através do *software AutoCAD Civil 3D*.

Também, foram calculados os volumes de minério a partir dos dados levantados pela tecnologia LSA, aplicando o *software TerraModeler*, que acompanha o pacote de aplicativos do sistema *Laser Aerotransportado - Optech*.

#### **3.2.4 Tecnologia Pós-Sinalização**

Neste tópico são apresentados os equipamentos utilizados e a metodologia desenvolvida por aplicação da tecnologia de Pós-Sinalização, na coleta e tratamento dos dados para a determinação dos volumes de minério depositados em pilhas.

Os trabalhos foram realizados por profissionais da empresa HGT Geoprocessamento na data de 22/07/2011.

Diferentemente das situações anteriores, em que as comparações das tecnologias LST e LSA foram em relação à técnica GPS, o levantamento e os resultados da Pós-Sinalização foram comparados com as medições feitas pela técnica LST. Porém, nesta oportunidade, os levantamentos LST foram feitos pela equipe de topografia da mina de Alegria. Em 2009, época em que foram feitas as medições com LST e LSA, a equipe de topografia da mina de Alegria realizava os levantamentos de volumes de minério utilizando a tecnologia GPS. Atualmente, em 2011, a técnica utilizada para este fim é o *Laser Scanner Terrestre*.

### 3.2.4.1 - Materiais utilizados na aplicação da tecnologia Pós-Sinalização

A aplicação da técnica denominada de Pós-Sinalização compreende serviços em solo com coleta de dados aéreos a baixas alturas.

Para a coleta de dados aéreos, foi utilizado como equipamento um Aeromodelo Remotamente Pilotado (ARP) “*Endurance*® 100”, confeccionado de isopor e acionado por propulsão elétrica. Acoplado ao aeromodelo estão um par de câmeras métricas digitais de pequeno formato, responsável pela coleta de imagens inclinadas, e uma câmera grande angular de 5mp, responsável pelo georreferenciamento da trajetória de vôo. Todo o sistema de coleta de dados tem peso total inferior a 1500 gramas e é controlado do solo por sistema remoto.

Para a realização dos trabalhos de coleta de dados em solo foram utilizados um GPS RTK *Trimble* 5800 e um coletor de dados *Trimble* TSC2, na definição dos pontos de apoio, além de um notebook para controle de navegação e da coleta aérea dos dados.

A Figura 3.25 apresenta o equipamento utilizado na coleta dos dados aéreos.



Fig 3.25 - Aeromodelo “*Endurance* 100”.

Para o tratamento dos dados foi utilizado o Centro de Processamento de Dados (CPD) denominado *GeoExpert*®, por aplicação da *Suite Endurance*®, como *software* de geoprocessamento.

### 3.2.4.2 - Metodologia aplicada com a tecnologia Pós-Sinalização

#### i) Metodologia empregada na coleta de dados em Campo

Os trabalhos de campo foram desenvolvidos por uma equipe composta por três profissionais, todos operando em solo. Um membro da equipe (Controlador de Coleta) é o responsável pelo controle visual do ARP e pelos acionamentos iniciais e finais da câmera, quando a coleta não é programada para ser automática. O “Navegador”, outro operador da equipe, é o responsável pelo controle do vôo, guiando o processo do controlador de coleta, sendo responsável por indicar áreas nas quais não houve adensamento adequado de imagens. Completando a equipe, há o “Fiscal de Coleta”, profissional responsável pela coleta de dados GPS nos pontos de apoio, pela ajuda na decolagem do ARP e pela segurança do espaço aéreo, entorno do qual são desenvolvidos os trabalhos. A tomada aérea deve ser abortada a qualquer momento, caso haja presença de outros objetos aéreos de maior porte na região.

Os trabalhos terrestres são realizados em um primeiro momento e correspondem a levantamentos GPS em pontos de referência no solo, definidos em locais estratégicos de fácil acesso. Esses pontos são materializados em campo por marcação através de tinta cal ou fixação de fitas reflexivas e são “visitados” por um receptor GPS, registrando assim, suas coordenadas tridimensionais.

A coleta de dados por via aérea é realizada em baixas alturas e consistem em um sobrevôo à área, através do qual são obtidas as aerofotos pelas câmeras fotográficas digitais transportadas pelo ARP.

O sobrevôo ocorreu a uma altura de 150 metros em relação à superfície de decolagem e a uma velocidade de 50 km/h, durante 8 minutos. O disparo da câmera se deu de maneira automática à taxa média de uma foto a cada 2 segundos, nas áreas de interesse. Foram obtidas 60 aerofotos de pequeno formato, sendo que apenas 15 foram utilizadas na comparação estereoscópica para a geração dos MDT das pilhas de minério.

A Figura 3.26 mostra a confecção de uma das marcações em solo e a Figura 3.27 mostra uma das fotografias obtidas por via aérea.



**Fig 3.26 - Marcação de ponto de controle no solo.**



**Fig 3.27 - Fotografia Pós-Sinalização**

**ii) Metodologia empregada no processamento dos dados de campo**

O processamento dos dados obtidos em campo foi realizado pela equipe da empresa HGT Geoprocessamento, utilizando-se uma central de processamento de dados, paralela e semi-autônoma, desenvolvida pela própria empresa, através de pesquisa de mestrado (HUGUET, 2003) e validada em pesquisa de doutorado (IDOETA, 2007), tendo sido adaptada para o processamento de dados obtidos pela atividade de Pós-Sinalização a partir de 2009.

O Centro de Processamento de Dados (CPD) utilizado, denominado *GeoExpert®*, consiste em 32 Unidades Centrais de Processamento (CPU) dispostas em rede, totalizando uma capacidade de processamento paralelo de 0,5 TeraFLOPS (0,5 trilhões de operações por segundo), 96 GigaBytes de Memória Volátil e 50 TeraBytes em unidades de armazenamento.

A Figura 3.28 mostra uma estrutura com 8 unidades do CPD semi-autônomo utilizado.



**Fig 3.28 - Unidade mestre da Central de Processamento de Dados GeoExpert®**

O *software* de geoprocessamento utilizado no CPD foi a *Suite Endurance*®. Desenvolvido em Java, consiste em um conjunto de 491 módulos ou objetos, totalizando 272.000 linhas de código, na ocasião deste processamento.

O sistema processa automaticamente fotografias métricas, obtendo um modelo de superfície (MDS), composto por uma nuvem de pontos tridimensionais com uma densidade de 70 pontos por metro quadrado, utilizando-se uma comparação estéreo, simultânea entre as múltiplas imagens coletadas. O produto desse processamento é, posteriormente, filtrado por processos específicos, através de módulos de filtragem de dados estéreos, para diferentes aplicabilidades como, neste trabalho, para a geração de MDT das pilhas de minério.

### iii) Metodologia aplicada na determinação dos volumes de minério

Após a geração dos modelos digitais das pilhas de minério, seus volumes foram determinados por módulo específico da *Suite Endurance*®, por comparação entre os modelos digitais atuais e o modelo original (primitivas) do pátio do embarcadouro.

#### 3.2.5 Análise Multicritério (Processo Analítico Hierárquico)

O Processo Analítico Hierárquico (AHP) foi aplicado neste trabalho, como ferramenta do processo de apoio à decisão, analisando os resultados obtidos por aplicação de diferentes tecnologias, na coleta de dados em campo, para a determinação de volumes de minério. As análises pelo AHP tendem a definir um *ranking* entre as tecnologias, apontando aquela melhor indicada para a realização dos trabalhos dentro do cenário proposto.

O AHP foi desenvolvido a partir dos seguintes passos:

- 1) Criação de uma estrutura de decisão hierárquica em função do problema, das variáveis e dos critérios considerados;
- 2) Comparações binárias entre as variáveis: São promovidas as comparações binárias entre as variáveis, determinando o impacto que cada critério exerce sobre cada variável. Essas comparações definem as matrizes de preferência das variáveis em

relação a cada critério. São desenvolvidas várias matrizes, tantas quanto o número de critérios;

3) Definição das prioridades globais entre as variáveis;

4) Comparações binárias entre os critérios: Também é gerada a matriz de comparação entre os critérios, definindo a importância que cada um exerce sobre o outro;

5) Avaliação das prioridades através da determinação de suas coerências: As matrizes das prioridades devem ser avaliadas quanto à coerência dos valores atribuídos às variáveis e aos critérios. Esta avaliação, Razão de Consistência (RC), leva em consideração a totalização das entradas (vetor soma ponderada), o vetor de consistência, o índice de coerência, o índice aleatório e o número de variáveis. Segundo Cicone Júnior (2008), caso o resultado da avaliação seja menor ou igual a 0,1 ele pode ser considerado confiável, caso contrário deve-se reavaliar as comparações efetuadas a fim de melhorar a consistência;

6) Definição do resultado: O resultado é gerado a partir da multiplicação entre a matriz de prioridade das variáveis e a matriz de comparação entre os critérios. A matriz resultante apresenta os índices de indicação de cada tecnologia ao problema proposto, de acordo com as variáveis analisadas.

A montagem das matrizes de comparações binárias, entre as variáveis e também entre os critérios, tem como base a escala proposta por Thomas Lorie Saaty (BARAÇAS & MACHADO, 2006). Esta escala é mostrada pela Tab. 2.4, no capítulo 2, deste trabalho.

Foram adotados e definidos, como critérios comuns às aplicações das tecnologias, as seguintes variáveis de análise:

1) **Recursos Humanos:** Número de operadores envolvidos na coleta de dados em campo;

2) **Tempo de Execução:** Tempo utilizado na coleta de dados em campo;

3) **Produto:** Número de pontos levantados e utilizados na geração dos modelos digitais e, conseqüentemente, nos cálculos dos volumes;

4) **Rendimento ou Produtividade:** Conforme Melo *et al.* (2006), produtividade é definida como sendo a relação entre as saídas geradas por um sistema

(*Output*), e os insumos necessários à produção dessas saídas (*input*), ou seja, a comparação entre a quantidade de trabalho realizado (por exemplo, número pontos levantados) e os recursos consumidos para realizar o trabalho (por exemplo, homem-hora ou hora-máquina). Assim sendo, a produtividade neste trabalho é determinada pela relação entre o número de pontos levantados e o produto do número de operadores envolvidos com o tempo de coleta (Equação 3.2);

$$\text{Prod.} = \text{N}^\circ \text{ pontos} / (\text{N}^\circ \text{ de operadores} \times \text{Tempo}) \quad (3.2)$$

5) **Custo:** Aquele relativo à execução dos serviços de maneira terceirizada. Devido à complexidade em se determinar o custo que a empresa interessada nos serviços teria para desenvolver os trabalhos por sua conta própria (contratação de pessoal qualificado, aquisição de equipamentos, encargos, etc.), optamos em considerar a variável custo, como sendo aquele relativo a uma prestação de serviço, contratado junto a uma empresa especializada.

Para a apuração dos valores, foi promovida uma pesquisa junto a empresas especializadas nas tecnologias empregadas neste trabalho. Para tanto, foram definidas as características da prestação de serviços, como a seguir:

Tipo de serviço: Levantamento do volume de minério estocado no pátio do embarcadouro da Mina de Alegria - Vale - Mariana - MG;

Técnica de Levantamento em campo: Aplicação de uma das tecnologias: GPS, *Laser Scanner* Terrestre, *Laser Scanner* Aerotransportado ou Pós-Sinalização;

Produto: Valores relativos aos volumes (m<sup>3</sup>) de cada pilha individualizada;

Periodicidade: Duas vezes ao mês (próximo aos dias 15 e 30 de cada mês);

Vigência do contrato: 12 meses;

Valores expressos em dólar americano;

Área de abrangência do pátio do embarcadouro: 640.101,71 m<sup>2</sup> (64 ha 01 a 01 ca).

6) **Segurança Ocupacional:** A indústria da mineração em geral, apresenta riscos físicos como, por exemplo, desabamentos, rolamento de pedras e explosões, que constituem as principais causas de acidentes.

Todos os procedimentos operacionais na mineração estão submetidos a Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego (NR) dentre as quais destacamos a NR 22 (1978), que explicita sobre os trabalhos em pilhas de estéril ou minério desmontado que devem ser executados de acordo com normas de segurança específicas elaboradas por técnico legalmente habilitado.

Dentre outras abordagens, a NR 22 trata dos trabalhos realizados em superfícies inclinadas com risco de queda superior a dois metros, nos quais é obrigatório o uso de cinto de segurança adequadamente fixado.

Também, de acordo com a NR-04 (1978), as indústrias extrativas minerais estão enquadradas na Relação de Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) com Grau de Risco (GR) índice 4, numa escala de 1 a 4.

Considerando os mais variados riscos inerentes ao desenvolvimento de atividades no ambiente físico de uma mineração e as dificuldades em se quantificar a segurança dos operadores, optamos em adotar um índice que represente o Grau de Segurança Ocupacional (GSO), sendo este inversamente proporcional ao produto, tempo X número de operários expostos a riscos ao exercerem uma atividade no ambiente de uma mineração. Essa relação é definida pela Equação 3.3:

$$\boxed{\text{GSO} = 1 / (\text{Tempo de exposição} \times \text{N}^\circ \text{ de operadores})} \quad (3.3)$$

7) **Fechamento Contábil:** Variação percentual entre o estoque contábil (produção menos as saídas de minério) e o estoque medido topograficamente.

Torna-se importante ressaltar que as variáveis “Precisão” e/ou “Acurácia” dos sistemas de coletas de dados, não foram tratadas isoladamente neste trabalho, por fugir de nossos objetivos e existir inúmeros trabalhos publicados que enfocam esse tema, como em BERNARDI (2002), TRABACHINI *et al.* (2009), WUTKE (2006), SCHIMALESKY (2008), BRANDALISE (2002), BRANDALISE (2004), dentre outros.

Como descrito na caracterização de nosso problema, o propósito é analisar diferentes aplicabilidades de técnicas de sensoriamento remoto, considerando entre

outras variáveis, o comportamento dos resultados diante do fechamento contábil mensal de produção e estoque da mina de Alegria.

## **CAPÍTULO 4      RESULTADOS**

---

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das pesquisas e aplicações práticas das tecnologias GPS, *Laser Scanner* e Pós-Sinalização, sendo suas análises e avaliações, feitas no próximo capítulo.

### **4.1      RESULTADOS - GPS**

Quinzenalmente, como parte da programação de atividades da Gerencia de Planejamento a Curto Prazo e da Supervisão de Topografia da mina de Alegria, faz-se o levantamento topográfico das pilhas de minério estocado no pátio do embarcadouro para a determinação de seus volumes. Essas coletas de dados acontecem no meio e ao final de cada mês, através da aplicação da tecnologia GPS.

A aplicação das técnicas e metodologias de coleta e tratamento dos dados por GPS, constantes no capítulo 3, subseção 3.2.1 deste trabalho, resultaram nos valores que seguem apresentados.

Foram realizados dois levantamentos em duas épocas distintas, ou seja, nas datas de 28/07/2009 e 16/09/2009.

#### 4.1.1 Volumes das Pilhas de Minério

A Figura 4.1 apresenta as pilhas de minério no embarcadouro definidas por pontos levantados por GPS, na data de 28 de julho de 2009, já tratados e triangulados, com as linhas representativas dos pés, cristas e pontos intermediários, isolados ou no mesmo nível.

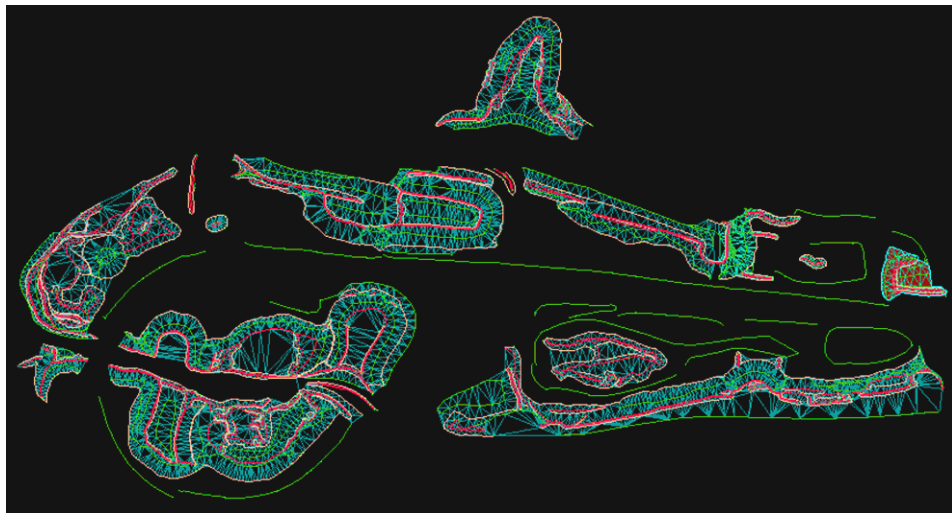


Fig 4.1 - Pilhas de minério - Mina de Alegria

Como referido e exemplificado no capítulo 3, seção 3.2.1, item “b”, para a determinação dos volumes das pilhas de minério é necessário que se tenha uma referencia física do ambiente sobre o qual as pilhas foram formadas. A Figura 4.2 apresenta o modelo digital “primitiva” do pátio do embarcadouro.

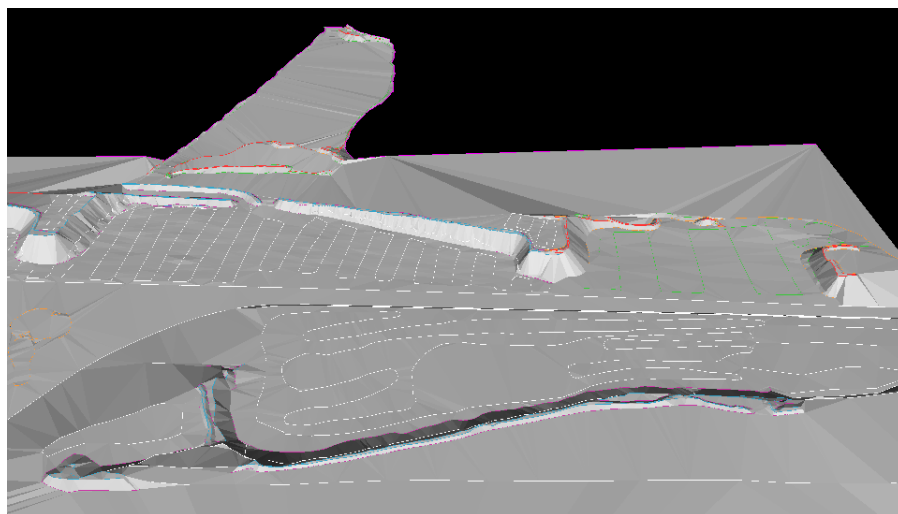


Fig 4.2 - MDT “primitiva” - Pátio do embarcadouro

O volume de cada pilha foi determinado individualmente a partir da primitiva e de seus limites físicos. É utilizado, como exemplo, para ilustrar este trabalho, o desenvolvimento do processo de determinação do volume da pilha “B” de minério. A Figura 4.3 apresenta a individualização da pilha “B” de minério (cor vermelha), sobreposta à primitiva (cor azul claro) com pontos triangulados, para a determinação do volume a partir da diferença entre os MDT.

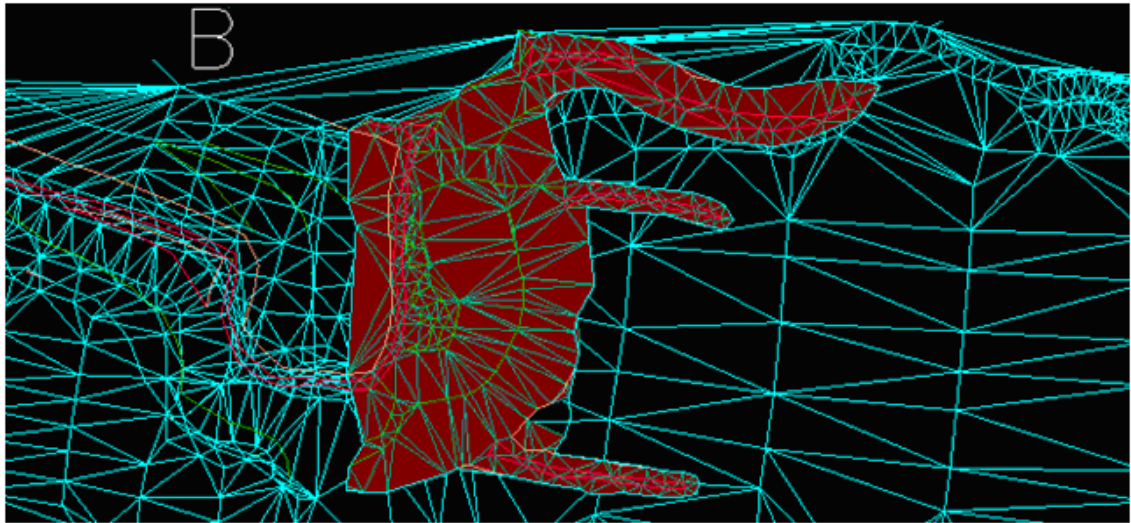


Fig 4.3 - Pilha “B” sobreposta à sua primitiva

No aplicativo computacional *Topograph-98SE*, a determinação do volume pode ser feita, utilizando duas metodologias: através da elaboração de seções transversais espaçadas uniformemente, tendo como referência (base) a superfície física original (primitiva) do terreno, ou através da comparação entre MDT. A segunda alternativa foi a utilizada, neste trabalho, para as determinações dos volumes das pilhas de minério.

A Figura 4.4 apresenta a geração de uma malha retangular sobre a conformação da pilha “B”, definindo a região (quadrilátero) para o cálculo do volume, respeitados os limites da pilha.

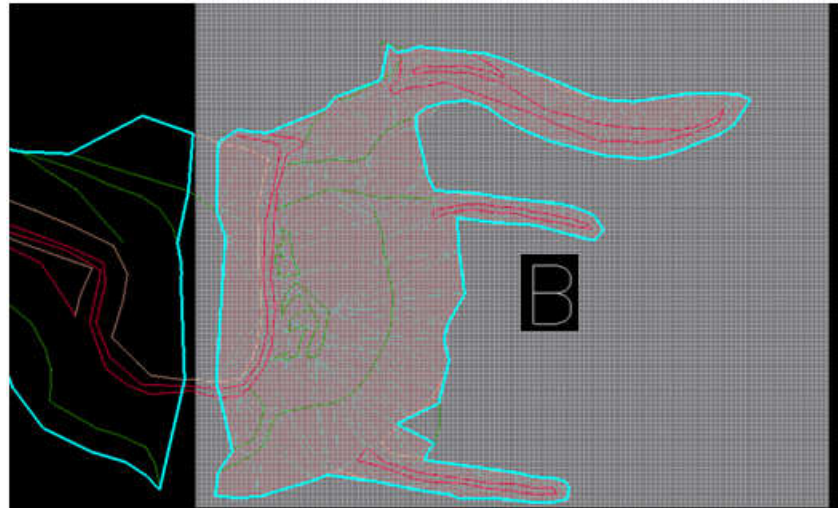


Fig 4.4 - Malha retangular, Pilha "B" e limite

A "janela" apresentada pela Figura 4.5 oferece a opção de entrar com os dados relativos ao cálculo do volume, ou seja, especificações dos arquivos de MDT (MDT referencia, segundo desenho ou segundo MDT), tipo de volume (corte, aterro), além de mostrar numericamente as coordenadas da região de cálculo. Essa região pode ser alterada pela mudança dos valores em suas coordenadas.

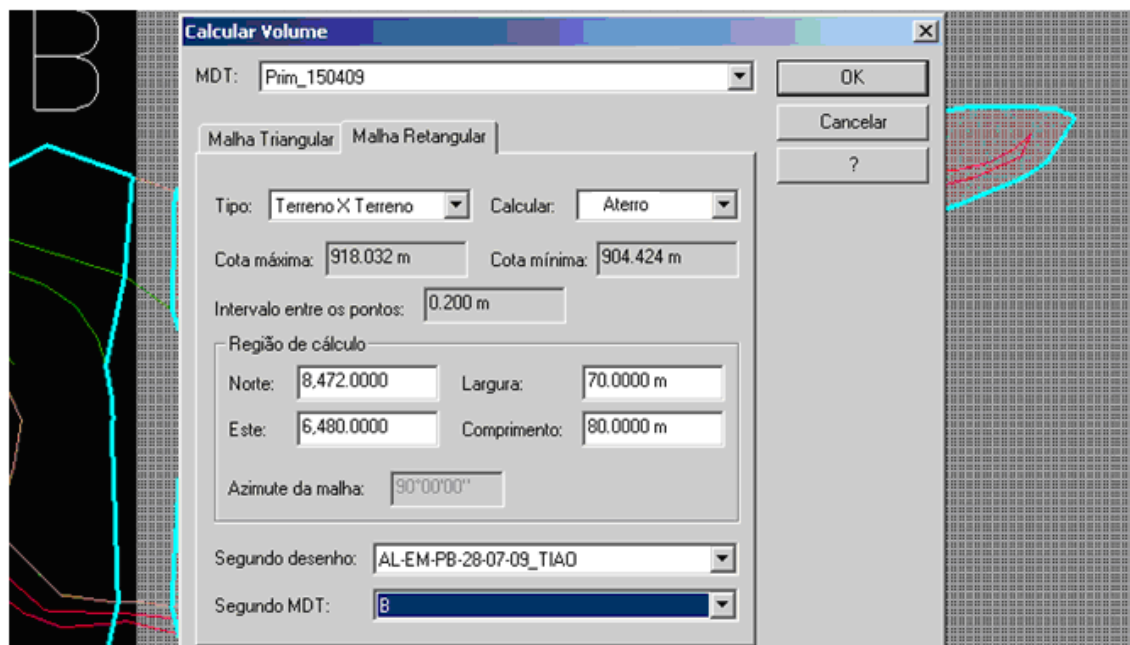


Fig 4.5 - "Janela" Cálculo de Volume, aterro

A Figura 4.6 apresenta o valor obtido para o volume da pilha "B" de minério do embarcadouro, resultado da aplicação da diferença de MDT pelo aplicativo computacional *Topograph-98SE*.

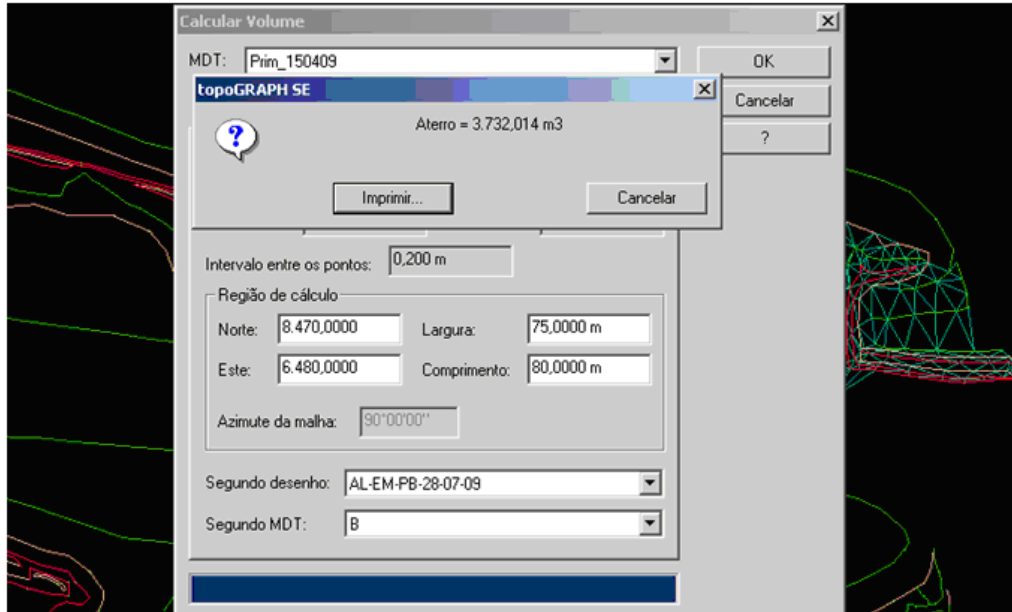


Fig 4.6 - Volume da pilha “B” de minério

A determinação dos volumes das demais pilhas de minério segue a mesma metodologia utilizada na obtenção do volume da pilha “B”. Pelas Tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os volumes apurados, para cada uma das pilhas, relativos aos levantamentos feitos, respectivamente, em 28/07/2009 e 16/09/2009.

Tabela 4.1 - Volume das pilhas de minério - Dados GPS (28/07/2009)

Medição Topográfica em m3			
Unidade Produtiva - Alegria			
Pilha	GPS	Pilha	GPS
A	573,33	H	38.133,41
MANGANÊS	836,00	I	25.950,86
B	3.732,01	J	2.468,55
B_PISO	244,78	L	254,350
C	9.311,56	M	29.272,040
D	39.662,72	N	61.392,240
E	10.082,95	O	15.244,810
E-PISO	321,52	R	4.630,890
F	15.772,58	U	25.998,06
G	9.256,49	MINEIRINHO	147.564,86
<b>Total</b>	<b>89.793,94</b>	<b>Total</b>	<b>350.910,07</b>
<b>TOTAL</b>		<b>440.704,01</b>	

Tabela 4.2 - Volume das pilhas de minério - Dados GPS (16/09/2009)

Medição Topográfica em m3			
Unidade Produtiva - Alegria			
Pilha	GPS	Pilha	GPS
A	607,15	I	17.690,87
B	5.366,77	J	2.117,31
C	35.528,55	L	694,65
D	1.569,40	M	24.366,030
E	25.927,60	N	27.871,220
E-PISO	180,81	O	23.114,360
F	36.008,49	R	24.365,480
G	50.648,65	U	35.518,230
H	34.324,15	MINEIRINHO	40.650,61
<b>Total</b>	<b>190.161,57</b>	<b>Total</b>	<b>196.388,76</b>
<b>TOTAL</b>		<b>386.550,33</b>	

#### 4.1.2 Fechamento Contábil a partir dos Volumes GPS

Como descrito no capítulo 2, item 2.5 “Fechamento Contábil”, uma equipe responsável pela programação e controle de produção realiza mensalmente o fechamento contábil de produção e estoque, baseado em dados de medições topográficas dos produtos em estoque, dados de produção de mina e da usina e dados de minério embarcado.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam o resultado dos fechamentos contábeis, respectivamente, nas datas de 28/07/2009 e 30/09/2009.

Tabela 4.3 - Fechamento Contábil - Dados GPS (28/07/2009)

CÁLCULO DO AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO					
Alegria - Julho / 2009					
Complexo Mariana	Un. Produtiva Alegria	Estoque Calculado Mês Atual (t)	Estoque Físico (Topografia) (t)	Ajuste Topografico (t)	Ajuste Topografico (%)
<b>TOTAL</b>		<b>978.592,11</b>	<b>985.986,64</b>	<b>7.394,53</b>	<b>0,75%</b>

Tabela 4.4 - Fechamento Contábil - Dados GPS (16/09/2009)

CÁLCULO DO AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO					
Alegria - Setembro / 2009					
Complexo Mariana	Un. Produtiva Alegria	Estoque Calculado Mês Atual (t)	Estoque Físico (Topografia) (t)	Ajuste Topografico (t)	Ajuste Topografico (%)
<b>TOTAL</b>		<b>842.800,34</b>	<b>858.711,73</b>	<b>15.911,39</b>	<b>1,85%</b>

O estoque calculado é obtido a partir dos dados de produção da mina e usina de beneficiamento e as saídas (embarque) de minério. O estoque físico se refere àquele existente no pátio do embarcadouro e que é obtido a partir de levantamentos topográficos. O ajuste representa a diferença entre os valores de estoque físico e calculado e é apresentado em tonelada e porcentagem.

O ANEXO 1 apresenta a “Planilha Matriz” do fechamento contábil e os anexos 2 e 3 apresentam, respectivamente, as planilhas completas de “Ajustes Topográficos” relativas aos meses de julho e setembro de 2009, geradas a partir dos dados levantados pela tecnologia GPS.

No mês de setembro, os dados de campo foram levantados no dia 16 com fechamento contábil projetado para o final do mês. Nesta situação, foram considerados os dados de produção (Prod.) e embarque (Emb.) entre as datas de 16/09 e 30/09/2009, ficando o estoque físico de minério (Est.), definido de acordo com a Equação 4.1:

$$\text{Est}_{(30/09)} = \text{Est}_{(16/09)} + \text{Prod}_{(16/09 \text{ a } 30/09)} - \text{Emb}_{(16/09 \text{ a } 30/09)}$$

(4.1)

## 4.2 RESULTADOS - LASER SCANNER TERRESTRE

Na data de 28/07/2009, simultaneamente aos levantamentos GPS executados pela equipe de topografia da Vale, foram realizados levantamentos topográficos, utilizando a tecnologia *Laser Scanner* Terrestre (LST), nas pilhas de minério do embarcadouro da mina de Alegria.

O objetivo desses levantamentos foi de coletar dados das pilhas de minérios para a determinação de seus volumes, cujos resultados são apresentados.

### 4.2.1 Validação dos Pontos *Laser*

De acordo com o decreto federal nº 89.817 de 20 de junho de 1984 toda operação de representação da superfície terrestre ou parte dela, através de imagens,

cartas, plantas e outras formas de expressão afins, deve obedecer, quanto à sua exatidão, ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, indicador estatístico que define a acuracidade dos trabalhos cartográficos.

A classificação “A” para a altimetria exige um PEC inferior à metade da equidistância entre as curvas de nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro Padrão correspondente.

Os pontos levantados pela tecnologia LST foram validados através da comparação das coordenadas altimétricas de pontos de controle, onde foram determinados o erro médio quadrático e o desvio padrão, conforme apresentado pelas Tabelas 4.5, 4.6 e Gráfico 4.1.

**Tabela 4.5 - Validação do LST**

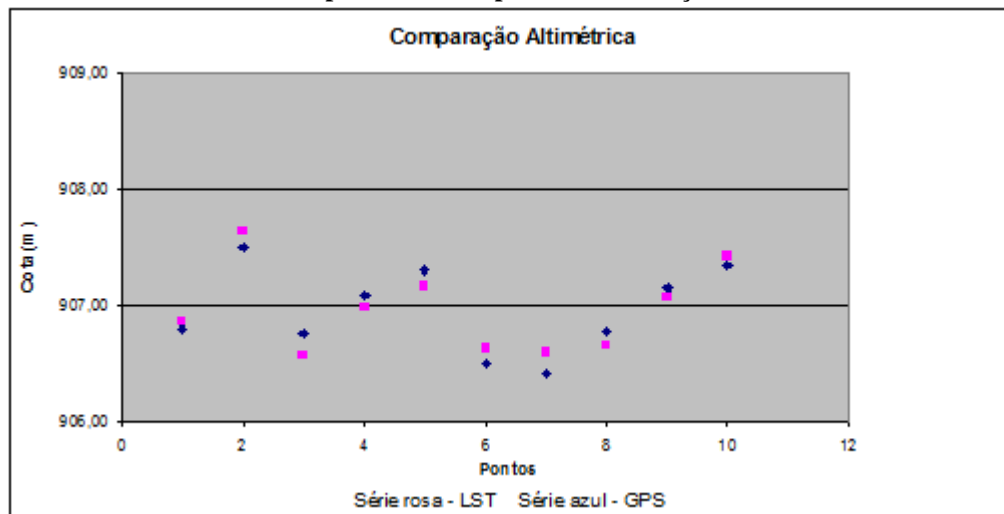
Pontos de Validação					
LEVANTAMENTO GPS				LST	
Ponto	Este	Norte	Altimetria	Altimetria	$\Delta H(m)$
1	5.968,12	8.376,21	906,80	906,87	-0,07
2	6.189,16	8.348,90	907,50	907,64	-0,14
3	6.285,04	8.449,75	906,76	906,57	0,19
4	6.887,82	8.458,67	907,08	906,98	0,10
5	6.524,48	8.448,71	907,30	907,16	0,14
6	5.997,22	8.458,36	906,51	906,64	-0,13
7	6.094,53	8.493,61	906,42	906,59	-0,17
8	6.271,10	8.479,97	906,78	906,66	0,12
9	6.449,12	8.465,37	907,15	907,07	0,08
10	6.508,93	8.460,04	907,35	907,42	-0,07

**Tabela 4.6 - Dados estatísticos -Validação do LST**

Dados estatísticos		
Média $\Delta H$ (m)	Máximo $ \Delta H $ (m)	Desvio médio
0,005	0,190	0,121
Desvio padrão	Desvio Quadrado	Variância
0,134	0,161	0,018
Pontos com $ \Delta H  < 20$ cm		92,73%

$\Delta H$  - Variação altimétrica

Gráfico 4.1 - Comparativo entre pontos de validação LST



Como resultado, verificou-se um erro médio quadrático de 0,161 m e um desvio padrão de 0,134 m, apresentando 92,73% dos pontos da amostragem com variação altimétrica inferior ao PEC de 0,20 m. Esses resultados indicam, de acordo com decreto federal nº 89.817 de 20 de junho de 1984, que os MDT gerados a partir do levantamento LST, com curvas de nível de 0,40 m, atendem às exigências do PEC classe A.

O número de pontos de controle, utilizados na verificação do PEC, foi reduzido em função das características do ambiente de trabalho, que se apresenta como uma área desmatada, onde há grande movimentação de materiais com cargas e descargas de minério 24 horas por dia, provocando constantes e irregulares alterações em sua conformação física. Sendo assim, os pontos de controle foram coletados junto à pêra ferroviária existente no interior do pátio de estocagem, por ser esta área livre de quaisquer alterações físicas decorrentes das atividades ali desenvolvidas.

#### 4.2.2 Volumes das Pilhas de Minério

A Figura 4.7 ilustra como exemplo, o modelo digital da pilha “D” de minério, sobreposto à sua primitiva, que foi determinado por escaneamentos *Laser* e utilizado para a determinação de seu volume.

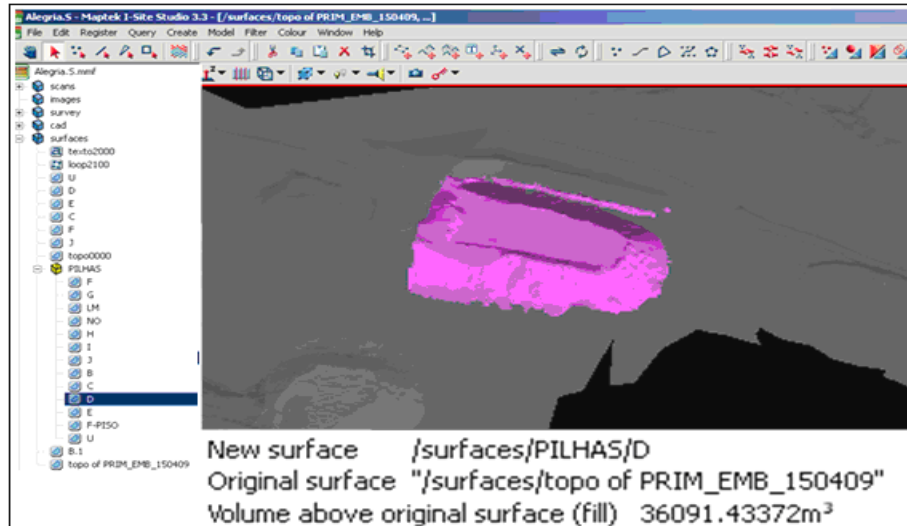


Fig 4.7 - MDT e Volume da Pilha “D” de minério.

Pela Tabela 4.7 são apresentados os valores dos volumes das demais pilhas de minério, obtidos pelo mapeamento *Laser* terrestre.

Tabela 4.7 - Volume das pilhas de minério - Tecnologia LST

Medição Topográfica em m <sup>3</sup>		
Unidade Produtiva - Alegria		
Data	PILHA	LST
28/07/2009	B	5.427,69
28/07/2009	C	10.667,07
28/07/2009	D	36.091,43
28/07/2009	E	13.738,80
28/07/2009	F-PISO	446,40
28/07/2009	F	19.815,18
28/07/2009	G	8.308,23
28/07/2009	H	34.226,94
28/07/2009	I	23.292,40
28/07/2009	L	734,592
28/07/2009	M	25.767,049
28/07/2009	N	30.122,048
28/07/2009	O	24.981,033
28/07/2009	U	25.444,153
TOTAL		259.063,01

### 4.2.3 Fechamento Contábil a partir dos Volumes LST

Com os valores de volume das pilhas de minério obtidos através dos dados levantados pelo *Laser* terrestre, foi promovido o fechamento contábil relativo ao mês de julho de 2009, assim apresentado pela Tabela 4.8. Porém, devido a problemas operacionais (algumas pilhas estavam com acesso interditado em função das operações de carregamento de vagões) não foram levantadas todas as pilhas de minério do embarcadouro pelo escaneamento *Laser*.

Portanto, neste fechamento contábil, foram lançados os valores medidos pela tecnologia GPS em substituição àqueles não coletados pelo levantamento *Laser*, correspondentes às pilhas A, J, R e Mineirinho.

Tabela 4.8 - Fechamento Contábil - Dados LST (28/07/2009)

CÁLCULO DO AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO					
Alegria - Julho / 2009					
Complexo Mariana	Un. Produtiva Alegria	Estoque Calculado Mês Atual (t)	Estoque Físico (Topografia) (t)	Ajuste Topografico (t)	Ajuste Topografico (%)
TOTAL		978.592,11	964.525,14	-14.066,98	-1,46%

O ANEXO 4 apresenta a planilha completa de “Ajustes Topográficos” com os dados levantados pela tecnologia *Laser Scanner* Terrestre.

## 4.3 RESULTADOS - LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO

### 4.3.1 Plano de Vôo

Inicialmente são apresentadas as características do plano de vôo elaborado para recobrimento da área em estudo.

A elaboração do plano de vôo envolveu a entrada dos seguintes parâmetros configuráveis:

Altura de vôo a 3000 pés AGL (914,4 m);

Ângulo de proa (*Pass Heading*) de 77°;

Sobreposição de varredura (*Overlap*) de 35%;

Velocidade de vôo (*Speed*) de 110 nós (203,72 km/h);  
 Tempo de manobra (*Turn time*) de 5 min;  
 Freqüência do *Laser* emitido (*System PRF*) de 70 kHz;  
 Distancia entre cada ponto de uma linha (*Desired Res*) de 0,48 m;  
 Sobreposição das fotos (*Photo Overlap*) de 30%;  
 Freqüência de varredura (*Scan Freq*) igual a 59,2 Hz;  
 Ângulo de varredura (*Scan Angle*) igual a 8,8°.

Em função dos parâmetros configuráveis acima, o *software* ALTM-NAV *Planner* definiu os outros elementos do plano de vôo, como:

Número de linhas de varredura (*Passes*) para cobrir a região igual a 8;  
 Espaçamento entre linhas de varredura (*Pass Spacing*) igual a 183,6 m;  
 Distancia otimizada entre cada ponto de uma linha (*Cross Track Res*) de 0,479 m;  
 Pontos por metro quadrado igual a 4,37;  
 Largura da faixa de varredura (*Swath*) igual a 282,46 m;  
 Sobreposição lateral das fotografias (*Line Overlap*) igual a 50,09 %;  
 Tamanho do pixel da fotografia segundo o eixo X (*Pixel Size X*) igual a 0,102 m;  
 Tamanho do pixel da fotografia segundo o eixo Y (*Pixel Size Y*) igual a 0,102 m;  
 Distância de disparo da câmara (*Trigger Dist*) igual a 0,21 nmi (milhas náuticas);  
 Tempo de disparo da câmara (*Trigger Time*) igual a 6,833 seg.  
 Total de fotografias (*Total Frames*) igual a 41;  
 Comprimento total de varredura (*Total Length*) igual a 15,857 km;  
 Tempo de vôo (*Total Flight Time*) otimizado igual a 00h40min30seg;  
 Tempo total de vôo (decolagem / pouso) igual a 01h25min;  
 Área total coberta (*Swath Area*) igual a 2,911 km<sup>2</sup>;  
 Tempo de emissão de *Laser* (*Total Laser Time*) otimizado igual a 00h04min40seg;  
 Tempo total de emissão de *Laser* igual a 00h08min36seg.

### 4.3.2 Validação dos Pontos *Laser*

Para validar a precisão dos dados altimétricos LSA foram levantados, simultaneamente ao sobrevôo, 45 pontos de controle aplicando a tecnologia GPS RTK, dos quais 17 pontos foram coincidentes com o levantamento LSA e, conseqüentemente, utilizados na conferência e validação. As altitudes GPS dos 17 pontos de controle foram comparadas com as suas respectivas altitudes obtidas pelo levantamento LSA.

Como indicadores de qualidade das informações altimétricas, foram calculados o erro médio quadrático e o desvio padrão entre as observações das duas metodologias.

Os resultados das análises mostraram que o erro médio quadrático foi de 0,078 m e o desvio padrão de 0,070 m, apresentando 97,75% dos pontos da amostragem com variação altimétrica inferior ao PEC de 0,12 m. Por esses resultados, de acordo com decreto federal nº 89.817 de 20 de junho de 1984, os MDT gerados a partir do levantamento LSA, com curvas de nível de 0,25 m, atendem às exigências do PEC classe A.

A Tabela 4.9 apresenta o resultado da conferência altimétrica entre os pontos GPS (RTK) e *Laser*.

**Tabela 4.9 - Validação do LSA**

Pontos de Validação		
Coordenada Altimétrica		
RTK (m)	<i>Laser</i> (m)	$\Delta H$ (m)
934,484	934,480	-0,004
928,830	928,770	-0,060
928,768	928,710	-0,058
928,737	928,730	-0,007
928,702	928,610	-0,092
928,686	928,630	-0,056
928,639	928,640	0,001
928,617	928,600	-0,017
929,975	929,880	-0,095
931,665	931,620	-0,045
934,963	935,090	0,127
934,790	934,810	0,020
933,632	933,510	-0,122
933,389	933,280	-0,109
934,375	934,440	0,065
934,587	934,630	0,043
935,008	935,080	0,072

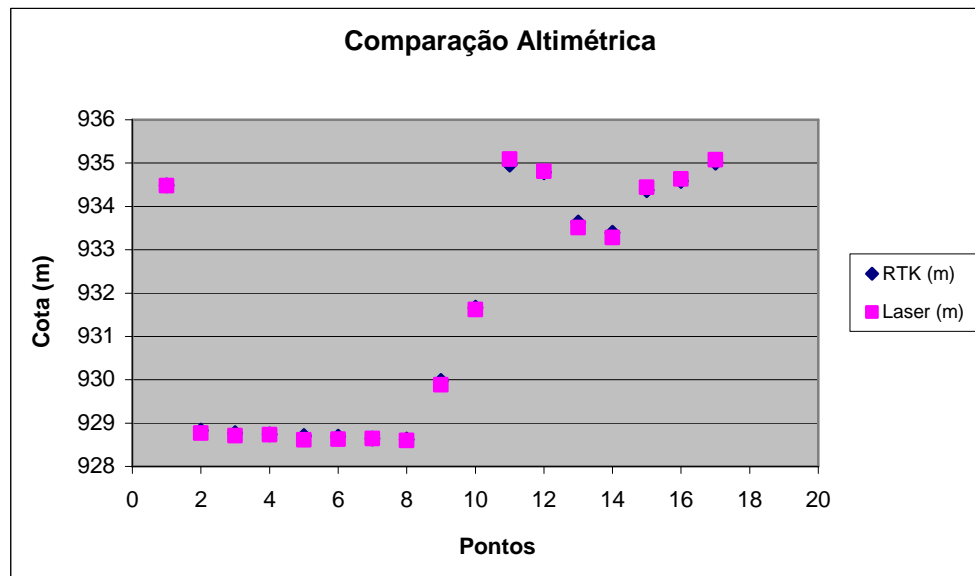
A Tabela 4.10 e Gráfico 4.2 apresentam, respectivamente, os dados estatísticos da validação e os posicionamentos altimétricos dos pontos GPS/RTK e *Laser*.

**Tabela 4.10 - Dados estatísticos da validação do LSA**

Dados estatísticos		
Média $\Delta H$ (m)	Máximo $ \Delta H $ (m)	Desvio médio
-0,020	0,127	0,056
Desvio padrão	Desvio Quadrado	Variancia
0,070	0,078	0,005
<b>Pontos com <math> \Delta H  &lt; 12</math> cm</b>		<b>97,75%</b>

$\Delta H$  - Variação altimétrica

**Gráfico 4.2 - Comparativo entre pontos de validação LSA**



### 4.3.3 Volumes das Pilhas de Minério

A Figura 4.8 apresenta o MDT da pilha “Mineirinho” e, na Tabela 4.11 são apresentados os valores dos volumes da pilha Mineirinho, assim como, das demais pilhas.

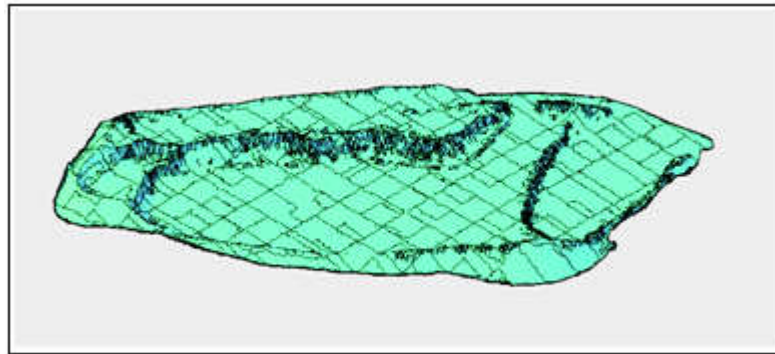


Fig 4.8 - MDT da pilha “Mineirinho”

Tabela 4.11 - Volume das pilhas de minério - Tecnologia LSA

Medição Topográfica em m3			
Unidade Produtiva - Alegria			
Pilha	LSA	Pilha	LSA
B	5.628,50	J	1.067,93
CD	29.768,41	L	648,10
E	25.573,40	M	22.733,08
E-PISO	332,40	N	26.317,30
F	34.297,10	O	21.852,00
G	51.833,00	R	26.156,70
H	34.784,80	U	34.343,30
I	17.736,67	MINEIRINHO	38.258,50
<b>Total</b>	<b>199.954,27</b>	<b>Total</b>	<b>171.376,91</b>
<b>TOTAL</b>		<b>371.331,18</b>	

#### 4.3.4 Fechamento Contábil a partir dos Volumes LSA

A partir dos valores obtidos pelos escaneamentos a *Laser* aerotransportado, foi promovido o fechamento contábil correspondente ao mês de setembro de 2009, cujo resumo é apresentado pela Tabela 4.12.

Assim como procedido com os dados GPS de setembro de 2009, os resultados (estoque físico) obtidos a partir dos levantados pela tecnologia LSA em 16/09/2009, foram projetados para o final do mês de setembro (30/09/2009), considerando todas as produções e embarque ocorridos neste período.

O ANEXO 5 apresenta a planilha completa de “Ajustes Topográficos” com os dados levantados pela tecnologia *Laser Scanner* Aerotransportado.

Tabela 4.12 - Fechamento Contábil - Dados LSA (16/09/2009)

CÁLCULO DO AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO					
Alegria - Setembro / 2009					
Complexo Mariana	Un. Produtiva Alegria	Estoque Calculado Mês Atual (t)	Estoque Físico (Topografia) (t)	Ajuste Topografico (t)	Ajuste Topografico (%)
TOTAL		842.800,34	826.334,78	-16.465,56	-1,99%

#### 4.4 RESULTADOS - PÓS-SINALIZAÇÃO

##### 4.4.1 Validação dos pontos Pós-Sinalização

O levantamento de campo Pós-Sinalização foi validado através da comparação com pontos de referencia, cujas coordenadas foram, previamente, determinadas por GPS.

As Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam, respectivamente, o resultado da conferencia altimétrica entre os pontos GPS e Pós-Sinalização e os dados estatísticos da validação. O Gráfico 4.3 apresenta os posicionamentos altimétricos dos pontos GPS e Pós-Sinalização.

Tabela 4.13 - Validação da Pós-Sinalização

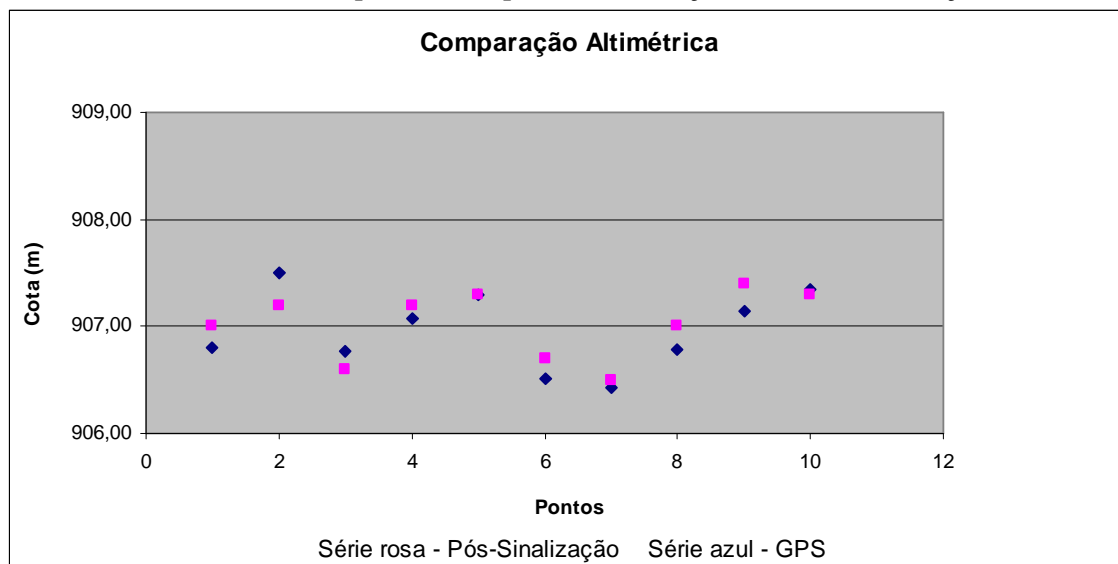
Pontos de Validação					
LEVANTAMENTO GPS			PÓS-SINALIZAÇÃO		
PONTO	ESTE	NORTE	ALTIMETRIA	ALTIMETRIA	$\Delta H$ (m)
1	5.968,12	8.376,21	906,80	907,00	-0,20
2	6.189,16	8.348,90	907,50	907,20	0,30
3	6.285,04	8.449,75	906,76	906,60	0,16
4	6.887,82	8.458,67	907,08	907,20	-0,12
5	6.524,48	8.448,71	907,30	907,30	0,00
6	5.997,22	8.458,36	906,51	906,70	-0,19
7	6.094,53	8.493,61	906,42	906,50	-0,08
8	6.271,10	8.479,97	906,78	907,00	-0,22
9	6.449,12	8.465,37	907,15	907,40	-0,25
10	6.508,93	8.460,04	907,35	907,30	0,05

Tabela 4.14 - Dados estatísticos da validação Pós-Sinalização

Dados estatísticos		
Média $\Delta H$ (m)	Máximo $ \Delta H $ (m)	Desvio médio
-0,055	0,300	0,146
Desvio padrão	Desvio Quadrado	Variância
0,181	0,296	0,033
Pontos com $ \Delta H  < 30$ cm		97,49%

$\Delta H$  - Variação altimétrica

Gráfico 4.3 - Comparativo dos pontos de validação GPS / Pós-Sinalização



Os resultados das análises mostraram que o erro médio quadrático foi de 0,296 m e o desvio padrão de 0,181 m, apresentando 97,49% dos pontos da amostragem com variação altimétrica inferior ao PEC de 0,30 m. Por esses resultados, de acordo com decreto federal nº 89.817 de 20 de junho de 1984, os MDT gerados a partir do levantamento Pós-Sinalização, com curvas de nível de 0,60 m, atendem às exigências do PEC classe A.

#### 4.4.2 Volumes das Pilhas de Minério

A Tabela 4.15 apresenta os resultados dos volumes de minério em pilhas, obtido por aplicação da tecnologia Pós-Sinalização.

Tabela 4.15 - Volumes de minério - Tecnologia Pós-Sinalização

<b>Medição Topográfica em m<sup>3</sup></b>	
<b>Pilha</b>	<b>Pós-Sinalização</b>
B	44.004,02
D	43.852,21
D - Piso	792,17
L M N O	59.416,34
G H I	23.669,56
<b>TOTAL</b>	<b>171.734,30</b>

#### 4.4.3 Fechamento Contábil a partir dos Volumes Pós-Sinalização

O fechamento contábil com os resultados dos levantamentos Pós-Sinalização foi projetado para o final do dia 22/07/2011, considerando todas as entradas e saídas de minério após o momento das medições.

A Tabela 4.16 mostra o resumo deste fechamento.

Tabela 4.16 - Fechamento Contábil - Dados Pós-Sinalização (22/07/2011)

<b>CÁLCULO DO AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO</b>					
<b>Alegria - Julho / 2011</b>					
<b>Complexo Mariana</b>	<b>Un. Produtiva Alegria</b>	<b>Estoque Calculado Mês Atual (t)</b>	<b>Estoque Físico (Topografia) (t)</b>	<b>Ajuste Topografico (t)</b>	<b>Ajuste Topografico (%)</b>
<b>TOTAL</b>		<b>592.910,05</b>	<b>604.510,09</b>	<b>11.600,03</b>	<b>1,92%</b>

O ANEXO 6 apresenta a planilha completa de “Ajustes Topográficos” com os dados levantados pela tecnologia Pós-Sinalização.

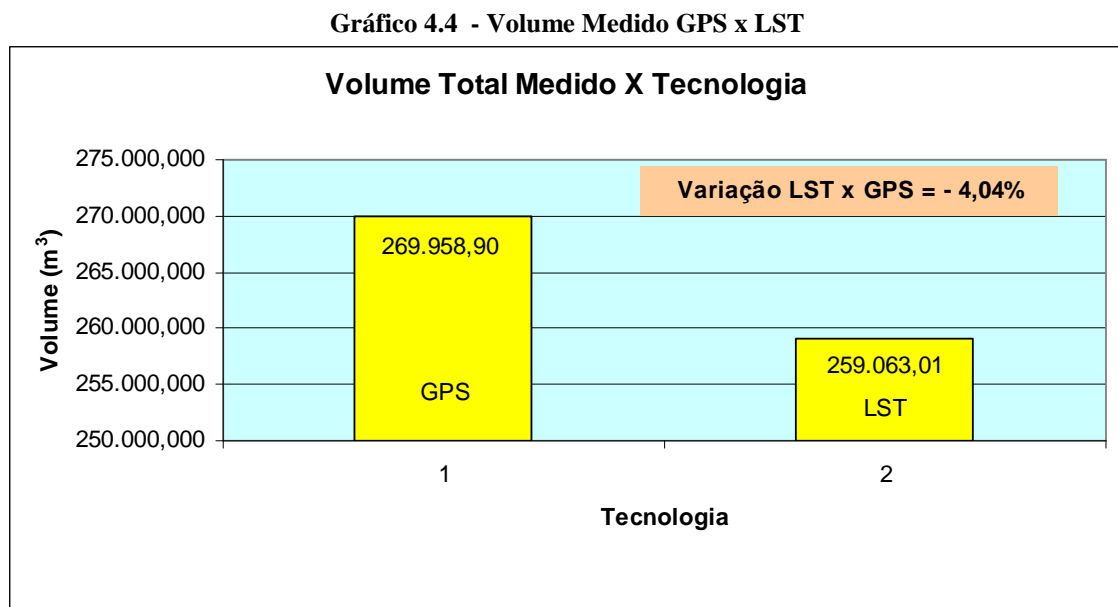
#### 4.5 RESULTADOS EXPRESSOS EM GRÁFICOS

São apresentados através de gráficos comparativos, os resultados de volumes das pilhas de minério e os valores dos fechamentos contábeis relativos a cada tecnologia aplicada.

Participaram da composição dos gráficos apenas os valores de volumes das pilhas de minério que foram medidas pelas duas tecnologias comparadas.

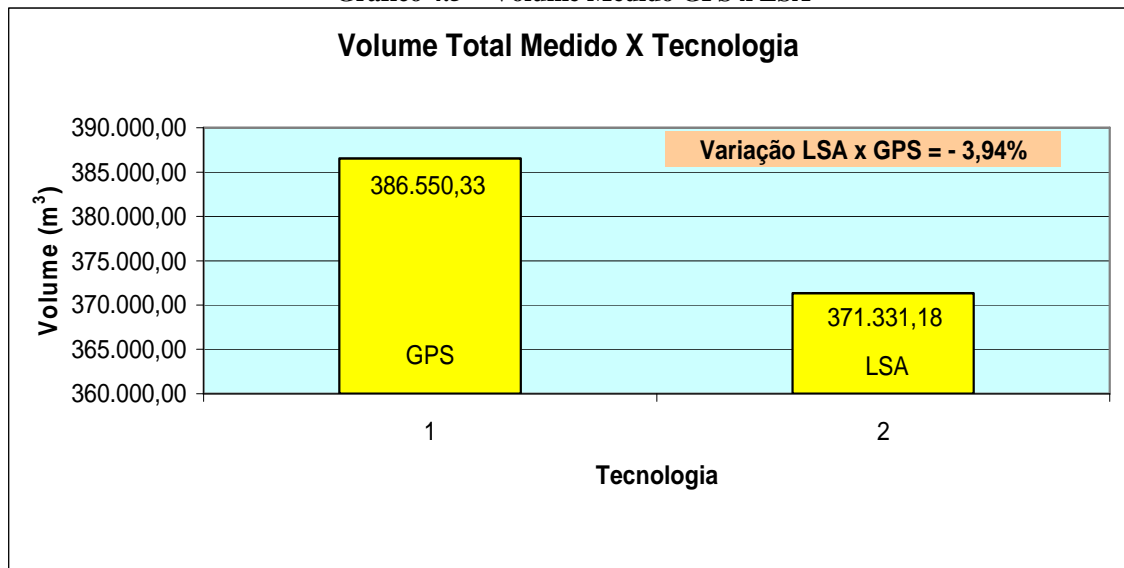
#### 4.5.1 Volume Medido

**4.5.1.1 - GPS x LST (28/07/2009)** - O Gráfico 4.4 mostra o resultado das medições comuns, feitas por GPS e LST em 28/07/2009.



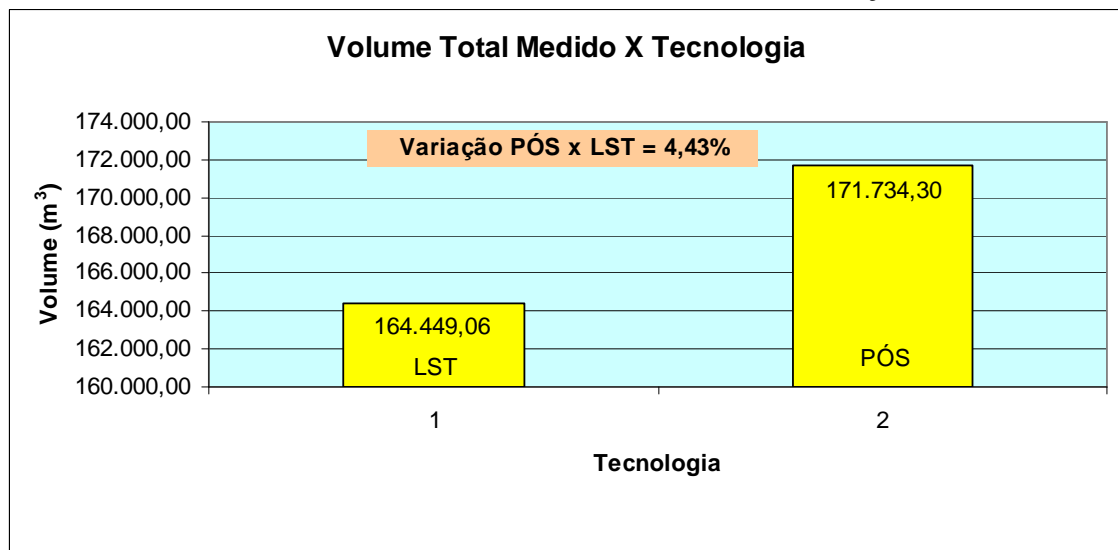
**4.5.1.2 - GPS x LSA (16/09/2009)** - O Gráfico 4.5 mostra o resultado das medições comuns, feitas por GPS e LSA em 16/09/2009.

Gráfico 4.5 - Volume Medido GPS x LSA



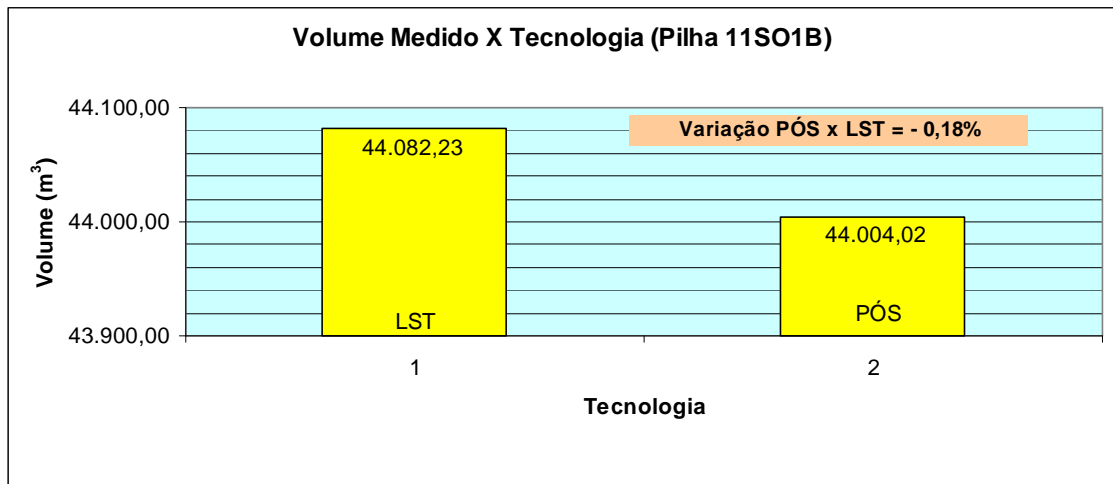
**4.5.1.3 - LST (Vale) x Pós-Sinalização (22/07/2011)** - O Gráfico 4.6 mostra o resultado das medições comuns, feitas por LST (equipe da Vale) e Pós-Sinalização em 22/07/2011.

Gráfico 4.6 - Volume Medido LST (Vale) x Pós-Sinalização



O Gráfico 4.7 apresenta comparativamente, os resultados de volume obtidos por medição da pilha “11S01B”, pelas tecnologias LST (Vale) e Pós-Sinalização, onde não houve movimentação de material entre os dois momentos de coleta de dados.

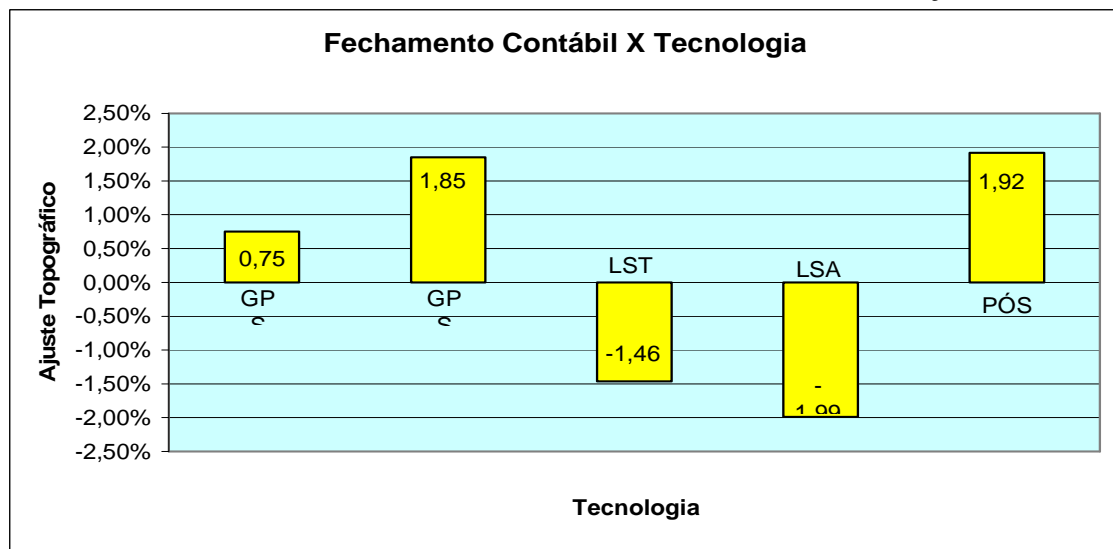
Gráfico 4.7 - Volume Medido LST (Vale) x Pós-Sinalização - Pilha “11S01B”



#### 4.5.2 Fechamento Contábil

Pelo Gráfico 4.8 são mostradas as variações ocorridas nos fechamentos contábeis, em função dos diferentes resultados obtidos por aplicação das tecnologias.

Gráfico 4.8 - Fechamento Contábil - GPS, LST, LSA e Pós-Sinalização



Os índices apresentados pelo Gráfico 4.8 representam a variação percentual entre os resultados obtidos a partir das aplicações das tecnologias e os valores contábeis de produção e estoque.

Os resultados obtidos por aplicação da tecnologia GPS, em 28/07/2009, quando comparados com os valores contabilizados de produção e saídas de minérios, demonstraram serem superiores àqueles a uma taxa de 0,75%, ao passo que, os resultados obtidos pela tecnologia LST se apresentaram a um índice de -1,46%.

Em síntese, em relação aos dados contábeis da época, as medições GPS foram superiores em 1,30% (média), as medições LST foram inferiores em 1,46%, as medições LSA foram inferiores em 1,99% e as medições Pós-Sinalização superiores em 1,92%.

## **4.6 OUTRAS VARIÁVEIS ANALISADAS COMPARATIVAMENTE**

Nesta seção são apresentadas algumas variáveis relacionadas à coleta de dados, que são comuns às tecnologias aplicadas, mas que diferem quantitativamente em função das particularidades dessas tecnologias.

### **4.6.1 Tempo, Material Humano e Produto (Serviços de Campo)**

#### **4.6.1.1 - Aplicação da Tecnologia GPS**

O levantamento de campo GPS realizado na data de 28/07/2009 teve seu início às 08 h e 05 min com término às 12 h e 10 min, resultando em um intervalo de tempo de 04 h e 05 min, desconsiderando o tempo gasto na preparação de equipamentos e traslado.

Durante esse período, e para a realização dos levantamentos, foram utilizados 04 equipamentos GPS por 04 equipes, sendo uma equipe composta por 02 operários e as demais por 03 operários, totalizando 11 operários envolvidos.

Em outra ocasião 16/09/2009, foi realizada nova coleta de dados em campo com as mesmas equipes e equipamentos envolvidos nos levantamentos anteriores.

As Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam o número de operadores, os horários e tempo gasto nos levantamentos, assim como o número de pontos levantados.

Tabela 4.17 - Levantamento por GPS em 28/07/2009

Pilha	Nº de Operadores	Início	Término	Intervalo de Tempo	Nº de Pontos
B; C; D; E; F; (F-Piso); G; H; I; J L; M; N; O; U	11	08h 05 min	12h 10 min	04h 05 min	4.770

Tabela 4.18 - Levantamento por GPS em 16/09/2009

Pilha	Nº de Operadores	Início	Término	Intervalo de Tempo	Nº de Pontos
A; B; C; D; E; F; G; H; I; J; L; M; N; O; P; Q; R; U; Min.	11	08h 10 min	11h 20 min	03h 10 min	6.003

#### 4.6.1.2 - Aplicação da Tecnologia LST

Nesta pesquisa, foram realizados 17 escaneamentos, de modo a cobrir toda a área de estudo, utilizando um sistema estático terrestre *Laser Scanner I-Site*.

Para execução desses levantamentos foram necessários 2 operadores de campo, realizando os serviços em um intervalo de tempo de 03 h e 28 min, desconsiderando o tempo gasto na preparação do equipamento e traslado até a primeira estação, assim como mostra a Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Levantamento por *Laser Scanner I-Site*

Pilha	Nº de Operadores	Início	Término	Intervalo de Tempo	Nº de Pontos
B; C; D; E; F; (F-Piso); G; H; I; L; M; N; U	2	09h 40 min	13h 08 min	03h 28 min	47.221

#### 4.6.1.3 - Aplicação da Tecnologia LSA

Os trabalhos de campo para a coleta de dados, aplicando a tecnologia LSA, compreendem o apoio GPS em solo e a cobertura aérea da região.

Os trabalhos em solo foram desenvolvidos por 1 operador, responsável pela instalação do GPS na base de referencia e pela coleta de pontos RTK utilizados para validação do levantamento aéreo.

Para o sobrevôo foi necessário o envolvimento de duas pessoas, o piloto da aeronave e o operador do sistema *Laser Scanner* aerotransportado.

Os tempos registrados nestas operações estão apresentados na Tabela 4.20.

**Tabela 4.20 - Tempos do Levantamento LSA**

Serviço	Nº de Operador	Início	Término	Intervalo de Tempo	Nº de Pontos
<b>Aéreo *</b>	2	14h 10min	15h 35min	01h 25min	26.063
<b>Terrestre</b>	1	14h 30min	15h 25min	00h 55min	

\* O tempo relativo aos serviços aéreos corresponde ao intervalo decolagem / pouso da aeronave.

#### 4.6.1.4 - Aplicação da Tecnologia Pós-Sinalização

Os trabalhos de coleta de dados em campo envolveram 03 profissionais, todos operando em solo. São mostrados pela Tabela 4.21 os tempos relativos à coleta de dados, envolvendo os serviços em solo (pontos de apoio) e as tomadas de aerofotos.

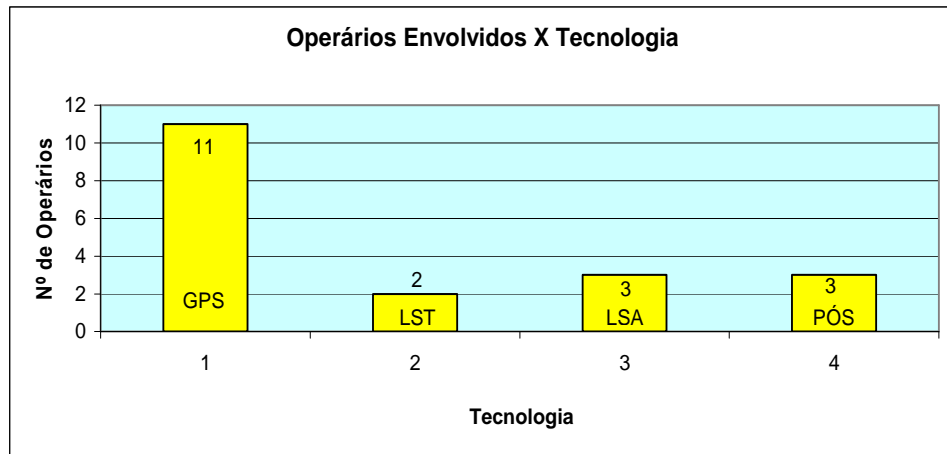
**Tabela 4.21 - Tempos do Levantamento Pós-Sinalização**

Serviço	Nº de Operador	Início	Término	Intervalo de Tempo	Nº de Pontos
<b>Referenciamento GPS</b>	1	13h 35min	14h 35min	01h 00min	20
<b>Tomadas Aéreas</b>	2	15h 08min	15h 16min	00h 08min	27.043

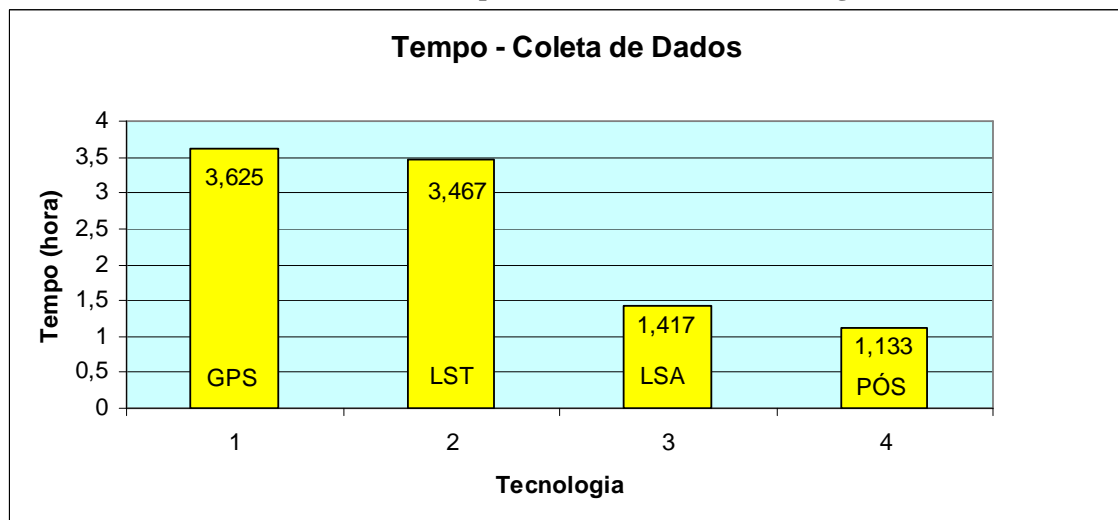
#### 4.6.2 Tempo, Material Humano e Produto versus Tecnologias (Gráficos)

As variáveis Tempo, Material Humano e Produto, também estão representados por gráficos. O Gráfico 4.9 e 4.10 relacionam, respectivamente, o número de profissionais envolvidos na coleta de dados e o tempo (horas) de coleta, às tecnologias.

**Gráfico 4.9 - Número de profissionais - Coleta de dados e Tecnologia**

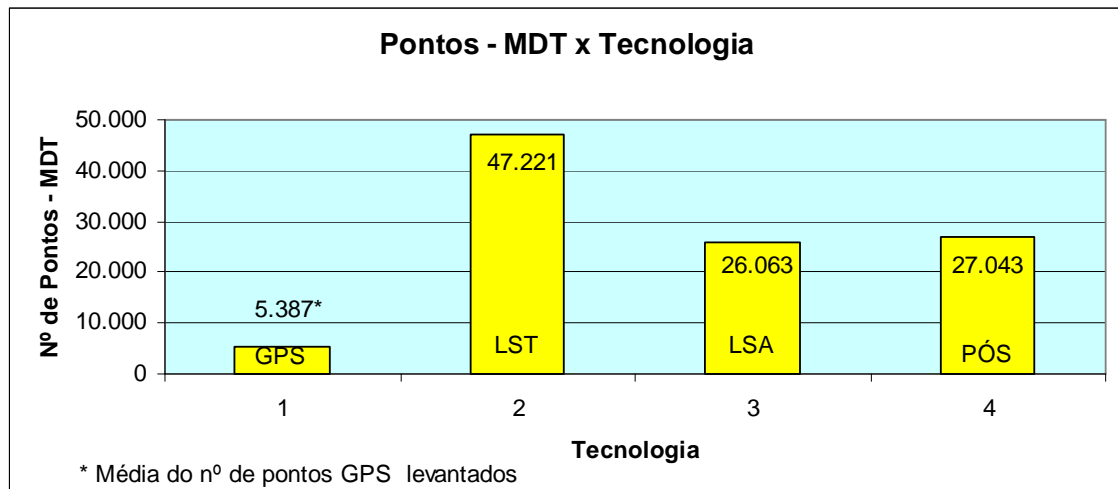


**Gráfico 4.10 - Tempo de coleta de dados e Tecnologia**



O Gráfico 4.11 registra o número de pontos levantados por cada tecnologia, que foram utilizados na geração dos MDT das pilhas de minério.

Gráfico 4.11 - Número de pontos e Tecnologia



#### 4.6.3 Tempo e Material Humano (Tratamento e Resultados)

O tempo utilizado para o tratamento dos dados de campo e obtenção dos resultados (volumes das pilhas de minério) foi de apenas um dia para cada tecnologia aplicada, envolvendo apenas um profissional de cada área tecnológica, ou seja, GPS, LST, LSA e Pós-Sinalização.

#### 4.6.4 Produtividade.

A produtividade (Prod.) das tecnologias GPS, LST, LSA e Pós-Sinalização foi definida pela relação entre o número de pontos levantados (Nº pontos MDT) e o produto, do número de operadores envolvidos (Nº operador) pelo tempo de coleta (Tempo).

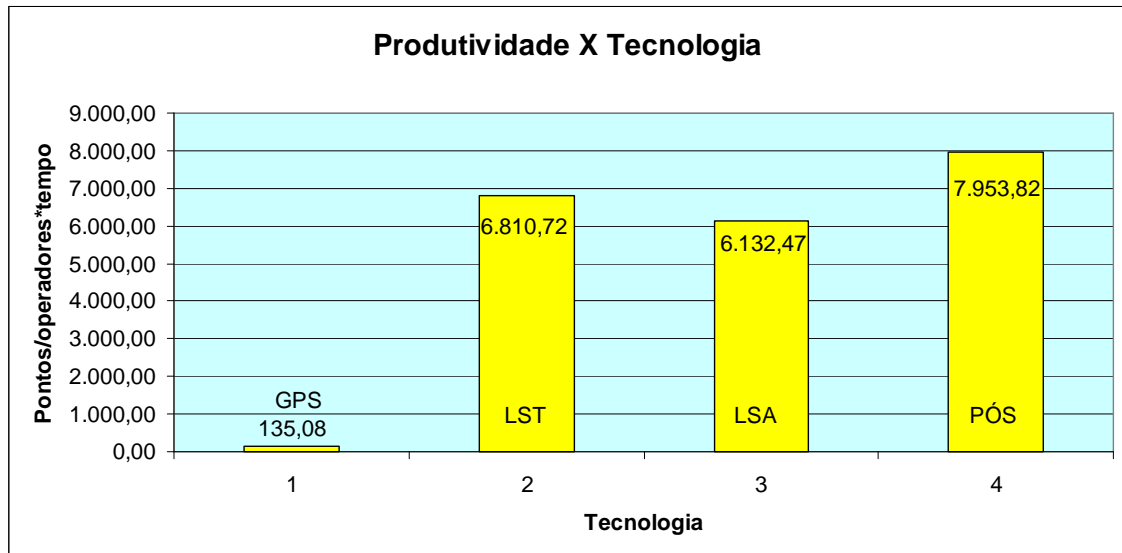
Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4.22 e também no Gráfico 4.12.

Tabela 4.22 - Produtividade X Tecnologia

Produtividade X Tecnologia				
Tecnologia	<i>Output</i>	<i>Input</i>		Produtividade Pontos/operadores*tempo
	Nº de Pontos	Operadores	Tempo (h)	
GPS	5.387 *	11	3,625 *	135,08
LST	47.221	2	3,467	6.810,72
LSA	26.063	3	1,417	6.132,47
Pós-Sinalização	27.043	3	1,133	7.953,82

- média relativas aos dois levantamentos, em 28/07 e 16/09/2009.

Gráfico 4.12 - Produtividade e Tecnologia



Pelo Gráfico 4.12 verifica-se que a tecnologia Pós-Sinalização apresentou neste trabalho, a maior produtividade, equivalente à coleta de 7953 pontos por homem hora. Seguem-se as tecnologias LST com 6810 pontos e LSA com 6132 pontos por homem hora. Com a menor produtividade se apresentou a tecnologia GPS, com 135 pontos por homem hora.

#### 4.6.5 Custo Operacional

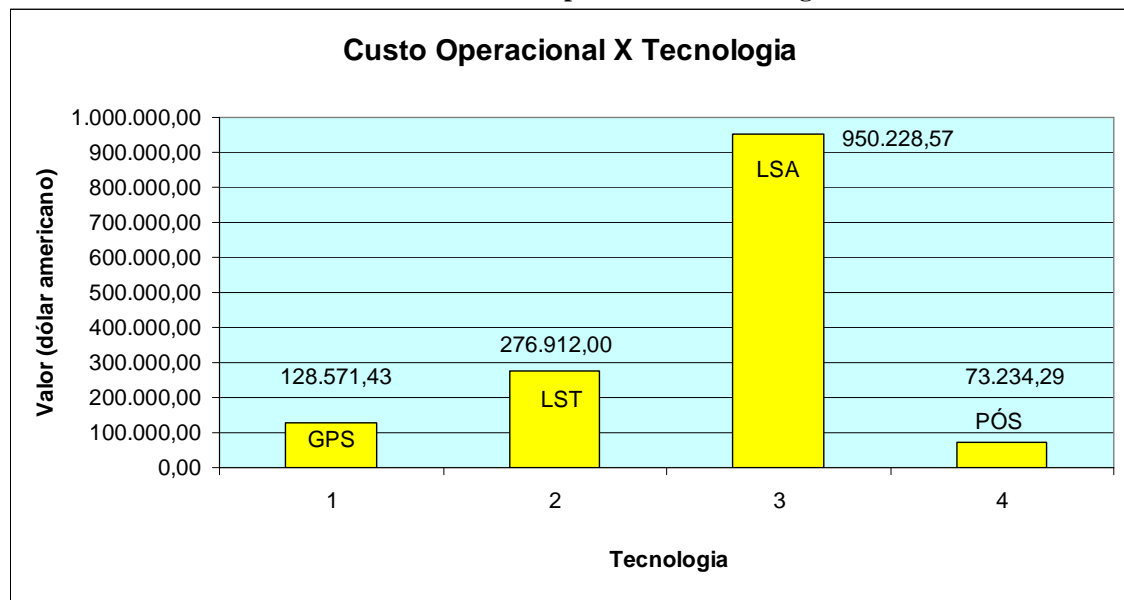
Dentre as variáveis utilizadas nas comparações deste trabalho, está incluído o Custo Operacional (CO).

Através de pesquisa de mercado junto a empresas especializadas, apuramos o custo médio relativo à prestação dos serviços, por um período de um ano, como apresentado pela Tabela 4.23 e Gráfico 4.13 (valores expressos em dólar americano).

Tabela 4.23 - Custo Operacional X Tecnologia

Tecnologia X Custo Operacional	
Tecnologia	CO (US\$)
GPS	128.571,43
LST	276.912,00
LSA	950.228,57
Pós-Sinalização	73.234,29

Gráfico 4.13 - Custo Operacional e Tecnologia



Os valores dos custos operacionais apresentados pelo Gráfico 4.13 se referem à execução dos serviços de cálculos de volumes das pilhas de minério por 24 vezes, ou seja, duas vezes ao mês por um ano.

As tecnologias de Pós-Sinalização e GPS apresentaram os menores valores para a prestação dos serviços seguida pela tecnologia LST e, com o maior custo a tecnologia LSA.

#### 4.6.6 Segurança Ocupacional

O Grau de Segurança Ocupacional (GSO) de um sistema representa a qualidade desse sistema do ponto de vista da Segurança Operacional, sendo expresso em termos de indicadores de segurança.

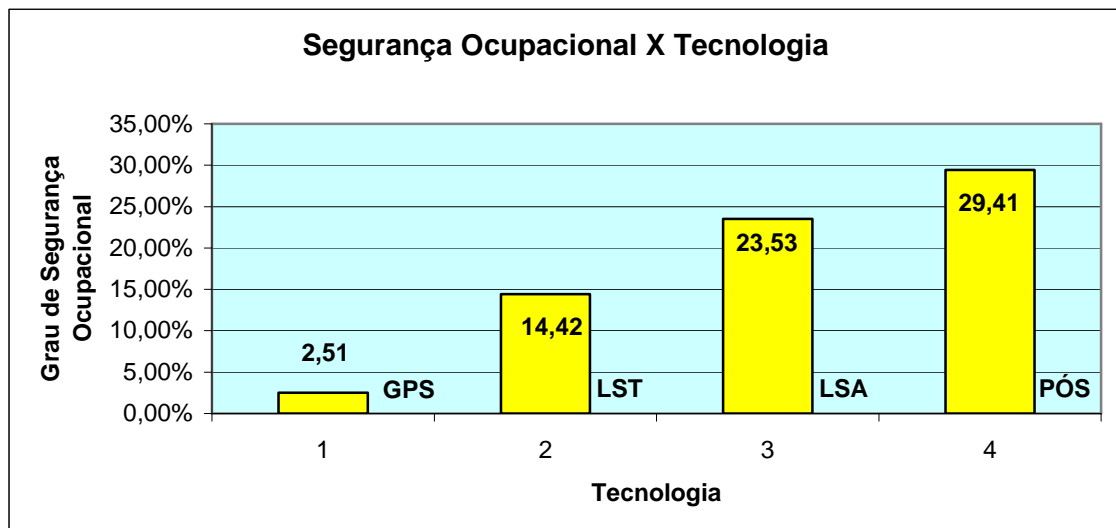
Os valores relativos ao GSO obtidos estão apresentados na Tabela 4.24 e pelo Gráfico 4.14.

Tabela 4.24 - Grau de Segurança Ocupacional X Tecnologia

Tecnologia	Nº de Operadores	Intervalo de Tempo (h)	GSO 1/(tempo x nº operadores)
GPS	11	3,625 *	2,51%
LST	2	3,467	14,42%
LSA	3	1,417	23,53%
Pós-Sinalização	3	1,133	29,41%

\* média relativas aos dois levantamentos, em 28/07 e 16/09/2009.

Gráfico 4.14 - Segurança Ocupacional e Tecnologia



A tecnologia de Pós-Sinalização se apresentou com o maior índice de segurança, uma vez que utiliza um número reduzido de profissionais e a coleta de dados é realizada em menos tempo. Seguem-se as tecnologias LSA e LST e, com o menor índice de segurança, a tecnologia GPS.

#### 4.7 OUTROS RESULTADOS VOLUMÉTRICOS OBTIDOS COM DIFERENTES FERRAMENTAS

Explorando as opções oferecidas pelo *software TopoGRAPH-98SE*, quanto à utilização de diferentes tipos de interpoladores, foram realizadas outras determinações de volumes, com dados levantados pela tecnologia GPS, por malha regular gerada a partir das técnicas de interpolação linear e bivariada.

Também, foram aplicados os métodos de determinação de volumes por seções transversais (0,20 m), utilizando os métodos da “semi-soma” e “prisma”.

Os resultados são apresentados pela Tabela 4.25.

**Tabela 4.25 - Volume - Tecnologia GPS - Software TopoGRAPH-98SE**

PILHA	Malha Quadrada (0,20 m)		Seções Transversais	
	Interpolador Linear	Interpolador Bivariado	Semi-Soma	Prisma
<b>MINEIRINHO</b>	40.611,869	40.653,107	40.678,301	40.677,926
<b>A</b>	585,802	623,930	687,985	686,332
<b>B</b>	5.362,961	5.711,814	5.366,916	5.366,761
<b>C</b>	35.517,789	36.492,079	35.551,009	35.550,685
<b>D</b>	1.561,725	1.626,713	1.572,423	1.572,340
<b>E</b>	25.924,563	26.186,650	25.945,334	25.944,638
<b>E PISO</b>	180,341	184,525	180,800	180,751
<b>F</b>	35.925,712	35.922,768	36.043,504	36.043,153
<b>G</b>	50.544,508	51.507,609	50.653,767	50.653,358
<b>H</b>	34.353,141	34.312,859	34.324,330	34.324,000
<b>I</b>	17.657,859	18.337,129	17.685,928	17.685,569
<b>J</b>	2.110,664	2.282,613	2.207,409	2.207,181
<b>L/M</b>	25.042,997	24.956,389	25.059,123	25.058,861
<b>N</b>	27.674,403	27.791,581	28.413,968	28.412,179
<b>O</b>	23.086,504	23.094,635	23.111,486	23.111,121
<b>R</b>	23.973,677	24.286,627	24.221,066	24.219,796
<b>U</b>	36.550,120	36.294,454	36.763,276	36.762,798
<b>TOTAL</b>	<b>386.664,635</b>	<b>390.265,482</b>	<b>388.466,625</b>	<b>388.457,449</b>

Os resultados apresentados pela Tabela 4.25 mostram que os valores obtidos por seções transversais (semi-soma e prisma) não apresentaram variações significativas entre si. Esses resultados apresentam uma maior aproximação aos resultados advindos da aplicação da rede regular por interpolação linear que por interpolação bivariada.

Outro experimento de determinação de volumes de minério foi realizado, a partir dos dados levantados pela tecnologia LSA, aplicando o software *TerraModeler*, que acompanha o pacote de aplicativos do sistema *Laser Aerotransportado - Optech*.

A Tabela 4.26 apresenta, comparativamente, os resultados obtidos através dos softwares *TerraModeler* e *AutoCAD Civil 3D 2010*.

Tabela 4.26 - Volumes - LSA - Softwares *TerraModeler* e *AutoCAD Civil 3D 2*

Medição Topográfica em m <sup>3</sup>					
Unidade Produtiva - Alegria					
Data	PILHA	AutoCAD Civil	TerraModeler	Variação	%
16/09/2009	B	5.628,50	5.741,28	112,78	2,00%
16/09/2009	CD	29.768,41	30.127,50	359,09	1,21%
16/09/2009	E	25.905,80	26.251,23	345,43	1,33%
16/09/2009	F	34.297,10	34.434,02	136,92	0,40%
16/09/2009	G	51.833,00	51.937,53	104,53	0,20%
16/09/2009	H	34.784,80	34.862,89	78,09	0,22%
16/09/2009	IJ	18.804,60	19.128,90	324,30	1,72%
16/09/2009	LM	23.381,18	23.677,86	296,68	1,27%
16/09/2009	N	26.317,30	26.476,64	159,34	0,61%
16/09/2009	O	21.852,00	22.052,39	200,39	0,92%
16/09/2009	R	26.156,70	26.310,57	153,87	0,59%
16/09/2009	U	34.343,30	34.391,29	47,99	0,14%
16/09/2009	Mineirinho	38.258,50	38.383,77	125,27	0,33%
<b>TOTAL</b>		<b>371.331,18</b>	<b>373.775,86</b>	<b>2.444,68</b>	<b>0,66%</b>

Os resultados apresentados pela Tabela 4.26 mostram uma pequena diferença entre os valores volumétricos obtidos pelos softwares *AutoCAD Civil 3D 2010* e *TerraModeler*.

Considerando as diferenças pilha a pilha, obtivemos como máxima variação o índice de 2,0% e como mínima variação o índice de 0,14%. Em relação ao volume total obtido a diferença representa a 0,66%.

Em ambas as aplicações os MDT foram definidos a partir de redes irregulares de triângulos, sendo os volumes determinados pelo método de comparação de superfícies, entre o modelo atual e seu respectivo primitivo.

## **CAPÍTULO 5 ANÁLISES E AVALIAÇÕES DOS RESULTADOS**

---

Neste capítulo são apresentadas as análises e avaliações dos resultados obtidos diante da aplicação das tecnologias GPS, *Laser Scanner* e Pós-Sinalização, considerando algumas variáveis que influenciam nas operações de coleta de dados em campo.

De um modo geral, esse tipo de avaliação é realizado para estimar como melhorar algum aspecto importante do desempenho de um processo, para identificação de tendências, para comparação entre alternativas ou para examinar possibilidades de mudanças.

Neste trabalho as avaliações foram feitas em relação a duas situações. A primeira, considerando os resultados volumétricos obtidos por cada tecnologia e outras variáveis; e uma segunda avaliação, através da elaboração de um *ranking*, baseado no Processo Analítico Hierárquico (AHP), definindo assim, dentro do problema proposto, aquela tecnologia melhor indicada para a realização dos trabalhos de campo.

## **5.1 AVALIAÇÕES VOLUMÉTRICAS E A OUTRAS VARIÁVEIS**

### **5.1.1 Avaliações Volumétricas**

As aplicações das tecnologias envolvidas neste trabalho foram realizadas em épocas diferentes, razão pela qual seus resultados foram comparados em pares, ou seja, GPS x LST, GPS x LSA e LST x Pós-Sinalização.

Mesmo os levantamentos acontecendo no mesmo dia, em função de suas características, não houve como realizar as medições de cada pilha de minério ao mesmo tempo, impossibilitando assim as comparações entre os resultados pilha a pilha.

Como, durante todas as coletas de dados, ocorreram constantes movimentações de materiais (entradas e saídas), as conformações físicas das pilhas foram alteradas a cada momento. Este fato é apontado como um dos motivos das diferenças apuradas nas medições.

As irregulares formas físicas das pilhas de minério, apresentando vários pontos de difícil e inseguro acesso, também são apontadas como importantes causas que influenciam nas variações dos resultados. Muitos desses pontos não são levantados quando se aplica a tecnologia GPS e suas ausências nos levantamentos alteram os MDT e, conseqüentemente, os seus volumes.

A densidade de pontos que constitui a malha de geração dos MDT é outra variável que exerce grande influencia na determinação dos volumes de minério. Quanto maior for o número de pontos desta malha, mais rico em detalhes e mais próximo da realidade estará o MDT gerado.

Os índices representativos das variações ocorridas entre os resultados volumétricos obtidos pelas diferentes tecnologias estão expressos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Volumes obtidos e suas variações

<b>Quadro Resumo - Volumes de Minério</b>				
<b>Data</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Volumes Medidos (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Variação</b>	
			<b>m<sup>3</sup></b>	<b>%</b>
<b>28/07/2009</b>	GPS	269.958,90	-10.895,89	-4,04%
	LST	259.063,01		
<b>16/09/2009</b>	GPS	386.550,33	-15.219,15	-3,94%
	LSA	371.331,18		
<b>22/07/2011</b>	LST*	164.449,06	7.285,24	4,43%
	PÓS	171.734,30		

\* Levantamento LST realizado pela equipe de topografia da Vale

Pela Tabela 5.1, verifica-se que os volumes totais medidos variaram a taxas próximas a 4%. Porém, essa taxa tende a cair quando a forma física da pilha a ser medida se mantiver estável e com forma geométrica mais regular.

Isto se comprova, pelos resultados obtidos diante de uma comparação isolada, que foi realizada, envolvendo as tecnologias LST e Pós-Sinalização.

Foram desenvolvidos levantamentos de uma pilha de minério, por essas duas tecnologias, onde não houve movimentação de materiais entre os dois momentos de medições. Verificou-se, nesta situação, que houve uma variação mínima entre os resultados (0,18%, o que corresponde a 78,21 m<sup>3</sup> num universo de 44.082,23 m<sup>3</sup>). Isto mostra que a movimentação de materiais e a conseqüente alteração física (geométrica) da pilha são influentes nos resultados.

A Tabela 5.2 apresenta essa comparação.

Tabela 5.2 - Volumes Pilha Estável

<b>Volumes de Minério - Pilha 11S01B</b>				
<b>Data</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Volumes Medidos (m3)</b>	<b>Variação</b>	
			<b>m3</b>	<b>%</b>
<b>22/07/2011</b>	LST*	44.082,23	78,21	0,18%
	PÓS	44.004,02		

\* Levantamento LST realizado pela equipe de topografia da Vale

### 5.1.2 Avaliações a outras Variáveis

Outros valores, além dos correspondentes aos volumes de minério, merecem ser destacados e analisados, pois são variáveis em função da tecnologia aplicada e interferem no desenvolvimento e resultados dos trabalhos de coleta de dados em campo.

A Tabela 5.3 apresenta um quadro resumo, onde se tem as variáveis com seus respectivos valores, relacionados a cada uma das tecnologias.

**Tabela 5.3 - Variáveis Analisadas – Tecnologia**

Ordem	Variável	Tecnologia			
		GPS	LST	LSA	PÓS
1	Nº de pessoal em campo (op)	11	2	3	3
2	Tempo coleta de dados (h)	3,625	3,467	1,417	1,133
3	Nº pontos - MDT (pt)	5.387	47.221	26.063	27.043
4	Produtividade [pt(op*h)]	135,08	6.810,72	6.132,47	7.953,82
5	Custo de Produção (US\$)	128.571,43	276.912,00	950.228,57	73.234,29
6	Segurança Ocupacional (%)	2,51%	14,42%	23,53%	29,41%
7	Fechamento Contábil (%)	1,30%	-1,46%	-1,99%	1,92%

Unidades:

**(op)** : operários;      **(h)** : horas;      **(pt)** : pontos;      **(US\$)** : dólar americano;  
**[pt/(op \* h)]** : pontos / (operários x hora);      **(%)** : porcentagem

Pela Tabela 5.3, podem-se fazer as seguintes considerações:

O número de pessoas envolvidas na coleta de dados pelas tecnologias de sensoriamento remoto é bem mais reduzido que na tecnologia GPS;

O tempo de coleta de dados, quando o equipamento utilizado para esse fim se desloca por via aérea, é inferior à metade do tempo gasto quando o coletor de dados está sobre a superfície terrestre;

As técnicas que utilizam as ferramentas do sensoriamento remoto registram um volume de dados muito superior àquele obtido pela técnica GPS;

Como a produtividade é definida em função da quantidade de trabalho realizado (produto) e os recursos consumidos para realizar este trabalho, ela se mostra com maior eficiência nas tecnologias de sensoriamento remoto;

Como consequência da evolução tecnológica, dos equipamentos envolvidos e de outras vantagens, como por exemplo, a cobertura e abrangência a grandes áreas, sensores ativos, etc., que as tecnologias que utilizam o *laser* como ferramenta de sensoriamento remoto oferecem, o custo de suas aplicações é mais elevado em relação aos custos das tecnologias GPS e Pós-Sinalização;

A segurança ocupacional se destaca entre as variáveis analisadas, sendo considerada a de maior importância entre todas. Ela está diretamente relacionada ao número de pessoas envolvidas nos trabalhos de campo e ao tempo de exposição aos riscos inerentes às atividades e ao ambiente. As técnicas de sensoriamento remoto que utilizam sensores instalados em plataformas que se deslocam por via aérea, se apresentaram com os melhores índices de segurança ocupacional, tendo como fator de grande influência o reduzido tempo de coleta de dados;

Pelos valores apresentados nos fechamentos contábeis realizados com os diferentes dados levantados pelas tecnologias, verifica-se que todos eles atendem às exigências da companhia Vale, ou seja, estão dentro do limite de variação de (+-2%) em relação aos dados contábeis.

### 5.1.3 Avaliações a outras Estratégias

#### 5.1.3.1 - Interpolações Linear x Bi-variada

A Tabela 5.4 apresenta o resumo comparativo dos volumes obtidos através do *software TopoGRAPH-98SE*, por malha quadrada (0,20 m), utilizando duas opções de interpolação, a linear e a interpolação bi-variada.

**Tabela 5.4 - Interpoladores Linear e Bi-Variado - TopoGRAPH-98SE**

Volumes de Minério (m <sup>3</sup> )					
Data	Tecnologia	Malha Quadrada (0,20 m)		Variação	%
		Interpolador Linear	Interpolador Bi variado		
16/09/2009	GPS	386.664,64	390.265,48	3.600,84	0,93%

Os valores apresentados pela Tabela 5.4 representam o total das medições, envolvendo todas as pilhas de minério do pátio do embarcadouro.

Os resultados obtidos a partir dos dois tipos de interpoladores apresentam divergência, com variações compreendidas entre (-8,15% e 0,7%) e uma variação final de (0,93%). Esta variação é significativa, pois representa uma alteração de 0,7% no fechamento contábil, modificando o índice de fechamento de 1,85% (interpolador linear) para 2,25% (interpolador bi-variado). Este novo índice extrapola os limites de variação toleráveis estipulados pela Vale (mina de Alegria).

### 5.1.3.2 - Seções Transversais: Método da Semi-soma x Prisma

Uma nova comparação foi feita, utilizando seções transversais e as opções em se trabalhar com os métodos de cálculo de volume por semi-soma e por prisma. A Tabela 5.5 apresenta os resultados.

**Tabela 5.5 - Seções transversais - TopoGRAPH-98SE**

Volumes de Minério (m <sup>3</sup> )					
Data	Tecnologia	Seções Transversais (0,20 m)		Variação	%
		Semi-soma	Prisma		
16/09/2009	GPS	388.466,63	388.457,45	9,18	0,002%

Os resultados, de acordo com Tabela 5.5, não apresentaram variações significativas quando se altera o método de cálculo de volumes, sendo esta igual a 0,002% do valor total calculado, ou seja, 9,18 m<sup>3</sup> em 388.466,63 m<sup>3</sup>.

### 5.1.3.3 - Volumes: Malha Regular x Seções Transversais

A Tabela 5.6 apresenta uma comparação final, aplicando o *software TopoGRAPH-98SE*, considerando as opções de se calcular volumes por malha quadrada (interpolador linear) e por seções transversais (semi-soma).

**Tabela 5.6 - Malha regular X Seções transversais - TopoGRAPH-98SE**

Volumes de Minério (m <sup>3</sup> )					
Data	Tecnologia	Malha Quadrada	Seções Transversais	Variação	%
		Interpolador Linear	Semi-soma		
16/09/2009	GPS	386.664,64	388.466,63	1.802,00	0,47%

Pela Tabela 5.6, verificou-se que ao se aplicar o método de cálculo de volumes por seções transversais (0,20 m), a variação dos resultados em relação ao método de malha regular foi de 0,47%.

O novo valor obtido (por seções transversais), inserido na planilha de fechamento contábil, provoca uma nova variação correspondente a 0,26%, alterando o fechamento contábil de 1,85% (malha regular) para 2,11% (seções transversais).

#### 5.1.3.4 - Volumes: *AutoCAD Civil 3D* x *TerraModeler*

Foi realizada outra experiência utilizando *softwares* diferentes para o cálculo de volumes a partir dos dados levantados por LSA. Foram aplicados os *softwares TerraModeler* e *AutoCAD Civil 3D 2010*. Os resultados foram comparados e estão resumidos na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7 - Aplicativos *AutoCAD Civil* e *TerraModeler***

Volumes de Minério (m <sup>3</sup> )					
Data	Tecnologia	<i>AutoCAD Civil 3D</i>	<i>TerraModeller</i>	Variação	%
16/09/2009	LSA	371.331,18	373.775,86	2.444,68	0,66%

A Tabela 5.7 apresenta uma variação volumétrica de 0,66% dos resultados obtidos pelo *TerraModeler* em relação ao *AutoCAD Civil 3D 2010*. Essa variação corresponde a uma alteração no fechamento contábil de 0,37%.

Foi registrado com os resultados do *AutoCAD* um índice de fechamento de (-1,99%) e com os resultados do *TerraModeler* um índice de (-1,62%), ambos dentro da faixa tolerável de fechamento contábil adotada pela Vale (mina de Alegria).

## 5.2 AVALIAÇÃO PELO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO

A partir do dimensionamento das variáveis (chamados no AHP de “critérios”), foram promovidas as avaliações de cada tecnologia, baseadas no Processo de Análise Hierárquica (AHP).

Os pesos aplicados a cada critério e cada alternativa (as alternativas são conhecidas pelo AHP como “variável”), constituindo as matrizes de comparações, foram definidos em conjunto com uma equipe de engenheiros da Vale, capacitados a avaliar as influências que cada variável exerce no processo de coleta de dados em campo para a determinação do volume de pilhas de minério, problema proposto neste trabalho.

A aplicação do modelo AHP se deu a partir da:

- Criação de uma estrutura de decisão hierárquica;
- Comparações binárias entre as variáveis (com definição do impacto de cada critério sobre cada variável);
- Comparações binárias entre os critérios;
- Definição das prioridades globais das variáveis em relação aos critérios;
- Avaliação das prioridades através da determinação de suas coerências;
- Definição do resultado.

A Figura 5.1 apresenta a estrutura hierárquica de desenvolvimento do AHP.

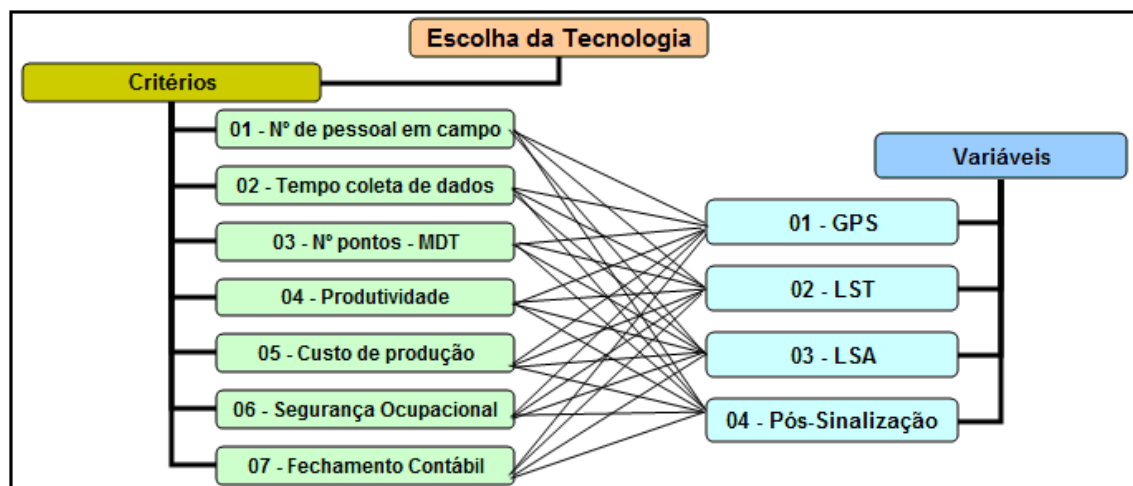


Fig 5.1 - Estrutura Hierárquica para AHP

As Tabelas 5.8 a 5.14 apresentam as matrizes de comparação entre as variáveis, onde estão expostos os impactos que cada critério exerce sobre cada variável.

Tabela 5.8 - Matriz de Preferência - Critério 1 - Nº de pessoal em campo

Critério 1				
Variável	GPS	LST	LSA	PÓS
GPS	1	1/8	1/6	1/6
LST	8	1	3	3
LSA	6	1/3	1	1
PÓS	6	1/3	1	1

Tabela 5.9 - Matriz de Preferência - Critério 2 - Tempo de Coleta de Dados

Critério 2				
Variável	GPS	LST	LSA	PÓS
GPS	1	1/2	1/7	1/8
LST	2	1	1/6	1/7
LSA	7	6	1	1/3
PÓS	8	7	3	1

Tabela 5.10 - Matriz de Preferência - Critério 3 - Nº de pontos – MDT

Critério 3				
Variável	GPS	LST	LSA	PÓS
GPS	1	1/9	1/7	1/7
LST	9	1	4	4
LSA	7	1/4	1	1/2
PÓS	7	1/4	2	1

Tabela 5.11 - Matriz de Preferência - Critério 4 – Produtividade

Critério 4				
Variável	GPS	LST	LSA	PÓS
GPS	1	1/5	1/4	1/7
LST	5	1	3	1/4
LSA	4	1/3	1	1/4
PÓS	7	4	4	1

Tabela 5.12 - Matriz de Preferência - Critério 5 - Custo de Produção

Critério 5				
Variável	GPS	LST	LSA	PÓS
GPS	1	5	9	1/3
LST	1/5	1	4	1/6
LSA	1/9	1/4	1	1/9
PÓS	3	6	9	1

Tabela 5.13 - Matriz de Preferência - Critério 6 - Segurança Ocupacional

Critério 6				
Variável	GPS	LST	LSA	POS
GPS	1	1/4	1/4	1/5
LST	4	1	1/3	1/3
LSA	4	3	1	1/2
POS	5	3	2	1

Tabela 5.14 - Matriz de Preferência - Critério 7 - Fechamento Contábil

Critério 7				
Variável	GPS	LST	LSA	POS
GPS	1	1	2	2
LST	1	1	2	2
LSA	1/2	1/2	1	1
POS	1/2	1/2	1	1

Os pesos atribuídos correspondem ao grau de importância ou influência que cada critério exerce sobre cada variável, relacionados aos resultados apresentados por aplicação das variáveis. Por exemplo, interpretando a Tabela 5.9, verifica-se que para a variável LSA, o critério "tempo de coleta de dados" é "de muito forte importância" (peso 7 na escala de Saaty), que para a tecnologia GPS.

Após a normalização das matrizes, foi determinada a influência média que cada critério exerce em relação a cada variável. A Tabela 5.15 apresenta a matriz resultante.

Tabela 5.15 - Matriz de Hierarquização das Variáveis em relação aos Critérios

	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5	Critério 6	Critério 7
GPS	4,55%	5,03%	3,90%	5,31%	30,96%	6,85%	33,33%
LST	52,51%	7,70%	56,61%	24,77%	10,13%	17,02%	33,33%
LSA	21,47%	31,07%	16,89%	14,22%	3,97%	30,61%	16,67%
PÓS	21,47%	56,20%	22,60%	55,71%	54,94%	45,52%	16,67%
Soma	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

De acordo com a Tabela 5.15, considerando o critério 1, verificamos que a variável GPS apresenta uma preferência ou grau de importância de apenas 4,55%, ao

passo que, as variáveis LSA e Pós-Sinalização se apresentam, cada uma, com 21,47% de preferência.

A Tabela 5.16 apresenta a matriz de comparação entre os critérios. Nela são atribuídos os pesos relativos ao grau de importância que cada critério exerce sobre outro, dentro do problema proposto.

**Tabela 5.16 - Matriz de Hierarquização dos Critérios**

	<b>Critério 1</b>	<b>Critério 2</b>	<b>Critério 3</b>	<b>Critério 4</b>	<b>Critério 5</b>	<b>Critério 6</b>	<b>Critério 7</b>
<b>Critério 1</b>	1	1/3	1/5	1/3	1/2	1/9	1/9
<b>Critério 2</b>	3	1	1/3	3	3	1/9	1/6
<b>Critério 3</b>	5	3	1	3	4	1/8	1/5
<b>Critério 4</b>	3	1/3	1/3	1	3	1/9	1/5
<b>Critério 5</b>	2	1/3	1/4	1/3	1	1/9	1/6
<b>Critério 6</b>	9	9	8	9	9	1	5
<b>Critério 7</b>	9	6	5	5	6	1/5	1

De acordo com as análises da equipe avaliadora, ao critério 6 (Segurança Operacional) foi atribuído o peso 9 em comparação ao critério 2 (tempo de coleta de dados), representando, neste processo, que o critério 6 é “absolutamente mais importante” que o critério 2.

Também, a matriz de prioridades dos critérios foi normalizada, determinando assim a influencia média que cada critério exerce no processo como um todo, ou seja, na coleta de dados em campo para a determinação de volumes de minério estocado. A Tabela 5.17 apresenta o vetor das prioridades dos critérios, dado pelos índices de importância ou influencia dos critérios.

**Tabela 5.17 - Vetor Prioridade dos Critérios**

<b>Critério</b>	<b>Importância</b>
<b>Critério 1</b>	2,49%
<b>Critério 2</b>	7,21%
<b>Critério 3</b>	10,88%
<b>Critério 4</b>	5,48%
<b>Critério 5</b>	3,37%
<b>Critério 6</b>	47,30%
<b>Critério 7</b>	23,26%
<b>Soma</b>	100,00%

De acordo com o vetor de prioridades, o critério Segurança Ocupacional se apresentou como o mais importante com índice de 47,3 % de influencia.

Definidas as prioridades dos critérios e variáveis, foram realizados os testes de coerência ou consistência (Razão de Coerência ou Consistência - RC), que representam suas confiabilidades. De acordo com o método AHP, os valores de RC não devem ser superiores a 0,1. A Tabela 5.18 apresenta os resultados dos testes de coerências.

**Tabela 5.18 - Consistência das Avaliações dos Critérios e Variáveis**

<b>RAZÃO DE CONSISTENCIA</b>		
	<b>MATRIZ</b>	<b>RC</b>
<b>VARIÁVEIS</b>	<b>Critério 1</b>	0,031
	<b>Critério 2</b>	0,058
	<b>Critério 3</b>	0,085
	<b>Critério 4</b>	0,091
	<b>Critério 5</b>	0,088
	<b>Critério 6</b>	0,064
	<b>Critério 7</b>	0,000
	<b>CRITÉRIOS</b>	0,100

Satisfeitas as relações de consistência, definiu-se a decisão do Processo Analítico Hierárquico, pela multiplicação entre a matriz de influencia dos critérios sobre as variáveis e o vetor prioridade dos critérios. O resultado é apresentado pela Tabela 5.19.

**Tabela 5.19 - Resultado do AHP**

<b>RESULTADO AHP</b>	
<b>GPS</b>	13,23%
<b>LST</b>	25,53%
<b>LSA</b>	23,88%
<b>PÓS</b>	37,36%
<b>SOMA</b>	100,00%

A Tabela 5.19 mostra, de acordo com o AHP e com as comparações realizadas, que a alternativa 04, Pós-Sinalização (PÓS) se apresenta como a tecnologia mais indicada, neste trabalho, com o índice de 37,36%. Seguem-se as recomendações da alternativa *Laser Scanner* Terrestre (LST) com 25,53%, *Laser Scanner* Aerotransportado (LSA) com 23,88% e, finalmente, a tecnologia GPS com 13,23%.

### 5.3 CURVAS DE IMPORTÂNCIA DAS VARIÁVEIS EM RELAÇÃO AOS CRITÉRIOS

Os resultados da análise pelo AHP podem ser expressos através de curvas geradas a partir dos valores do grau de importância de cada variável em relação a cada critério. A Figura 5.2 apresenta os resultados desta forma de representação.

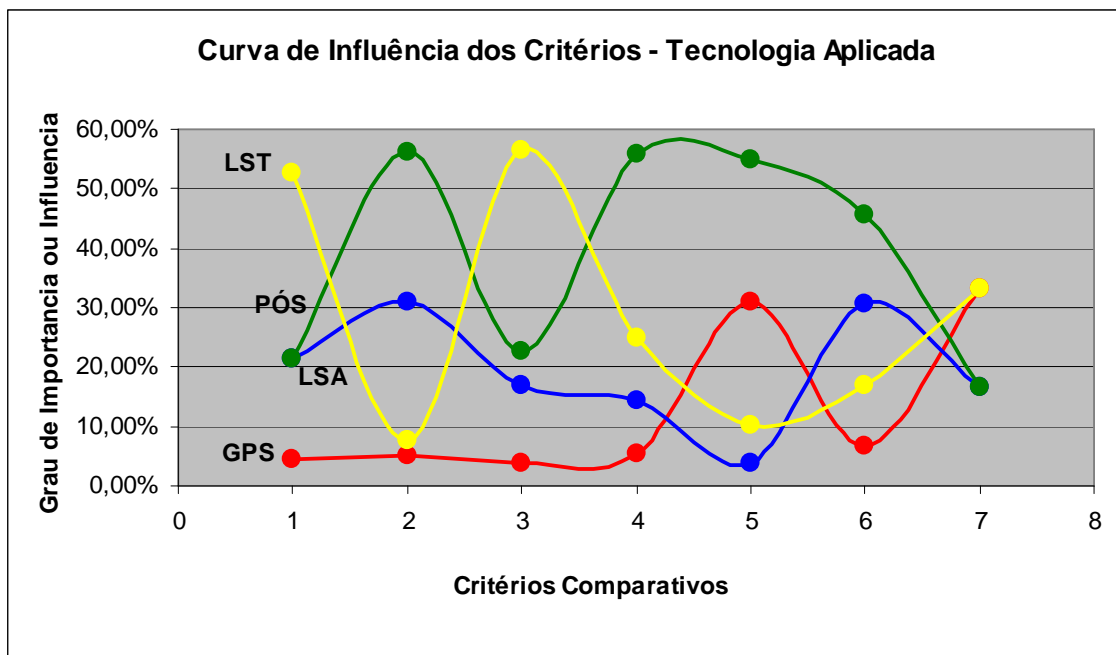


Fig 5.2 - Curvas das Variáveis em função dos Critérios

Pelas curvas apresentadas na Figura 5.2, pode-se analisar, comparativamente, a importância ou preferência que cada variável apresenta em relação aos critérios. Por exemplo, temos a seguinte ordem de importância quando analisamos as variáveis em relação ao critério 2 (tempo de coleta de dados em campo), ou seja, a variável Pós-Sinalização apresenta uma preferência de 56,2%, seguida da variável LSA com 31,07%, LST com 7,7% e GPS com apenas 5,03%.

Quanto ao critério 6 (segurança ocupacional), a variável Pós-Sinalização (PÓS) se apresenta com o maior índice de preferência, ou seja, 45,52%. Seguem as variáveis LSA com 30,61%, LST com 17,02% e GPS 6,85%.

Baseado nas interpretações das curvas de preferência das variáveis em relação aos critérios, como as da Figura 5.2, o interessado pelos serviços pode analisar, comparativamente, as variáveis e os critérios de acordo com seus interesses e necessidades.

#### **5.4 AVALIAÇÃO FINAL**

Procurou-se mostrar o comportamento das tecnologias de sensoriamento remoto ao serem aplicadas na coleta de dados em campo para cálculo de volumes de minério estocado, elegendo sete fatores variáveis de comparação. Em seis desses fatores (número de operadores, tempo de coleta de dados, número de pontos geradores de MDT, produtividade, custo operacional e segurança ocupacional) as tecnologias de sensoriamento remoto apresentaram resultados mais satisfatórios que a tecnologia GPS.

Quanto à precisão, diante da inexistência de um referencial de comparação exato, o desempenho de cada tecnologia foi avaliado a partir do comportamento de seus resultados volumétricos diante do fechamento contábil (sétimo fator) onde, surpreendentemente, a tecnologia GPS se mostrou com a menor variação contábil (1,30%), entre o estoque físico e contábil.

Há de se observar que, no fechamento contábil, os resultados das comparações entre os estoques físicos e contábeis também são questionáveis. Os estoques contábeis são determinados a partir de pesagens dos produtos antes de serem estocados e ao serem embarcados, acrescidos dos estoques do mês anterior. Já, o estoque físico é obtido a partir de medições topográficas de volumes de minérios, que são convertidos em massa utilizando um fator conhecido como densidade aparente ou densidade a granel. Este fator de conversão é definido como a razão entre a massa e o volume de um determinado corpo.

Porém, fatores como incertezas nos instrumentos de medição (balanças de produção e de carregamento), diferença de umidade entre o minério produzido e o expedido, perdas por vias eólicas e por arraste mecânico e diferentes compactações, comprometem a determinação do estoque contábil que então, pode não representar o estoque realmente presente nos pátios de produto, ou seja, o estoque físico.

## CAPÍTULO 6      CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

O ambiente físico escolhido para os estudos (pilhas de minérios estocados) apresenta particularidades que podem influenciar diretamente na obtenção de seus volumes. As constantes e ininterruptas movimentações de minério no pátio de estocagem do embarcadouro, através de operações de descargas e carregamentos, provocam a formação de pilhas com configurações geométricas irregulares, apresentando regiões com riscos de desmoronamentos e vários pontos de difícil e inseguro acesso, como exemplificado pela Figura 6.1.



**Fig 6.1 - Pilha de Minério estocado. Mina de Alegria (2009)**

Considerando a importância deste detalhamento, a existência de pontos de difícil acesso, a rapidez, precisão e, principalmente, a segurança dos operadores envolvidos, o emprego das técnicas de sensoriamento remoto se apresentou de maneira satisfatória, conduzindo a resultados mais confiáveis diante do problema proposto, ou seja, coleta de dados em campo para a determinação de volumes de pilhas de minério estocado, validando assim a hipótese assumida nesta tese.

Hipótese formulada: “Através de levantamentos por sensoriamento remoto é possível melhorar a confiabilidade nos dados utilizados para a determinação de volumes de minério estocados, bem como as condições de segurança nos trabalhos de campo, propiciando uma melhor precisão no fechamento contábil de produção e estoque”.

Os resultados volumétricos obtidos por aplicação de cada tecnologia LSA, LST e Pós-Sinalização foram comparados com os resultados advindos de levantamentos GPS, apresentando variações entre seus valores. Essas variações são reflexos das operações de coletas de dados, condicionadas à geometria e estabilidades das pilhas de minério, à variação temporal entre as medições e aos seus graus de detalhamento.

A análise multicritério, método AHP, foi utilizada neste trabalho para, de acordo com os critérios adotados e as comparações efetuadas, definir um ranking entre as tecnologias empregadas, apontando, dentro do problema proposto, aquela tecnologia mais indicada de aplicação.

Por essa análise, a tecnologia de sensoriamento remoto Pós-Sinalização se mostrou a mais indicada para a realização dos serviços de coleta de dados em campo para a determinação de volumes de pilhas de minério estocado, apresentando como principais vantagens o reduzido tempo de coleta de dados, alta produtividade, reduzido custo e o alto índice de segurança ocupacional.

O *ranking* ficou então, assim definido: Pós-Sinalização (PÓS) com índice de preferência de 37,36%, *Laser Scanner* Terrestre (LST) com 25,53%, *Laser Scanner* Aerotransportado (LSA) com 23,88% e, finalmente, a tecnologia GPS com 13,23%.

A definição deste *ranking* entre as tecnologias não tem nenhuma conotação comercial ou de promoção. Os resultados apresentados pelo AHP estão relacionados a uma situação específica, que é o problema de estudo proposto, com características, definições e variáveis próprias.

Em uma situação real de escolha entre as técnicas possíveis de aplicação, cabe aos interessados promoverem análises aos critérios variáveis comuns, definindo, em função de seus objetivos, necessidades e condições específicas, aqueles de maior peso e importância.

Recomenda-se, como trabalho futuro, a execução de comparações entre tecnologias alternativas para coletas de dados em campo, vencendo as principais limitações encontradas no desenvolvimento deste trabalho, ou seja, utilização de um modelo físico regular e estável como referencia.

Recomenda-se também, a utilização de outros produtos de tecnologias de sensoriamento remoto como imagens aéreas de grande formato, imagens orbitais obtidas por sensores óticos e radar, sensores esses que se mostram a cada dia, com grandes evoluções tecnológicas, oferecendo soluções para um número cada vez maior de diferentes aplicações.

## CAPÍTULO 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABREU, F. C. S. **Monorrestituição de Imagens de Alta Resolução Quickbird II Apoiado no MDE Obtido com Dados do Sistema *Laser Scanner***. Paraná, Curitiba: Universidade Federal do Paraná UFPR, 2005.

ARIELI, R. *The Laser Adventure*. Disponível em <http://www.perg.phys.ksu.edu/vqm/Laserweb/index.htm>. Acesso em 23 fev. 2010.

BARAÇAS, F. J. L.; MACHADO, J. P. A. **A Análise Multicritério na Tomada de Decisão. O Método Analítico Hierárquico de T. L. Saaty. Princípios Fundamentais e seu Desenvolvimento**. Portugal: Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil. 2006.

BARCELOS, J. P.; BÜCHI, J. **Mina de Minério de Ferro de Alegria, Minas Gerais**. Volume II, Capítulo V. Brasília: Principais Depósitos Minerais do Brasil. 1986.

BARCIK, E; MOSER, I; SANTOS, D. S. DOS; MARTINS, B.D. **Aplicação do Scanner Terrestre ILRIS - 3D no Ramo da Mineração**. Florianópolis, SC: MANFRA - Equipamentos Topográficos. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2007.

BENETO, A. **GPS Global Positioning System**. Instituto Nacional de Tecnologia. Terça Tecnológica. Disponível em <http://www.int.gov.br>. Acesso em 07 dez. 2006.

BERALDO, P; SOARES, S. M. **GPS: Introdução e Aplicações Práticas**. V.1. Brasília: Editora e Livraria Luana Ltda. 1995.

BOTELHO, M. F; SILVA, C. R; SCHOENINGER, E. R; CENTENO, J. A. S. **Comparação dos Resultados de Interpoladores “Vizinho mais Próximo” e “Inverso**

**de uma Distância” no Cálculo de Volume a partir de Dados do *Laser Scanner*.** Paraná, Curitiba: Universidade Federal do Paraná UFPR. 2005.

**BOTELHO, M. F. Modelagem Tridimensional de Edificações usando dados do Sistema *Laser Scanner* e Imagem Orbital de Alta Resolução Espacial.** Paraná, Curitiba: Universidade Federal do Paraná UFPR. 2007.

**BRANDALIZE, M. C. B. Estado Atual dos Sistemas ALS no Brasil e no Mundo.** Paraná, Curitiba: Pontifícia Universidade Católica do Paraná PUCPR. 2003.

**BRITO, L. C. J. N. Fotogrametria Digital.** Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro UERJ. 2007.

**BURTCH, R. LIDAR Principles and Applications.** Ferris State University: Surveying Engineering Department. 2002. Disponível em [http://www.ferris.edu/faculty/burtchr/papers/lidar\\_principles.pdf](http://www.ferris.edu/faculty/burtchr/papers/lidar_principles.pdf). Acesso em 22 abril 2010.

**CENTENO, J. A. S; MITISHITA, E. A. *Laser Scanner* Aerotransportado no Estudo de Áreas Urbanas: A Experiência da UFPR.** Santa Catarina, Florianópolis: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE. 2007. Disponível em <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br>. Acesso em 30/01/2009.

**CENTENO, J. A. S; VOSSSELMAN, G; HELLMMEYER, A; MITISHITA, E; PHILIPS, J. Curso Sensoriamento Remoto por LIDAR.** Santa Catarina, Florianópolis: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2007. Disponível em <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/?content=cursos>. Acesso em 10/09/2009.

**CICONE JÚNIOR, D. Modelagem e Aplicação da Avaliação de Custos Completos através do Processo Analítico Hierárquico dentro do Planejamento Integrado de Recursos.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2008.

**CRUZ, E. P; COVA, C. J. G. Considerações sobre a Teoria das Decisões.** São Paulo, Bauru: XIII Simpósio de Engenharia de Produção. 2006.

**DALMOLIN, Q; SANTOS, D. R. Sistema *LaserScanner*: Conceitos e Princípios de Funcionamento.** 3ª Edição. Paraná, Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2004.

**DEMARQUI, E. N. Elementos Básicos de Fotogrametria.** Mato Grosso, Cuiabá: Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus Universitário de SINOP, Departamento de Engenharia Civil. Disponível em <http://www.unemat-net.br>. Acesso em 19 abril 2010.

**DIAS, F; BRITO, F. R. M. CVRD e o Mapeamento *LASER*.** Revista InfoGeo Especial. Edição Mineração. 2007. Disponível em <http://www.mundogeo.com.br>. Acesso em 27 out. 2009.

**ESTEIO. Qualidade Radiométrica das Imagens Sensor ADS40.** 2008. Disponível em <http://www.esteio.com.br>. Acesso em 07 dez. 2010.

- FELGUEIRAS, C. A; CÂMARA, G. **Modelagem Numérica de Terreno**. São Paulo, São José dos Campos: INPE, Introdução à Ciência da Geoinformação. 2006. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd>. Acesso em 02 março 2010.
- FORTES, L. P. S. **Normas cartográficas. Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS**. Rio de Janeiro: Divisão de Pesquisas e Análises do Departamento de Geodésia do IBGE. 2005.
- GALO, M. **Princípio dos Sistemas de Varredura a LASER Aerotransportado**. São Paulo, Presidente Prudente: UNESP, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Cartografia. 2008.
- GEOID Aerolevantamentos. **Mapeamento a Laser para Projeto Executivo - Procedimentos**. Belo Horizonte, MG. 2009.
- GOMES, L. F. A. M; SIMÕES GOMES, C. F; ALMEIDA, A. T. de. **Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério**. São Paulo. 2002.
- HELLMEIER, A. **LIDAR: Sensors and Applications**. São Paulo, São José dos Campos: INPE. 2007. Disponível em [www.dsr.inpe.br/sbsr2007/pdf/curso10/Hellmeier/Hellmeier\\_INPE07\\_2\\_Lidar.pdf](http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/pdf/curso10/Hellmeier/Hellmeier_INPE07_2_Lidar.pdf). Acesso em 23 fev. 2010.
- HUGUET, A. B. **Reconstrução de Cenas Urbanas Baseada em Estereoscopia e Segmentação por Watershed**. Belo horizonte, MG: UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Ciência da Computação. 2003.
- IDOETA, I. V. **Metodologia de Elaboração Automatizada de Modelo Digital de Elevação e Ortofoto em Média e Pequena Escala**. Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2007.
- JANNUZZI, P. M. **Construção de Indicadores e Mapas de Pobreza e Riqueza nos Municípios Brasileiros**. Brasília: UNB Universidade de Brasília, Departamento de Estatística. 2005.
- JANNUZZI, P. M; MIRANDA, W. L; SILVA, D. S. G. **Análise Multicritério e Tomada de Decisão em Políticas Públicas: Aspectos Metodológicos, Aplicativo Operacional e Aplicações**. Informática Pública. Ano 11. 2009.
- JORDÃO, B. M. C; PEREIRA, S. R. **A Análise Multicritério na Tomada de Decisão - O Método Analítico Hierárquico de T. L. Saaty**. Portugal: Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil. 2006.
- LEITE, W. O. **Tutorial AutoCAD. Desenho Auxiliado por Computador**. 1.<sup>a</sup> Edição. Belo Horizonte, MG. 2010.
- LI, Z.; ZHU Q; GOLD C. **Digital Terrain Modeling. Principles and Methodology**. Hong Kong: *The Hong Kong Polytechnic, Department of Land Surveying and Geoinformatics*. 2005.

- LIMA, J. G. S. **Aplicações do Scanner Terrestre na Mineração**. Revista InfoGNSS Online. Edição 28. Ano 6. Disponível em [www.infogeo.com.br](http://www.infogeo.com.br). Acesso em 09 set. 2009.
- LINS, M. P. E; GOMES, E. G; MELLO, J. C. C. B. S. de. **Seleção do Melhor Município: Integração Sig-Multicritério**. Rio de Janeiro: Investigação Operacional. V 22. 2002.
- LOZECKY, J. **Mensuração do Resultado**. Santa Catarina, Florianópolis: Revista Contemporânea de Contabilidade. Vol. 1. n° 1. 2004. Disponível em [http://www.rcc.ufsc.br/edicao1/documentos/artigo\\_5.pdf](http://www.rcc.ufsc.br/edicao1/documentos/artigo_5.pdf). Acesso em 11 nov. 2008.
- MAIA, T. C. B. **Estudo e Análise de Poligonais segundo a NBR 13.133 e o Sistema de Posicionamento Global**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo. 1999.
- MATHER, P. M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction**. The University of Nottingham. Third Edition. 2003.
- MELO, J. F. M; FREITAS, J. B; COSTA, I. **Identificação dos Custos Ocultos nas Medidas de Produtividade: Um estudo de Caso numa Indústria Alimentícia**. Universidade Federal da Paraíba. São Paulo, Bauru: XIII SIMPEP, Simpósio de Engenharia de Produção. (2006).
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 2. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa. 2003.
- MOURA, A. C. M; FONSECA, B. M; CARVALHO, G. A. **Rotina para Elaboração de MDE com o Uso do ArcView**. Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia. 2006.
- MOURA, A. L. **Uma Proposta para a Triangulação de Delaunay 2D e Localização Planar de Pontos em OCaml**. Uberlândia, MG: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica. 2006.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Norma Regulamentadora NR-04**. Portaria 3.214 de 08/06/1978. Disponível em [http://www.mte.gov.br/legislacao/normas\\_regulamentadoras/nr\\_04.pdf](http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_04.pdf). Acesso em 24 junho 2011.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Norma Regulamentadora NR-22**. Portaria 3.214 de 08/06/1978. Disponível em [http://www.mte.gov.br/legislacao/normas\\_regulamentadoras/nr\\_22.pdf](http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_22.pdf). Acesso em 24 junho 2011.
- OLIVEIRA, E. F. **Tecnologia Inovadora Nacional**. Revista MundoGeo. Edição 57. 2009.
- PEREIRA, R. C. **Coordenadas de Pontos GPS Utilizando o Código e Formas de Correção Ionosférica e Troposférica**. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. 2008.

RATCLIFFE, S; MYERS, A. ***Laser Scanning in the Open Pit Mining Environment - A Comparison with Photogrammetry. I-SiTE Product Development White Paper.*** 2006. Disponível em [http://gim-international.com/download/whitepaper\\_uploadfile\\_2.pdf](http://gim-international.com/download/whitepaper_uploadfile_2.pdf). Acesso em 12 set. 2010

REDWEIK, P. **Fotogrametria Aérea.** Portugal, Lisboa: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. 2007.

REIS, E; BICHO, C. P; MELO, E. **Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral.** CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, SGB, Serviço Geológico do Brasil. CETEM, Centro de Tecnologia Mineral. 2007.

REVISTA MINÉRIOS & MINERALES, **Timbopeba (Complexo Mariana) / Ferro.** Edição 298. 2007. Disponível em [http://www.minerios.com.br/index.php?id\\_materia=38](http://www.minerios.com.br/index.php?id_materia=38). Acesso em 27 jan. 2009.

RIBEIRO, J. C. **Fotogrametria Digital.** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal. 2002. Disponível em <http://www.ufv.br/nugeo/ufvgeo>. Acesso em 05 março 2010.

RIBEIRO JÚNIOR, S. **Aplicação da Tecnologia GPS (Global Positioning System) nas Atividades de Topografia em Mineração.** Dissertação de Mestrado. Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto. 2006.

SALLEM FILHO, S. **As Inovações do Laser Aerotransportado: Suas Vantagens para Mapeamento de Dutos.** Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. *Rio Pipeline Conference & Exposition.* 2007. Disponível em <http://www.lidar.com.br>. Acesso em 14 set. 2009.

SANTOS, D. R. **Elementos de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto.** Paraná, Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica. Disponível em <http://www.cartografica.ufpr.br/docs/foto1/capitulo1.pdf>. Acesso em 19 abril 2010.

SATO, S. S. **Evoluções Geotecnológicas e Suite APS Amostra de Soluções de Mapeamento: APS & Correlator 3D.** DVP Brasil Geomática e Ambiental Ltda. 2009.

SAUSEN, T. M. **Sensoriamento Remoto Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas.** São Paulo, São José dos Campos: INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2005.

SCHAFER, A. G; LOCH, R. E. N. **Aplicação dos Dados do Sensor LaserScanner para Modelagem do Terreno visando Projetos Rodoviários.** Goiânia, GO: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2005.

STEFFEN, C. A. **Introdução ao Sensoriamento Remoto.** São Paulo, São José dos Campos: INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto. 2008. Disponível em <http://www.politecnico.ufsm.br/cursos/tecnicos>. Acesso em 25 fev. 2010.

- TEMBA, P. **Fundamentos da Fotogrametria**. Belo horizonte, MG: UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia. 2000. Disponível em <http://www.ltc.ufes.br/GEOMATIC/Modulo%20Fotogrametria.pdf>. Acesso em 21 jan 2009.
- TOMMASELLI, A. M. G. **Um Estudo Sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a Curta Distância**. Revista da Comissão Brasileira de Geodésia, GEODÉSIA Online. 2003.
- TOMMASELLI, A. M. G. *Fotogrametria Básica*. São Paulo: UNESP, Universidade Estadual Paulista. 2009. Disponível em <http://www4.fct.unesp.br/docentes/cartotomaseli/Fotogrametria>. Acesso em 05 março 2010.
- VALE. **Consolidação e Conciliação de Fechamento Contábil de Alegria e Timbopeba**. Procedimento 0019-GAPGS - DIFS - Departamento de Ferrosos Sudeste. 2009.
- VEIGA, A. C. R. **Tecnologias de Escaneamento a Laser e Engenharia Reversa Aplicadas ao Patrimônio Cultural Urbano e Arquitetônico: Levantamento Métrico + Modelagem Virtual + Fotografia + Maquete Perfilada por Usinagem**. Vol. 2. N<sup>o</sup>. 2. Patrimônio e Novas Mídias: Digitalização e Geoprocessamento. 2010.
- VILAS BOAS, C. L. **Análise da Aplicação de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MMAD) na Gestão de Recursos Hídricos**. Goiânia, GO: CPRM, Companhia de Recursos e Pesquisa Mineral. 2005.
- XAVIER, V. A. Procedimento Utilizado na Medição de Pilhas de Minério da Mineração Casa de Pedra. Portal MundoGeo. 2010. Disponível em <http://www.mundogeo.com.br>. Acesso em junho 2010.
- WUTKE, J. D. **Métodos para Avaliação de um Sistema Laser Scanner Terrestre**. Paraná, Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2006.
- <http://www.autocadcad.com/2010/02/autocad-civil-3d-2010>. Acesso em 31 maio 2011
- <http://www.charpointer.com>. Acesso em 31 maio 2011
- <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 22 dezembro 2011
- <http://www.images.google.com.br>. Acesso 25 fev. 2010.
- <http://www.isite3d.com.br>. Acesso em 12 fev. 2010.
- <http://www.lidar.com.br/glossario.htm>. Acesso em 22 fev. 2010.
- [http://www.maptek.com/products/i-site/i-site\\_studio.html](http://www.maptek.com/products/i-site/i-site_studio.html). Acesso em 06 junho 2011.
- [http://www.terrasolid.fi/system/files/TerraModeler\\_eng\\_2.pdf](http://www.terrasolid.fi/system/files/TerraModeler_eng_2.pdf). Acesso em 06 junho 2011.
- <http://www.trimble.com>. Acesso em 05 out. 2009.

ANEXO 1

Planilha Mãe - Fechamento Contábil.

The screenshot displays a Microsoft Excel spreadsheet with a menu for 'Planilha Mãe - Fechamento Contábil'. The menu is organized into three main sections: 'ENTRADA DE DADOS', 'CADASTRO DE PARÂMETROS', and 'RELATÓRIOS'. A 'CHECK LIST' is also visible on the right side of the spreadsheet.

**ENTRADA DE DADOS**

- Movimentações de Mina: Movimentações de Minério, Estéril, Outros e Alimentações de Usina
- Resumo de Produção: Alimentação de usina e Resumo da Produção
- Cadastramento de Pilhas: Pilhas vigentes nos pátios no mês corrente
- Movimentações de Estoque após Medição: Movimentações entre pilhas / pátios após a medição topográfica
- Transformação de Estoque: Transformação de Estoque Calculado por Produto
- Estoque Topográfico: Medição topográfica, densidades, data/hora medição, produção após medição
- Estoque Físico Calculado: Produção mensal informada pela Unidade Produtiva
- Ajustes Topográficos: Baixa de Estoque e justificativas

**CADASTRO DE PARÂMETROS**

- Cadastro de Parâmetros: Cadastro de Parâmetros das Unidades (Somente Administrador do Sistema)

**RELATÓRIOS**

- Resumo de Embarque: Resumo de Embarques e Finalização do Fechamento
- Detalhamento de Embarque: Detalhamento de Embarques por Lote e Pilha
- Resumo de Movimentações: Resumo de Embarques e Finalização processo de Fechamento da produção
- Movimentações Internas Embarques: Movimentação Interna de Embarque

**CHECK LIST**

- Movimentacoes: OK
- Cadastro\_Pilhas: OK
- Transformacao\_Estoque: OK
- MovimentacaoEstoque: OK
- Estoque\_Topografico: OK
- Estoque\_Calculado: OK
- Ajuste\_Estoque: OK
- Resumo\_Embarque: OK
- Detalhamento\_Embarque: OK
- Fim Fechamento: OK

ANEXO 2

Planilha de Ajustes Topográficos. Levantamento GPS em 28/07/2009.

Microsoft Excel - Contabil200907

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Digite uma pergunta

Arial 10 N

**CÁLCULO E JUSTIFICATIVAS DO AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO**  
**Alegria - Julho / 2009**

	Complexo	Unidade Produtiva	Produto Intermediário	Estoque Calculado Mês Atual (t)	Estoque Físico (Medição Topográfica) (t)	Ajuste Topográfico (t)	Ajuste Topográfico (%)	Variação de Peso Embarcado	Baixa de Estoque	Variação de Volume	Justificativas
5	Mariana	Alegria	CHSA	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
6	Mariana	Alegria	CLSA	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
7	Mariana	Alegria	CNSA	5.754,00	6.790,00	1.036,00	15,26%	0,00		1.036,00	
8	Mariana	Alegria	HEAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
9	Mariana	Alegria	HTIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
10	Mariana	Alegria	ITAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
11	Mariana	Alegria	NPFN	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
12	Mariana	Alegria	NPIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
13	Mariana	Alegria	SFCG	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
14	Mariana	Alegria	SFIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
15	Mariana	Alegria	SMAL	1.922,80	1.922,80	0,00	0,00%	0,00		0,00	
16	Mariana	Alegria	FCAL	329.471,19	340.684,37	11.213,18	3,29%	0,00		11.213,18	
17	Mariana	Alegria	SDAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
18	Mariana	Alegria	SFAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
19	Mariana	Alegria	PEAL	72.153,62	38.855,51	-33.298,11	-85,70%	0,00		-33.298,11	
20	Mariana	Alegria	PXAL	-23.317,40	1.795,24	25.112,64	1398,85%	0,00		25.112,64	
21	Mariana	Alegria	PFAL	-4.424,99	6.425,95	10.850,93	168,86%	0,00		10.850,93	
22	Mariana	Alegria	NSAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
23	Mariana	Alegria	NPAL	241.449,78	247.553,96	6.104,18	2,47%	0,00		6.104,18	
24	Mariana	Alegria	SIAL	174.370,95	220.172,50	45.801,55	20,80%	0,00		45.801,55	
25	Mariana	Alegria	SHAL	181.212,16	121.786,51	-59.425,65	-48,79%	-87,20		-59.338,45	
26	Mariana	Alegria	SPAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
101	<b>TOTAL</b>			<b>978.592,11</b>	<b>985.986,84</b>	<b>7.394,73</b>	<b>0,75%</b>	<b>-87,20</b>	<b>0,00</b>	<b>7.481,93</b>	
102											
103											
104											
---											

Digitado por (Nome/ Matricula) Conferido por (Nome/ Matricula)

ANEXO 3

Planilha de Ajustes Topográficos. Levantamento GPS em 16/09/2009.

Microsoft Excel - FECHAMENTO\_FINAL\_GPS\_13\_SETEMBRO\_QUINZENAL

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Digite uma pergunta

Arial 10

CÁLCULO E JUSTIFICATIVAS DO AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO										
Alegria - Setembro / 2009										
Complezo	Unidade Produtiva	Produto Intermediário	Estoque Calculado Mês Atual (t)	Estoque Físico (Medição)	Ajuste Topográfico (t)	Ajuste Topográfico (%)	Variação de Peso Embarcado	Baixa de Estoque	Variação de Volume	Justificativas
Mariana	Alegria	CHSA	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	CLSA	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	CNSA	52.614,00	0,00	-52.614,00	100,00%	24.675,00		-52.614,00	
Mariana	Alegria	HEAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	HTIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	ITAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	NPFN	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	NPIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	SFCG	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	SFIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	SMAL	1.922,80	1.922,80	0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	FCAL	156.434,93	146.671,79	-9.763,14	-6,66%	0,00		-9.763,14	
Mariana	Alegria	SDAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	SFAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	PEAL	37.512,65	80.258,47	42.745,82	53,26%	0,00		42.745,82	
Mariana	Alegria	PXAL	-20.741,41	1.920,00	22.661,41	1180,28%	0,00		22.661,41	
Mariana	Alegria	PFAL	9.215,14	0,00	-9.215,14	100,00%	0,00		-9.215,14	
Mariana	Alegria	NSAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
Mariana	Alegria	NPAL	228.956,60	236.626,69	7.670,10	3,24%	0,00		7.670,10	
Mariana	Alegria	SIAL	172.608,00	198.550,81	25.942,81	13,07%	0,00		25.942,81	
Mariana	Alegria	SHAL	204.277,64	192.761,16	-11.516,48	-5,97%	0,00		-11.516,48	
Mariana	Alegria	SPAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
<b>TOTAL</b>			<b>842.800,34</b>	<b>858.711,73</b>	<b>15.911,39</b>	<b>1,85%</b>	<b>24.675,00</b>	<b>0,00</b>	<b>15.911,39</b>	
<b>Digitado por (Nome/ Matricula)</b>					<b>Conferido por (Nome/ Matricula)</b>					

**ANEXO 4**

Planilha de Ajustes Topográficos . Levantamento LST em 28/07/2009.

CÁLCULO E JUSTIFICATIVAS DO AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO											
Alegria - Julho / 2009											
Complexo	Unidade Produtiva	Produto Intermediário	Estoque Calculado Mês Atual (t)	Estoque Físico (Medição Topográfica)	Ajuste Topográfico (t)	Ajuste Topográfico (%)	Varição de Peso Embarcado	Baixa de Estoque	Varição de Volume	Justificativas	
Mariana	Alegria	CHSA	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	CLSA	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	CNSA	5.754,00	6.790,00	1.036,00	15,26%	0,00		1.036,00		
Mariana	Alegria	HEAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	HTIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	ITAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	NPFN	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	NPIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	SFCG	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	SFIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	SMAL	1.922,80	1.922,80	0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	FCAL	329.471,19	340.684,37	11.213,18	3,29%	0,00		11.213,18		
Mariana	Alegria	SDAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	SFAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	PEAL	72.153,62	43.881,91	-28.271,72	-64,43%	0,00		-28.271,72		
Mariana	Alegria	PXAL	-23.317,40	3.441,33	26.758,72	777,57%	0,00		26.758,72		
Mariana	Alegria	PFAL	-4.424,99	8.088,43	12.513,41	154,71%	0,00		12.513,41		
Mariana	Alegria	NSAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
Mariana	Alegria	NPAL	241.449,78	227.324,93	-14.124,85	-6,21%	0,00		-14.124,85		
Mariana	Alegria	SIAL	174.370,95	221.285,24	46.914,30	21,20%	0,00		46.914,30		
Mariana	Alegria	SHAL	181.212,16	111.106,13	-70.106,03	-63,10%	-87,20		-70.018,83		
Mariana	Alegria	SPAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00		
<b>TOTAL</b>			<b>978.592,11</b>	<b>964.525,14</b>	<b>-14.066,98</b>	<b>-1,46%</b>	<b>-87,20</b>	<b>0,00</b>	<b>-13.979,78</b>		
Digitado por (Nome/ Matricula)					Conferido por (Nome/ Matricula)						

**ANEXO 5**

Planilha de Ajustes Topográficos. Levantamento LSA em 16/09/2009.

Microsoft Excel - FECHAMENTO FINAL\_LSA\_13\_SETEMBRO\_QUINZENAL

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Digite uma pergunta

Arial 10

CÁLCULO E JUSTIFICATIVAS DO AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO											
Alegria - Setembro / 2009											
	Complexo	Unidade Produtiva	Produto Intermediário	Estoque Calculado Mês Atual (t)	Estoque Físico (Medição)	Ajuste Topográfico (t)	Ajuste Topográfico (%)	Variação de Peso Embarcado	Baixa de Estoque	Variação de Volume	Justificativas
4	Mariana	Alegria	CHSA	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
5	Mariana	Alegria	CLSA	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
6	Mariana	Alegria	CNSA	52.614,00	0,00	-52.614,00	100,00%	24.675,00		-52.614,00	
7	Mariana	Alegria	HEAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
8	Mariana	Alegria	HTIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
9	Mariana	Alegria	ITAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
10	Mariana	Alegria	NPFN	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
11	Mariana	Alegria	NPIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
12	Mariana	Alegria	SFCG	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
13	Mariana	Alegria	SFIR	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
14	Mariana	Alegria	SMAL	1.922,80	1.922,80	0,00	0,00%	0,00		0,00	
15	Mariana	Alegria	FCAL	156.434,93	145.079,11	-11.355,82	-7,83%	0,00		-11.355,82	
16	Mariana	Alegria	SDAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
17	Mariana	Alegria	SFAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
18	Mariana	Alegria	PEAL	37.512,65	77.018,85	39.506,21	51,29%	0,00		39.506,21	
19	Mariana	Alegria	PXAL	-20.741,41	1.920,00	22.661,41	1180,28%	0,00		22.661,41	
20	Mariana	Alegria	PFAL	9.215,14	0,00	-9.215,14	100,00%	0,00		-9.215,14	
21	Mariana	Alegria	NSAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
22	Mariana	Alegria	NPAL	228.956,60	222.850,50	-6.106,09	-2,74%	0,00		-6.106,09	
23	Mariana	Alegria	SIAL	172.608,00	181.163,36	8.555,35	4,72%	0,00		8.555,35	
24	Mariana	Alegria	SHAL	204.277,64	196.380,16	-7.897,48	-4,02%	0,00		-7.897,48	
25	Mariana	Alegria	SPAL	0,00		0,00	0,00%	0,00		0,00	
26	TOTAL			842.800,34	826.334,78	-16.465,56	-1,99%	24.675,00	0,00	-16.465,56	
27											
28											
29	Digitado por (Nome/ Matricula)					Conferido por (Nome/ Matricula)					

**ANEXO 6**

Planilha de Ajustes Topográficos. Levantamento Pós-Sinalização em 22/07/2011.

AJUSTE DE ESTOQUE POR PRODUTO									
Área Operacional	Pilha	Estoque Físico	Estoque do SGDS	Ajustes Operacionais Já Realizados	Estoque do SGDS sem Ajustes Operacionais	Total a ser Ajustado no SGDS	Ajuste Operacional a ser Realizado	Ajuste Topográfico a ser Realizado	Justificativas dos Ajustes
Alegria	11SLIB3	18.371,90	18.371,90		18.371,90	0,00	0,00	0,00	
Alegria	11SNIB3	2.514,00	10.023,00	-24.654,00	34.677,00	-7.509,00	24.654,00	-32.163,00	
Alegria	11N010	66.030,29	36.596,79	-390,00	36.986,79	29.433,50	390,00	29.043,50	
Alegria	11GIB2	661,44	118,74	251,00	-132,26	542,70	-251,00	793,70	
Alegria	11GIB1	-756,26	118,24	139,00	-20,76	-874,50	-139,00	-735,50	
Alegria	11C01F4	21.977,38	5.458,98	28.914,42	-23.455,44	16.518,40	-28.914,42	45.432,81	
Alegria	11PEB2	-2.152,30	247,17	86.621,83	-86.374,66	-2.399,47	-86.621,83	84.222,36	
Alegria	11PFB2	34,94	120,33	7.000,00	-6.879,67	-85,39	-7.000,00	6.914,61	
Alegria	11PXB2	25,25	86,96	2.621,00	-2.534,04	-61,71	-2.621,00	2.559,29	
Alegria	11FIB1	-54,84	1.987,03	2.000,00	-12,97	-2.041,87	-2.000,00	-41,87	
Alegria	11FIB2	22.255,21	22.255,21	-2.000,00	24.255,21	0,00	2.000,00	-2.000,00	
Alegria	11FIB3B	21.595,66	179.334,59	-3.000,00	182.334,59	-157.738,93	3.000,00	-160.738,93	
Alegria	11FIB3	-855,37	73,97	3.000,00	-2.926,03	-929,34	-3.000,00	2.070,66	
Alegria	11FIB3A	20.801,00	20.801,00		20.801,00	0,00	0,00	0,00	
Alegria	11S01B	126.731,58	97.179,06		97.179,06	29.552,52	0,00	29.552,52	
Alegria	11SFMLC	4.044,73	4.044,73		4.044,73	0,00	0,00	0,00	
Alegria	11SML01	4.070,00	4.070,00		4.070,00	0,00	0,00	0,00	
Alegria	11RMMLC	69.234,35	69.234,35		69.234,35	0,00	0,00	0,00	
Alegria	11N01M	0,00	29,21		29,21	-29,21	0,00	-29,21	
Alegria	11N02M	61.292,68	33.212,55		33.212,55	28.080,13	0,00	28.080,13	
Alegria	11C03F4	246,86	81,23		81,23	165,63	0,00	165,63	
Alegria	11C02F4	132,76	43,69		43,69	89,07	0,00	89,07	
Alegria	11S01G	18.112,63	4.824,85		4.824,85	13.287,78	0,00	13.287,78	
Alegria	11S05C	34.624,10	365,32		365,32	34.258,78	0,00	34.258,78	
Alegria	11S01D	92.021,89	108.899,83		108.899,83	-16.877,94	0,00	-16.877,94	
Alegria	11S01E	380,96	5.989,39		5.989,39	-5.608,43	0,00	-5.608,43	
Alegria	11S02H	26.260,38	51.883,03		51.883,03	-25.622,65	0,00	-25.622,65	
Alegria	11S04C	-18.097,22	2.956,06		2.956,06	-21.053,28	0,00	-21.053,28	
Alegria	11FIB32	15.006,10	15.006,10		15.006,10	0,00	0,00	0,00	
<b>TOTAL</b>		<b>604.510,09</b>	<b>693.413,30</b>	<b>100.503,25</b>	<b>592.910,05</b>	<b>-88.903,21</b>	<b>-100.503,25</b>	<b>11.600,03</b>	

**FECHAMENTO 1,92%**

## APÊNDICE

---

Nesta seção serão apresentados, sucintamente, os aplicativos computacionais utilizados nas gerações dos MDT e cálculos de volumes de minério.

### **1.1 - *AutoCAD CIVIL 2010 - 3D***

O AutoCAD é um programa de CAD (Computer Aided Draft and Design - Desenho e Projeto Auxiliado por Computador - ou somente CAD).

De acordo com Leite (2010), a AutoDesk Inc. (empresa que desenvolve e comercializa o aplicativo), apresentou a versão 1.0 do AutoCAD em novembro de 1982. Hoje o AutoCAD encontra-se na 25ª versão.

Por sua arquitetura aberta, torna-se um ambiente ideal para o desenvolvimento de projetos, permitindo a utilização em praticamente qualquer área, como engenharia, arquitetura, agrimensura, indústria, científica, design ou qualquer outra aplicação que necessite de desenho e projeto auxiliado por computador.

Uma das versões do aplicativo é o *AutoCAD Civil 3D 2010*. Este *software* é dirigido aos profissionais da engenharia civil, permitindo aos seus usuários uma melhor

avaliação de cenários em uma fase inicial de projetos, bem como a otimização de seus desenvolvimentos através de análises geoespaciais e visualizações 3D.

Associado à topografia, o aplicativo computacional apresenta funcionalidades que incluem a importação direta de dados de levantamentos ainda não processados, ajustes de mínimos quadrados, definições e transformações do sistema de coordenadas, edição das observações de campo, criação automática da geometria topográfica, criação de superfícies (MDT) e cálculo de volumes.

O *AutoCAD Civil 3D* inclui ferramentas de modelação de terrenos que aceitam modelos de grandes superfícies, mantendo simultaneamente relações dinâmicas com dados de campo, incluindo curvas de nível, linhas de quebra e outros objetos. Utiliza as superfícies como referência para criar perfis, cortes e aterros. Qualquer alteração aos dados resulta na atualização automática das superfícies e das referências, o que o ajuda a poupar tempo e a diminuir o número de erros (AUTOCADCAD.COM, 2010).

## **1.2 - TopoGRAPH 98 SE**

O Sistema topoGRAPH é um *software* para processamento de dados topográficos, cálculos de volumes de terraplenagem, projetos viários e elaboração de notas de serviço.

Destinado às diversas áreas da engenharia e da construção que se utiliza de uma base topográfica no desenvolvimento de seus trabalhos, como edificações, loteamento, regularização fundiária, reflorestamento, irrigação, mineração, estradas, barragens, etc. (CHARPOINTER, 2010).

O sistema foi desenvolvido baseado em experiências reais de campo, proporcionando aos seus usuários um aumento de produtividade. É fácil de usar, pois utiliza a interface gráfica do Windows e respeita a seqüência natural de trabalho dos profissionais. As etapas, desde os cálculos das poligonais ao desenho final, são desenvolvidas de maneira rápida e intuitiva.

O sistema topoGRAPH é composto de três módulos (Topografia, Volumes e Projetos) que podem ser adquiridos separadamente, para melhor se acomodar às necessidades de cada setor operacional.

No módulo volumes, há opções de se utilizar as técnicas de comparação de superfícies geradas a partir de redes regulares ou irregulares, ou seções transversais, as quais são comparadas duas a duas.

Utilizando-se as seções transversais para os cálculos de volumes, podem ser empregados os métodos da “semi-soma” ou do “tronco de pirâmide”.

### **1.3 - *TerraModeler***

O aplicativo computacional *TerraModeler* é um completo conjunto de ferramentas utilizadas para o tratamento de dados levantados por escaneamentos a Laser.

Permite a geração de modelos de superfície e de solo, elementos gráficos ou arquivos de texto com as coordenadas dos pontos Laser.

Apresenta versáteis funções de edição e exibição, como contornos, redes coloridas, perfis, superfície sombreada, bem como o cálculo de volumes.

O *software TerraModeler* calcula volumes entre duas superfícies usando modelos baseados em TIN e método prismoidal (tronco de prisma), apresentando como resultados volumes de corte e aterro. Alternativamente, podem-se calcular volumes a partir de seções transversais (TERRASOLID, 2011)

O *TerraModeler* constitui um pacote de ferramentas computacionais, de fácil manuseio, que proporciona uma alta produtividade. É utilizado para muitas finalidades, com aplicabilidades na engenharia civil em geral, arquitetura e urbanismo, projetos ambientais e na cartografia em tarefas fotogramétricas.

### **1.4 - *I-Site Studio***

De acordo com o fabricante do *Laser Scanner I-Site (I-Site Pty Ltd)*, o *software I-Site Studio* é um aplicativo computacional topográfico, utilizado no processamento de seus dados coletados em campo (MAPTEK, 2011).

O *software* oferece todas as ferramentas para aplicação da tecnologia *Laser Scanner* às tarefas de levantamentos e monitoramentos nas indústrias, mineração e outras engenharias.

Usa simples formas geométricas como linhas e polígonos para agregar à visualização e fornecer limites para as opções de filtro.

Gera resultados finais como triangulações, curvas de nível, seções, MDT, cálculos de volume, etc.