

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, DIGITALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA E MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PARTÍCULAS ROCHOSAS PARA BALASTRO FERROVIÁRIO

PATRÍCIA DA SILVA JERÓNIMO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Eduardo Manuel Cabrita Fortunato

Coorientador: Professor Doutor José Ricardo Pontes Resende

SETEMBRO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

"A única coisa que devemos temer é o próprio medo."

Franklin Delano Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Eduardo Fortunato pela oportunidade de elaborar a dissertação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e pela disponibilidade, orientação e ajuda prestadas.

Agradeço igualmente ao meu coorientador, Professor Ricardo Resende, pela orientação e ajuda concedidas.

Agradeço à empresa *GEOTRILHO* por ter colaborado neste trabalho a título gracioso com a disponibilidade do scanner *EXAscan HandyScan 3D* da *Creaform*.

Ao Engenheiro Bruno Baptista da empresa *GEOTRILHO* por todas as informações prestadas e pela excelente colaboração no desenvolvimento do trabalho.

Aos Técnicos Rui Coelho e Nuno Nunes pelas ideias e ajuda na elaboração dos trabalhos laboratoriais.

Ao Departamento de Barragens de Betão do LNEC pela ajuda na elaboração dos moldes de gesso.

Ao Departamento de Geotecnia do LNEC por ter disponibilizado o engenho de furação das pedras.

À empresa *S3D*, nomeadamente ao Engenheiro Daniel Janeiro pela ajuda prestada com o *software GOM Inspect*.

Ao FabLab de Lisboa por ter disponibilizado o scanner *Roland Modela MDX-20*.

Ao Designer Clement Greiner, por ter auxiliado na manipulação dos ficheiros provenientes do scanner *Roland Modela*.

Agradeço ao Pedro, por todo o seu apoio, paciência, carinho e compreensão em todos os momentos, por ter acreditado em mim e sem a ajuda de quem não teria conseguido chegar aqui.

A todos os meus amigos e à minha família, por todo o carinho e por sempre me terem apoiado.

E por último aos meus pais, por me proporcionarem esta oportunidade, por todos os ensinamentos, por todo o amor, por todas as conversas, por sempre me terem ajudado a atingir os meus objetivos e a ultrapassar os obstáculos, por serem o pilar da minha vida.

RESUMO

A camada de balastro existente nas vias-férreas desempenha um papel fundamental no comportamento da estrutura, contribuindo para a estabilidade da mesma. O comportamento desta camada é condicionado pela compactação e pelas características físicas e mecânicas das partículas. As cargas cíclicas provenientes do tráfego ferroviário movimentam, fragmentam e desgastam as pedras de balastro, alterando a geometria e granulometria inicial desta camada e obrigando a operações frequentes de manutenção.

A estrutura ferroviária pode ser modelada através de modelos contínuos ou descontínuos, sendo preferível a utilização destes últimos para representar a camada de balastro, tendo em conta as características das partículas e a forma como interagem entre si. Uma vez que a geometria das pedras influencia o comportamento da camada de balastro, na modelação pelo método dos elementos discretos estes devem aproximar a forma e o tamanho das partículas.

Esta tese apresenta um estudo acerca de métodos de digitalização tridimensional que permitem modelar a geometria das partículas de balastro, para que posteriormente integrem uma biblioteca digital de pedras à qual se poderá recorrer para criar elementos discretos.

São criados modelos das partículas antes e depois dos ensaios de resistência ao desgaste e à fragmentação. Os ficheiros resultantes permitem deste modo criar elementos que integrem a modelação de vias recentes, ou com um determinado tempo de serviço.

Através da comparação dos modelos antes e depois dos ensaios de cada partícula, é ainda possível averiguar as alterações que estes introduziram na sua geometria, nomeadamente, as áreas que sofreram maior erosão.

PALAVRAS-CHAVE: balastro ferroviário, caracterização mecânica de partículas rochosas, digitalização de partículas.

ABSTRACT

The railroad track ballast layer plays a key role in the behaviour of the structure, contributing to its stability. This layer's mechanical response is defined by the compaction and by the geometrical and mechanical characteristics of the particles. Cyclic loads from rail traffic move, fragment and wear the ballast stones, changing the geometry and grain size of this layer, which requires frequent maintenance.

The rail structure can be modelled using continuum or discrete models, the latter being preferred since they represent the characteristics of the particles and their interaction. Since the geometry of the stones influences the behaviour of the ballast layer, in the modelling by discrete elements these should correctly represent the shape and size of the particles.

This thesis presents a study on three-dimensional scanning methods which allow the simulation of the geometry of the ballast particles, for later integration in a stones digital library which can be used to create discrete elements.

Models of the particles before and after wear and fragmentation tests are created. The resulting files allow the creation of elements that integrate the modelling of rail-roads, recent or with a certain period of service.

By comparing the models before and after the tests of each particle, it is possible to verify the changes they have introduced in their geometry, in particular, the areas that suffered aggravated erosion.

KEYWORDS: Railway ballast, Scanning of particles, Mechanical and physical characterization of rock particles

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	v

1. INTRODUÇÃO

1

1.1. ENQUADRAMENTO	1
--------------------------	---

1.2. OBJETIVOS.....	2
---------------------	---

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
------------------------------------	---

2. BALASTRO NA VIA-FÉRREA.....

3

2.1. UTILIZAÇÃO DO BALASTRO NA VIA-FÉRREA	5
---	---

2.1.1. FUNÇÕES DO BALASTRO NA VIA-FÉRREA	5
--	---

2.1.2. FATORES QUE CONDICIONAM O COMPORTAMENTO DO BALASTRO NA VIA-FÉRREA	6
--	---

2.1.3. DEGRADAÇÃO E CONTAMINAÇÃO DO BALASTRO	8
--	---

2.2. CARACTERIZAÇÃO DO BALASTRO FERROVIÁRIO	13
---	----

2.2.1. RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	14
----------------------------------	----

2.2.1.1. Ensaio de <i>Los Angeles</i>	14
---	----

2.2.1.2. Ensaio de <i>Micro-Deval</i>	14
---	----

2.2.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	15
---	----

2.2.2.1. Índice de Achatamento.....	15
-------------------------------------	----

2.2.2.2. Índice de Forma	16
--------------------------------	----

2.2.2.3. Comprimento	16
----------------------------	----

2.2.3. ELEMENTOS PREJUDICIAIS	17
2.2.4. VALORES LIMITE DA REFER	17
2.2.5. OUTROS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS	19
2.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA CAMADA DE BALASTRO	21
2.3.1. MÉTODOS CONTÍNUOS	23
2.3.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS	23
2.3.3. ESTADO DE ARTE	30
2.3.3.1. Sistema AIMS (Al-Rousan <i>et al.</i> , 2005)	30
2.3.3.2. Scanner da Roland DGA Corporation (Anochie-Boateng <i>et al.</i> , 2011)	32
2.3.3.3. Sistema UI-AIA (Moaveni <i>et al.</i> , 2014, Tutumluer <i>et al.</i> , 2013, Uthus <i>et al.</i> , 2005)	33

3. MÉTODOS DE DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS PARTÍCULAS DE BALASTRO

35

3.1. UTILIZAÇÃO DO SCANNER ROLAND MODELA MDX-20	35
3.1.1 PREPARAÇÃO DOS MOLDES	36
3.1.2 PROCESSO DE DIGITALIZAÇÃO	41
3.1.3 RESULTADOS OBTIDOS	42
3.2. UTILIZAÇÃO DO EXASCAN HANDYSCAN 3D DA CREAFORM	45
3.2.1 PROCEDIMENTO	46
3.2.2 RESULTADOS OBTIDOS	53
3.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	55

4. MODELOS DAS PARTÍCULAS DE BALASTRO

61

4.1. AMOSTRAGEM	61
------------------------------	-----------

4.2. CARACTERÍSTICAS E MODELOS DAS PARTÍCULAS SELECIONADAS	62
4.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA	67
4.4. COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS PARTÍCULAS APÓS ENSAIOS	70
4.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DAS PARTÍCULAS	79
4.6. CARACTERIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS PARTÍCULAS	84
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	91
5.1. CONCLUSÕES	91
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXOS	101
ANEXO I	103
ANEXO II	107
ANEXO III	117
ANEXO IV	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema estrutural da via balastrada - perfil longitudinal (Fortunato, 2005, adaptado).....	3
Figura 2 - Esquema estrutural da via balastrada - perfil transversal (Fortunato, 2005, adaptado).	5
Figura 3 - Tensões devido às forças verticais nos elementos da via (Fortunato, 2005, adaptado).	6
Figura 4 - Assentamentos permanentes devido à passagem dos comboios, observados numa via fundada num solo areno-siltoso (Fortunato, 2005, adaptado).	8
Figura 5 - Degradação de balastro granítico durante o ensaio de Los Angeles (Qian <i>et al.</i> , 2014, adaptado).	10
Figura 6 – Amostras de balastro recolhido à superfície, a cerca de 25,4 cm da superfície e a 40,6 cm da superfície (Moaveni <i>et al.</i> , 2014).	10
Figura 7 - Diferentes tipos de infiltração na camada de balastro: a) desgaste dos elementos da via e infiltração de materiais a partir da superfície; b) infiltração de materiais a partir das camadas granulares subjacentes ao balastro; c) infiltração de materiais a partir da fundação (Fortunato, 2005, adaptado).	11
Figura 8 – Acumulação de água à superfície causada por condições de drenagem insuficientes (Indraratna <i>et al.</i> , 2011).	12
Figura 9 - Bombagem de finos (Indraratna <i>et al.</i> , 2011).	12
Figura 10 - Deslocamento lateral da via: a) em alinhamento reto; b) em curva (Indraratna <i>et al.</i> , 2011).	13
Figura 11 - Máquina de <i>Los Angeles</i>	14
Figura 12 - Máquina de <i>Micro-Deval</i>	15
Figura 13 - Peneiros de barras.	16
Figura 14 - Paquímetro (Coutinho, 2013).	16
Figura 15 - Fuso granulométrico do balastro (IT.GEO.001, 2008).	19
Figura 16 - A partícula segundo diferentes escalas (Rodriguez <i>et al.</i> , 2013, adaptado).	19
Figura 17 - Medição da partícula segundo eixos perpendiculares (Rodriguez <i>et al.</i> , 2013, adaptado).	20
Figura 18 - Ábaco de classificação para partículas (Uthus <i>et al.</i> , 2005, adaptado).	21
Figura 19 – Modelos da via sobre meio elástico: a) rigidez da via por unidade de superfície; b) rigidez da via por unidade de comprimento; c) rigidez da via por apoios discretos (Teixeira, 2003, adaptado).	22
Figura 20 - Malha utilizada na modelação da via-férrea balastrada com o <i>FLAC3D</i> (Fortunato e Resende, 2006, adaptado).	23
Figura 21 - Parâmetros do MED (Huang, 2010, adaptado).	24
Figura 22 - Ciclo de cálculo no MED segundo <i>ITASCA</i> (Huang, 2010, adaptado).	24
Figura 23 - Forças de contacto entre partículas de balastro limpo (à esquerda) e contaminado com finos (à direita) (Huang <i>et al.</i> , 2007).	25

Figura 24 – Formas para elementos MED: a) partículas com dois diâmetros; b) <i>Clump</i> formado por duas partículas; c) <i>Clump</i> formado por três partículas; d) <i>Clump</i> formado por quatro partículas (Ferreira, 2012).....	26
Figura 25 - Idealização do arranjo dos fragmentos de um elemento cuja tensão de rotura foi ultrapassada (Lobo-Guerrero e Vallejo, 2005, adaptado)	26
Figura 26 – Detalhe das partículas de balastro depois de terem sido aplicados 200 ciclos de carga (Lobo-Guerrero e Vallejo, 2006, adaptado)	27
Figura 27 - Geração de <i>clumps</i> : a) direções de propagação de partículas; b) propagação de partículas segundo uma direção (Lu e McDowell, 2007).	27
Figura 28 – Partícula de balastro (à esquerda) e os seus modelos de <i>clumps</i> , onde o número de partículas do elemento decresce da esquerda para a direita (Baghsorkhi <i>et al.</i> , 2014).	28
Figura 29 - Ensaio: a) caixa de teste; b) simulação com esferas; c) simulação com <i>clumps</i> (Lu e McDowell, 2007).	28
Figura 30 - Forças de contacto entre elementos: a) simulação com esferas; b) simulação com <i>clumps</i> (Lu e McDowell, 2007).	29
Figura 31 - Vetores de deslocamento dos elementos: a) simulação com esferas; b) simulação com <i>clumps</i> (Lu e McDowell, 2007).	29
Figura 32 - Resposta dos modelos à carga cíclica, sendo que o teste A corresponde à simulação com esferas e o teste B à simulação com <i>clumps</i> (Lu e McDowell, 2007).	29
Figura 33 - Exemplos de modelos de partículas de balastro poliédricas (Azéma, 2007).	30
Figura 34 – Sistema AIMS (Al-Rousan <i>et al.</i> , 2005).	31
Figura 35 – Gráfico para classificação do agregado (Al-Rousan <i>et al.</i> , 2005, adaptada).	32
Figura 36 – Digitalizações das amostras de agregados numa vista axonométrica em 3D (Anochie-Boateng <i>et al.</i> , 2011).	33
Figura 37 – Processo de modelação de balastro em DEM (Tutumluer <i>et al.</i> , 2013, adaptado).	34
Figura 38 - Equipamento UI-AIA de segunda geração (Moaveni <i>et al.</i> , 2014).	34
Figura 39 - <i>Scanner Roland Modela MDX 20</i> do FabLab.	36
Figura 40 - Moldes de plasticina: a) encaixe de negativos da pedra I; b) negativos da pedra I – vista 1; c) pedra I e pormenor da impressão da forma nos moldes; d) Negativos da pedra I – vista 2; e) encaixe de negativos da pedra II; f) negativos da pedra II – vista 1; g) pedra II e pormenor da impressão da forma nos moldes; h) negativos da pedra II – vista 2.....	37
Figura 41 - Preparação da caixa de madeira para os moldes de gesso: a) lubrificação da caixa de madeira com óleo; b) pedra MA inserida em base de areia; c) pedra MP inserida em base de plasticina.	38
Figura 42 - Preparação do gesso e enchimento das caixas de madeira: a) colocação do gesso em pó na água; b) mistura do gesso com água; c) Enchimento da caixa com base de plasticina; d) Enchimento da caixa com base de areia; e) caixas com gesso líquido.	39

Figura 43 - Negativo de gesso da pedra MP: a) Desmontagem da caixa da pedra MP; b) Negativo em gesso da pedra MP e base de plasticina; c) Pedra MP sobre negativo de gesso; d) Pormenor da impressão da pedra MP no gesso.	40
Figura 44 - Negativo de gesso da pedra MA: a) desmontagem da caixa da pedra MA; b) negativo e pedra MA; c) pormenor do negativo quando se retirou a pedra MA - vista 1; d) pormenor do negativo quando se retirou a pedra MA – vista 2.	40
Figura 45 - Negativos de plasticina no <i>Roland Modela MDX 20</i> : a) negativos na mesa de trabalho do <i>Roland Modela MDX 20</i> ; b) pormenor da agulha do <i>scanner</i> – vista 1; c) pormenor da agulha do <i>scanner</i> – vista 2.	41
Figura 46 - Resultado da digitalização com <i>Roland Modela MDX 20</i> – Imagens obtida no <i>Dr. Picza</i> : a) vista 1; b) vista 2.....	42
Figura 47 - Negativos da pedra I e II – Imagem adaptada do <i>Meshmixer</i>	43
Figura 48 - Encaixe das pedras I e II – Imagens obtida pelo <i>Rhinoceros</i> : a) encaixe da pedra I; b) encaixe da pedra II.	44
Figura 49 – Forma da pedra I – Imagens obtida pelo <i>Rhinoceros</i> : a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3.....	44
Figura 50 – Forma pedra II – Imagens obtida pelo <i>Rhinoceros</i> : a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3.....	45
Figura 51 - Equipamento <i>EXAscan</i> da <i>Creaform</i> (<i>Creaform</i> , 2014).	46
Figura 52 – Formato da pedra grande – Imagens obtida pelo <i>3DReshaper</i> : a) imagem da pedra grande; b) pedra grande na mesa de alvos criada pela <i>GEOTRILHO</i> ; c) pormenor da malha da pedra grande.	47
Figura 53 – Impressão da réplica da pedra grande: a) impressora 3D <i>MakerBot</i> ; b) impressão com <i>PLA</i>	48
Figura 54 – Comparação da réplica da pedra grande e comparação com a original: a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3.	48
Figura 55 – Pedra média e a variação do pormenor com a resolução de digitalização – Imagens digitais obtidas no <i>3DReshaper</i> : a) pedra média; b) resolução de 0,2 mm.; c) resolução de 0,5 mm; d) resolução de 1,0 mm.....	49
Figura 56 - Pedra média depois da erosão e mapa de cores que quantifica a erosão sofrida - Imagens digitais obtidas pelo <i>3DReshaper</i> : a) vista 1; b) vista 2.	50
Figura 57 – Furação das pedras e pedestal com base de <i>PVC</i> : a) Engenho de furação; b) Pedra média no pedestal com base de <i>PVC</i> ; c) Furação de uma pedra; d) Furo feito na pedra média.	51
Figura 58 - Digitalização com pedestal de <i>PVC</i> : a) pormenor do biombo de alvos; b) digitalização da pedra média; c) pormenor da imagem gerada durante a digitalização.....	52
Figura 59 – Comparação da forma da pedra média para a digitalização por fases e digitalização com o auxílio do pedestal – Imagens obtidas pelo <i>3DReshaper</i> : a) digitalização por fases e pormenor da malha de triângulos reduzida; b) digitalização com o auxílio do pedestal e pormenor da malha de triângulos reduzida.	52
Figura 60 - Furo das pedras I e II: a) furo da pedra I; b) pedra I no pedestal de <i>PVC</i> – vista de cima; c) furo da pedra II; d) pedra II no pedestal de acrílico – vista de frente.....	53
Figura 61 – Forma da pedra I – Imagens obtida pelo <i>3DReshaper</i> : a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3....	54

Figura 62 – Forma da pedra II – Imagens obtidas pelo <i>3DReshaper</i> : a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3.	54
Figura 63 - Diferentes vistas das pedras I e II: a) pedra I - vista 1; b) pedra I - vista 2; c) pedra II - vista 1; d) pedra II - vista 2.	55
Figura 64 - Pedra I: comparação da forma e volume obtidos no FabLab e na <i>GEOTRILHO</i> - Imagem obtida pelo <i>Rhinoceros</i> .	56
Figura 65 – Comparação da pedra I - Imagens obtida pelo <i>Rhinoceros</i> : a vermelho a pedra obtida no FabLab e a azul a obtida na <i>GEOTRILHO</i> : a) vista inferior; b) vista superior; c) vista de lado.	56
Figura 66 - Pedra II: comparação da forma e volume obtidos no FabLab e na <i>GEOTRILHO</i> - Imagem obtida pelo <i>Rhinoceros</i> .	56
Figura 67 - Comparação da pedra II - Imagens obtida pelo <i>Rhinoceros</i> : a vermelho a pedra obtida no FabLab e a azul a obtida na <i>GEOTRILHO</i> : a) vista superior; b) Vista inferior; c) vista de trás.	57
Figura 68 - Mapa de cores para comparação da pedra I – Imagem obtida pelo <i>GOM Inspect</i> : a) vista inferior; b) vista superior; c) vista de lado.	57
Figura 69 - Mapa de cores para comparação da pedra II – Imagem obtida pelo <i>GOM Inspect</i> : a) vista superior; b) vista inferior; c) vista de trás.	58
Figura 70 - Peneiração da amostra.	61
Figura 71 - Curva granulométrica da amostra de balastro.	62
Figura 72 - Pedras de "a" a "j" e de "1" a "10".	63
Figura 73 - Instrumentos de medição utilizados: a) proveta com precisão de 5 cm ³ ; b) balança com precisão de 0,01 g.	63
Figura 74 - Determinação da forma da pedra 2 com paquímetro.	64
Figura 75 - Pedras e modelos obtidos no <i>3DReshaper</i> : a) pedra e modelo "I"; b) pedra e modelo "II".	64
Figura 76 – Pedras e modelos obtidos no <i>3DReshaper</i> de "a" a "j": a) pedra e modelo "a"; b) pedra e modelo "c"; c) pedra e modelo "d"; d) pedra e modelo "e"; e) pedra e modelo "f"; f) pedra e modelo "g"; g) pedra e modelo "h"; h) pedra e modelo "i"; i) pedra e modelo "j".	65
Figura 77 - Pedras e modelos obtidos no <i>3DReshaper</i> de "1" a "10": a) pedra e modelo "1"; b) pedra e modelo "2"; c) pedra e modelo "3"; d) pedra e modelo "4"; e) pedra e modelo "5"; f) pedra e modelo "6"; g) pedra e modelo "7"; h) pedra e modelo "8"; i) pedra e modelo "9"; j) pedra e modelo "10".	66
Figura 78 - Paleta de cores de plasticina para identificação das partículas selecionadas.	68
Figura 79 - Distribuição das partículas pelos ensaios de resistência mecânica: a) <i>Los Angeles</i> : 2, 3, 4, 5, 6, 7, d, e, j, l e II; b) <i>Micro-Deval</i> : 1, 8, 9, 10, a, c, f, g, h e i.	68
Figura 80 - Amostra de balastro e esferas de aço dentro do tambor rotativo da Máquina de <i>Los Angeles</i> no início do ensaio.	69
Figura 81 - Amostras de balastro no final dos ensaios: a) amostra do ensaio de <i>Los Angeles</i> ; b) amostra do ensaio de <i>Micro-Deval</i> .	69
Figura 82 – Pormenor das partículas depois do ensaio de <i>Los Angeles</i> : a) partícula "5"; b) partícula "d"; c) partícula "e".	70

Figura 83 – Amostra e partículas selecionadas depois dos ensaios: a) <i>Los Angeles</i> ; b) <i>Micro-Deval</i> .	70
Figura 84 - Pedras e modelos obtidos no <i>3DReshaper</i> de "a" a "j" e "l": a) pedra e modelo "a"; b) pedra e modelo "c"; c) pedra e modelo "f"; d) pedra e modelo "g"; e) pedra e modelo "h"; f) pedra e modelo "g"; g) pedra e modelo "i"; h) pedra e modelo "l".	71
Figura 85- Pedras e modelos obtidos no <i>3DReshaper</i> de "1" a "10": a) modelo e pedra "1"; b) modelo e pedra "2"; c) modelo e pedra "3"; d) modelo e pedra "4"; e) modelo e pedra "6"; f) modelo e pedra "7"; g) modelo e pedra "8"; h) modelo e pedra "9"; i) modelo e pedra "10".	72
Figura 86 - Relação entre a variação da massa e a variação do volume digital.	76
Figura 87 - Relação entre a variação do volume real e a variação do volume digital.	76
Figura 88 - Relação entre a variação do volume real e a variação da massa.	76
Figura 89 - Relação entre as grandezas e a forma das partículas: a) $\Delta V_{\text{digital}}$ e partículas cúbicas; b) $\Delta V_{\text{digital}}$ e partículas não cúbicas; c) ΔM e partículas cúbicas; d) ΔM e partículas não cúbicas.	77
Figura 90 - Relação entre as grandezas e o achatamento das partículas: a) $\Delta V_{\text{digital}}$ e partículas não achatadas; b) $\Delta V_{\text{digital}}$ e partículas achatadas; c) ΔM e partículas não achatadas; d) ΔM e partículas achatadas.	78
Figura 91 - Relação entre as grandezas e os ensaios de resistência mecânica: a) $\Delta V_{\text{digital}}$ e M_{DE} ; b) $\Delta V_{\text{digital}}$ e LA ; c) ΔM e M_{DE} ; d) ΔM e LA .	79
Figura 92 - Diferença entre a partícula antes e depois dos ensaios de resistência mecânica – Imagem obtida no <i>3DReshaper</i> .	80
Figura 93 – Comparação das malhas antes e depois dos ensaios de desgaste – Imagens obtidas no software <i>GOM Inspect</i> : a) pedra "1"; b) pedra "2"; c) pedra "3"; d) pedra "4"; e) pedra "6"; f) pedra "7".	81
Figura 94 - Comparação das malhas antes e depois dos ensaios de desgaste – Imagens obtidas no software <i>GOM Inspect</i> : a) pedra "8"; b) pedra "9"; c) pedra "10"; d) pedra "a"; e) pedra "c"; f) pedra "f".	82
Figura 95 - Comparação das malhas antes e depois dos ensaios de desgaste – Imagens obtidas no software <i>GOM Inspect</i> : a) pedra "g"; b) pedra "h"; c) pedra "i"; d) pedra "j"; e) pedra "l".	83
Figura 96 - Determinação de I , correspondente à maior dimensão segundo y (neste caso).	85
Figura 97 - Determinação de S , correspondente à maior dimensão segundo x (neste caso).	85
Figura 98 - Relação entre o volume das partículas e a razão de achatamento.	88
Figura 99 - Relação entre o volume das partículas e a razão de alongamento.	89
Figura 100 - Relação entre o volume das partículas e a esfericidade.	89

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Categorias de balastro relativamente ao estado de contaminação.....	9
Quadro 2 - Resumo das características técnicas que implicam aceitação sem restrições e rejeição do balastro (IT.GEO.001, 2008).	18
Quadro 3 – Resumo das características dos dois processos de digitalização.	59
Quadro 4 - Características das partículas selecionadas.	67
Quadro 5 - Características das partículas selecionadas depois dos ensaios de resistência mecânica.	73
Quadro 6 – Comparação da forma e achatamento antes e depois dos ensaios de resistência mecânica.	74
Quadro 7 - Comparação do volume e massa das partículas para os ensaios de resistência mecânica.	75
Quadro 8 - Erosão provocada pelo ensaio de <i>Los Angeles</i>	84
Quadro 9 - Erosão provocada pelo ensaio de <i>Micro-Deval</i>	84
Quadro 10 - Dimensões das partículas (mm).	86
Quadro 11 - Razão de achatamento, razão de alongamento, fator de forma e esfericidade.....	87
Quadro 12 - Classificação das partículas.	90

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

a – Eixo maior da elipsoide;

b - Eixo menor da elipsoide;

c - Eixo menor da elipsoide;

E – Forma elipsoidal;

F – Fator de forma;

FI – Índice de achatamento;

F_I – Índice de contaminação;

F_n – Forças normal de contacto;

F_s – Forças tangencial de contacto;

Kn – Rigidez normal de ligação por contacto;

Ks – Rigidez tangencial de ligação por contacto;

I – Eixo intermédio da partícula;

L – Eixo maior da partícula;

LA – Coeficiente de *Los Angeles*;

M_{DE} – Coeficiente de *Micro-Deval*;

p – razão de achatamento;

P_4 – Peneiro N° 4;

P_{200} – Peneiro N° 200;

q – razão de alongamento;

R^2 – Coeficiente de correlação linear;

S - Eixo menor da partícula;

S_e – Superfície da elipsoide;

SI – Índice de forma;

S_o – Superfície da partícula;

V – volume da partícula;

θ – Ângulo de atrito;

Ψ – Esfericidade.

FabLab – *Fabrication Laboratory*;

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

MatLab – *Software Matrix Laboratory*;

MED – Método dos elementos discretos;

MEF – Método dos elementos finitos;

ORE - *Office de Recherches et d'Essais de l'Union Internationale des Chemins de Fer*;

REFER – Rede Ferroviária Nacional.

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O presente trabalho está inserido no âmbito do estudo da via-férrea balastrada, nomeadamente ao nível do balastro ferroviário, por se tratar de um componente que condiciona severamente o desempenho da via. Apesar da sua longa utilização como elemento estrutural nos caminhos-de-ferro, o balastro, quando sujeito ao tráfego ferroviário, apresenta um comportamento não-linear difícil de prever de forma rigorosa. Com a implementação de velocidades mais elevadas nas vias-férreas, importa explorar o comportamento desta camada, uma vez que problemas no seu desempenho levam a frequentes operações de manutenção e reabilitação da linha, exigindo uma quantidade de recursos elevada. O desempenho da via depende de uma drenagem eficiente, estabilidade, amortecimento, apoio uniforme dos carris e da adequada distribuição das cargas, funções que estão associadas ao balastro.

A camada de balastro é composta por partículas angulares de elevada resistência provenientes de rochas “duras”. As suas características físicas e mecânicas aliadas às que adquire “in situ” influenciam significativamente o comportamento e a durabilidade da via. Para que tenha um bom desempenho, o material deve estar “limpo” de partículas finas, mantendo uma estrutura quase monogranular. No entanto, com o tempo as partículas sofrem desgaste e fragmentação, degradando a camada de balastro. A resistência mecânica das partículas a estes fenómenos é simulada em laboratório pelos ensaios de *Los Angeles* e *Micro-Deval*. Apesar de não existir um consenso universal acerca das características e seus valores que levam a uma melhor performance desta camada, em território nacional são utilizadas normas europeias e instruções técnicas da Rede Ferroviária Nacional - REFER, EPE que estipula limites para as características que considera relevantes. Há, no entanto, características que têm vindo ser estudadas, nomeadamente no que concerne à geometria da partícula, para que se possa relacionar a forma e o tamanho desta com o seu comportamento.

Atualmente a via-férrea pode ser modelada segundo vários métodos, contínuos e descontínuos. Nos métodos contínuos destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) e nos métodos descontínuos o Método dos Elementos Discretos (MED). No entanto, como a camada de balastro é constituída por um conjunto de partículas em interação umas com as outras, o MED mostra-se uma solução mais adequada. Os elementos representativos do meio em análise podem ser definidos por partículas esféricas/circulares ou por conjuntos agregados destas, *clumps* ou por partículas poliédricas. Uma vez que a forma das partículas de balastro influencia o seu desempenho na via, importa que os elementos aproximem a forma destas de modo a simular melhor a realidade. Assim, neste trabalho pretende-se fazer uma recolha das diferentes formas que o balastro ferroviário pode assumir, compilando-se a informação numa biblioteca digital de pedras. Posteriormente os ficheiros podem servir de base à criação de elementos discretos na modelação de balastro.

Para além disso, pretende-se avaliar se os modelos digitais permitem aferir a forma como ocorre a degradação das partículas, em função das suas características geométricas, quando sujeitas a ensaios de desgaste e de fragmentação.

1.2. OBJETIVOS

Neste trabalho pretende-se captar a forma de partículas de balastro provenientes duma pedreira acreditada pela REFER.

O primeiro objetivo comporta o estudo de metodologias que permitam captar tridimensionalmente a forma do balastro tendo em conta o seu tamanho, as suas irregularidades e as características que interessam para modelar os elementos discretos.

O objetivo seguinte resume-se a captar a forma das partículas, com a metodologia de digitalização escolhida, antes e depois de ensaios de resistência mecânica. Assim, as partículas cuja forma é determinada antes dos ensaios podem ser utilizadas na modelação de vias recentes ou a construir, e as captadas após os ensaios, na modelação de vias com um determinado tempo de serviço.

O terceiro objetivo consiste em verificar se, mediante a geometria das partículas, se pode estabelecer um padrão para a erosão das mesmas, sendo para isso importante a utilização de programas que permitam a comparação de malhas digitais antes e depois das partículas terem sido sujeitas aos ensaios.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente documento consta de cinco capítulos, dos quais esta introdução é o primeiro.

O capítulo 2, *Balastro na via-férrea*, está relacionado com o conceito de balastro ferroviário, sendo mencionadas a sua utilidade e funções na via, tal como os fatores que influenciam o seu comportamento e a degradação e contaminação da camada de balastro. Faz-se também alusão à caracterização das partículas segundo a norma da REFER e as normas europeias, mas também a parâmetros que têm vindo a ser propostos para a caracterização geométrica das mesmas. E, por fim, descrevem-se formas de modelar a via-férrea e de captar a forma das partículas, fazendo-se um breve apanhado dos trabalhos existentes que abordam este assunto.

O capítulo 3, *Métodos de digitalização tridimensional das partículas de balastro*, aborda os dois métodos estudados: digitalização por contacto e por laser. Os métodos são comparados em termos de resolução, preparação da digitalização, necessidade de artefactos que auxiliem no processo, tempo de digitalização, tempo de manipulação dos ficheiros resultantes e das especificidades de cada um.

O capítulo 4, *Modelos das partículas de balastro*, faz referência à amostra de balastro utilizada na modelação, sendo verificada a sua granulometria, índice de forma e índice de achatamento. Menciona também a caracterização das partículas que foram seleccionadas para integrar a biblioteca digital de pedras e os seus modelos. Descreve os ensaios de resistência mecânica e apresenta a nova modelação das partículas após o ensaio. Por fim, são comparadas as partículas antes e depois dos ensaios, tentando encontrar um padrão para a erosão das diferentes pedras.

No capítulo 5, *Conclusões e desenvolvimentos futuros*, resumem-se as principais conclusões da dissertação. Referem-se ainda algumas linhas de orientação para futuros trabalhos que possam ser efetuados no âmbito deste assunto, para um melhor conhecimento e desenvolvimento do tema.

No final do documento encontram-se anexos com informação relevante acerca deste estudo.

2

BALASTRO NA VIA-FÉRREA

O balastro ferroviário é um agregado selecionado sobre o qual assentam as travessas da via-férrea, como apresentado esquematicamente na Figura 1. Normalmente o balastro constitui uma camada com 0,25 a 0,30 m de espessura.

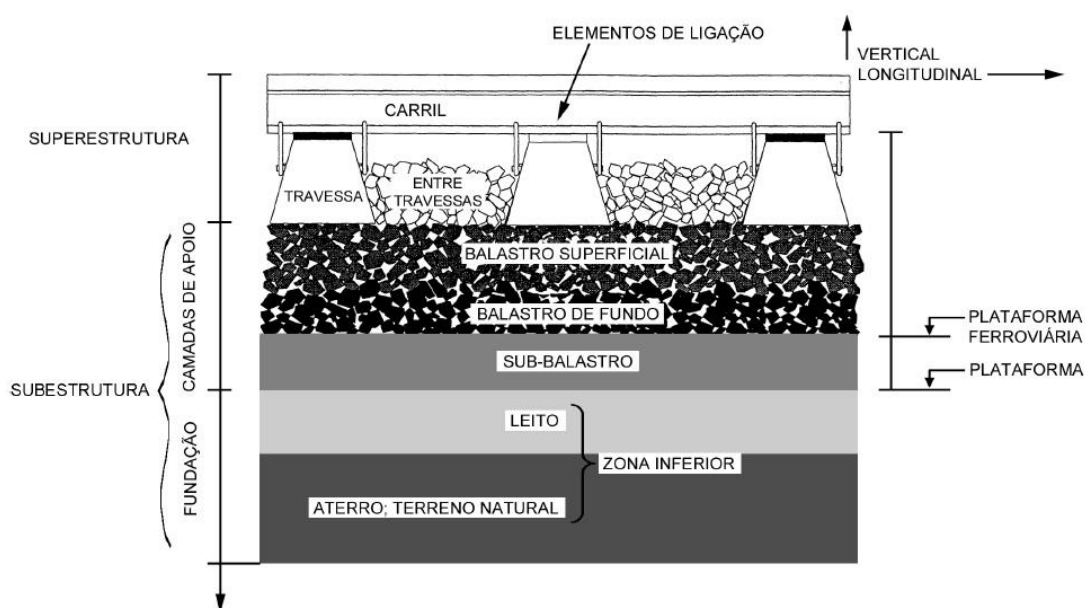


Figura 1 - Esquema estrutural da via balastrada - perfil longitudinal (Fortunato, 2005, adaptado).

Tradicionalmente, o balastro é obtido a partir de rochas duras e sãs com origem magmática ou metamórfica, criando partículas angulares de elevada resistência ao desgaste, ao esmagamento, ao choque e ainda à ação de agentes atmosféricos. O tipo de rocha passível de ser utilizado como balastro ferroviário varia entre países, dependendo sobretudo da sua qualidade, fatores ambientais e económicos. Deste modo são comuns balastros de granitos, gabros, dioritos, doleritos, basaltos e quartzitos, entre outros. Alguns países admitem ainda o uso de rochas sedimentares como o calcário, no entanto a sua utilização é interdita em Portugal.

O balastro até agora referido é considerado natural por ser de origem mineral, tendo apenas sofrido processos mecânicos. Contudo, hoje em dia já existem tentativas de produzir balastro artificial e reciclado. O primeiro é igualmente de origem mineral mas algumas das suas características foram modificadas através de processos industriais. Já o segundo trata-se de balastro que já foi empregue na via-férrea, mas que foi retirado e submetido a algumas alterações de modo a se tornar novamente utilizável.

Outrora, era comum associar o desempenho da via-férrea apenas à superestrutura, negligenciando o que acontecia ao nível da subestrutura. Assim, o dimensionamento desta parte estrutural baseava-se sobretudo em métodos empíricos e as soluções adotadas de acordo com a experiência adquirida. Entretanto, os técnicos ligados aos caminhos-de-ferro entenderam que os aspetos relacionados com a subestrutura assumiam um papel importante nos custos de conservação e reabilitação da via. Deste modo e face às exigências atuais derivadas sobretudo do aumento da velocidade de circulação dos comboios, tem sido necessário equacionar os problemas relacionados com a subestrutura de um modo mais científico, com o intuito de melhorar o desempenho estrutural, otimizar a utilização de recursos financeiros e o tempo de execução dos empreendimentos.

Assim, constatou-se que a camada de balastro desempenha um papel fundamental, uma vez que contribui para a estabilidade vertical e horizontal da via. O imbricamento das partículas, tal como o atrito que se desenvolve entre estas e as travessas, são responsáveis pela resistência às forças horizontais (laterais e longitudinais em relação à via), enquanto as forças verticais são transferidas às camadas inferiores através dos contactos das partículas de balastro. Importa também referir que as características da superestrutura da via, o tipo e frequência dos trabalhos de conservação e as próprias solicitações impostas pelo material circulante podem condicionar o comportamento da camada de balastro (Fortunato, 2005).

As severas condições de utilização a que o balastro é sujeito têm levado a que as características das partículas, tais como tamanho, forma, dureza e resistência ao desgaste, sejam discutidas. Em Fortunato (2005) é referido que segundo Selig *et al.* (1982), o volume e as características do tráfego, o tipo e a frequência das intervenções de conservação e a reabilitação e renovação do balastro (que é feita normalmente após 15 a 20 anos), têm um papel fundamental na evolução do estado físico das partículas de balastro. Deste modo, o uso de um material de elevada qualidade na camada de balastro atenua o seu desgaste e consequentemente o das travessas, uma vez que, como será abordado mais à frente, as partículas resultantes do desgaste juntamente com água formam uma lama abrasiva. No entanto, muitas vezes são os fatores económicos e a disponibilidade dos materiais que acabam por determinar o material a usar na camada de balastro.

Entretanto, pela análise de diversos estudos realizados em trechos experimentais da via-férrea, conclui-se que ainda não se consegue prever de forma rigorosa o mecanismo de degradação da camada de balastro (Fortunato, 2005).

A camada de balastro pode ser subdividida em quatro zonas, como representado na Figura 2 seguidamente descrito (Selig e Waters, 1994):

- Balastro entre as travessas;
- Prisma lateral, que se situa no topo das travessas;
- Balastro superficial, que constitui a subcamada superior da camada de balastro que é afetada diretamente durante as ações mecânicas de conservação;
- Balastro de fundo, que constitui a subcamada inferior, geralmente não afetada pelas operações mecânicas de conservação e onde o material já se encontra com uma granulometria relativamente distinta da inicial.

De seguida resumem-se as principais vantagens e desvantagens da utilização da via-férrea balastrada (Indraratna *et al.*, 2011):

- Custo de construção relativamente baixo;
- Facilidade em realizar operações de manutenção da via e tempo de manutenção reduzido;
- Projeto e construção acessíveis;

- Degradação progressiva da via exige operações frequentes de manutenção e verificação da via, aumentando o investimento a longo prazo;
- Projecção de partículas do balastro resultantes da circulação de comboios de alta velocidade;
- Peso próprio associado à existência da camada sobre as estruturas que existem ao longo da via.

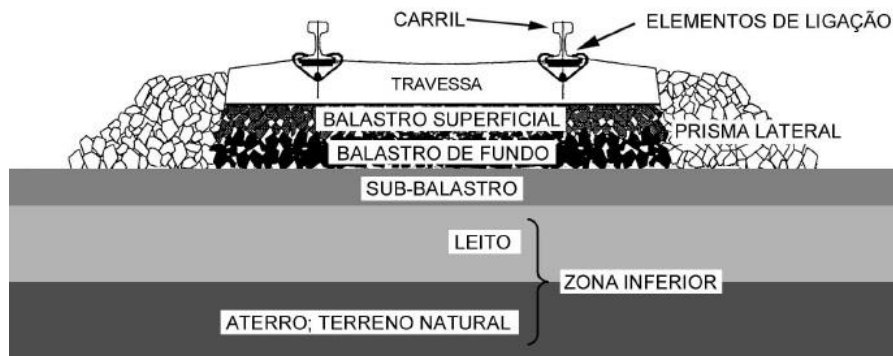


Figura 2 - Esquema estrutural da via balastrada - perfil transversal (Fortunato, 2005, adaptado).

2.1. UTILIZAÇÃO DO BALASTRO NA VIA-FÉRREA

A utilização da camada de balastro é justificada pelas funções que desempenha na via-férrea, sendo que estas dependem das diferentes propriedades do agregado e do seu comportamento na via. No entanto, a alteração das suas propriedades ao longo do tempo, como já foi referido, pode comprometer o seu funcionamento e levar a alguns problemas que serão abordados mais adiante neste subcapítulo.

2.1.1. FUNÇÕES DO BALASTRO NA VIA-FÉRREA

Idealmente, o balastro desempenha diversas funções na via-férrea, podendo enumerar-se as seguintes (Selig e Waters, 1994):

- Constitui uma plataforma de suporte das travessas e reduz a tensão transmitida às camadas subjacentes a um valor aceitável uniformizando também a transferência, como está esquematizado na Figura 3;
- Fomenta a estabilidade das travessas opondo-se a forças verticais, longitudinais e laterais geradas pela circulação dos comboios, permitindo que a linha se mantenha na sua posição inicial;
- Absorve parte da energia transmitida à via e possibilita que esta obtenha elasticidade e resiliência dinâmica;
- Simplifica operações de manutenção da via, pois as partículas de balastro rearranjam-se facilmente por compactação;
- Devido à elevada permeabilidade, permite drenar rapidamente a água que cai na via e escoar o material poluente proveniente da circulação;
- Tem resistência suficiente ao esmagamento e degradação, quer por atrito, acção bio-química, mecânica ou atmosférica;
- Inibe o crescimento de vegetação, reduzindo a formação de lamias;
- Absorve ruído;

- Previne eventuais problemas que possam advir do gelo, por ser um material que não congela, servindo de camada protectora às subjacentes;

Destaca-se que algumas destas funções exigem da camada de balastro comportamentos contraditórios. Por exemplo, de forma a fomentar a estabilidade da camada, esta deve ser bem graduada permitindo uma compactidade maior. Em contrapartida, neste cenário a permeabilidade decresce, podendo tornar-se insuficiente para promover o escoamento da água da chuva e do material poluente que cai na via, para além de que dificulta os trabalhos de manutenção. Deste modo, aceita-se que a camada seja constituída por partículas monogranulares de grandes dimensões (inferiores a 63 mm) (Fortunato, 2005).

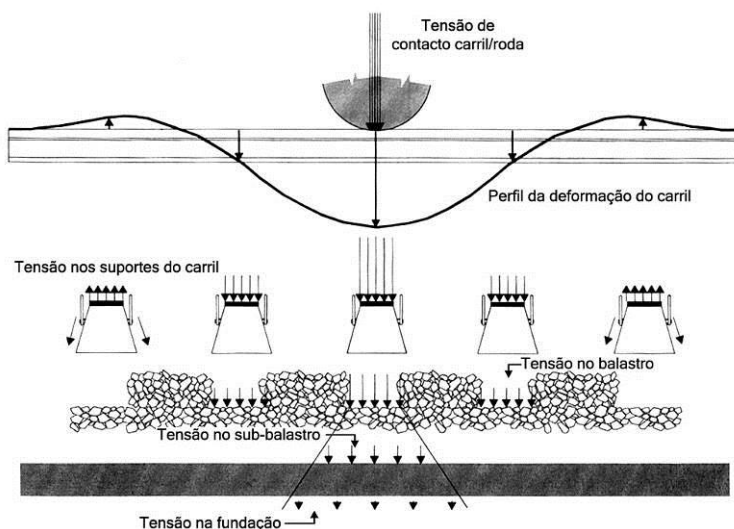


Figura 3 - Tensões devido às forças verticais nos elementos da via (Fortunato, 2005, adaptado).

2.1.2. FATORES QUE CONDICIONAM O COMPORTAMENTO DO BALASTRO NA VIA-FÉRREA

Existe ainda dificuldade em perceber os mecanismos de degradação do balastro e as deformações plásticas que lhe estão associadas. Esta falta de entendimento traduz-se no uso de modelos empíricos simplificados no dimensionamento da estrutura, que resulta em soluções tecnologicamente inadequadas, acabando, muitas vezes, por ser necessário levar a cabo operações de manutenção frequentes. De modo a reduzir os custos inerentes a estas operações, é imprescindível compreender os problemas predominantes da via-férrea, percebendo a sua causa e o seu efeito (Indraratna *et al.*, 2011).

O comportamento da camada de balastro é condicionado por propriedades mecânicas, como a resistência e deformabilidade, e propriedades hidráulicas, das quais se salienta a permeabilidade. Numa situação ideal, as propriedades da camada de balastro não se alterariam no tempo. As propriedades acima referidas resultam da conjugação das características intrínsecas do material e das adquiridas *in situ*. Como características intrínsecas destacam-se: o tamanho, a forma, a dureza, a durabilidade e a rugosidade das partículas. Já as adquiridas no local provêm da densidade resultante da compactação e também da espessura da camada.

Alguns autores defendem que o peso volúmico das partículas é também uma característica que influencia o comportamento do balastro, uma vez que está diretamente relacionado com a quantidade de água que o material consegue absorver. A capacidade de absorção é um indicador de porosidade, a qual está relacionada com a resistência das partículas e com a sua suscetibilidade ao gelo; a resistência diminui com a porosidade e a suscetibilidade ao gelo aumenta. Conclui-se deste modo que partículas com peso volúmico mais elevado são, à partida, mais resistentes (Fortunato, 2005).

Existem vários fatores que influenciam o grau de compactação do balastro na via-férrea, dos quais se pode enumerar (Fortunato, 2005): as características das camadas subjacentes; as características do próprio balastro; a superestrutura da via; os procedimentos de conservação; o tipo de tráfego; as características climáticas; e o tipo de compactação aplicada após a colocação do material, ou durante os trabalhos de conservação e reabilitação, sendo que estes últimos são considerados os fatores que mais afetam a compacidade da camada.

Atualmente, a compactação dinâmica do balastro assume um papel determinante pois aumenta a estabilidade e a resistência vertical e lateral da via, sendo a sua eficácia comprovada pela análise dos deslocamentos. Fortunato (2005) menciona que ORE em 1983 considera que o efeito da compactação dinâmica se assemelha à passagem de várias dezenas de milhares de toneladas brutas de tráfego, permitindo desde logo a passagem de comboios a uma maior velocidade após a construção ou reabilitação da via. A compactação dinâmica promove ainda uma distribuição mais uniforme das pressões debaixo das travessas e consequentemente das solicitações a que as partículas de balastro ficam sujeitas.

Nos dias que correm, os equipamentos existentes permitem uma compacidade mais elevada nas novas vias ou em operações de renovação. Entretanto, é também evidente que a circulação dos comboios fomenta a compactação ao longo do tempo. Contudo, apesar de o grau de compactação poder ser maior atualmente, é ainda difícil de quantificar. Segundo Fortunato (2005), Selig et al. em 1982 referem que o valor medido da compacidade relativa pode variar significativamente com o método utilizado. Têm sido sugeridos vários métodos para proceder a essa medição. Destaca-se o método da substituição do volume de balastro por água, onde um balão de borracha é preenchido até ocupar completamente o buraco feito no balastro (Hay, 1982). Segundo aquela publicação, Sunaga e Enomoto em 1994 fazem referência à utilização de métodos nucleares para medir a compacidade da camada de balastro, embora a existência de vazios no agregado faça com que os resultados não sejam satisfatórios. Segundo Fortunato (2005), é possível estimar o valor da compacidade através do valor de outras grandezas, como por exemplo a rigidez global da via. Essa rigidez pode ser determinada através da resposta da via, em termos de deflexão, à passagem de um veículo, ou mesmo através da determinação da resistência lateral da via. Este último parâmetro pode ser determinado por ensaios de deslocamento lateral de travessas, quer numa travessa individual quer num conjunto, sendo que o seu valor depende essencialmente do atrito que se desenvolve entre a superfície da travessa e as partículas de balastro. No entanto, o atrito disponível depende também do tipo, da geometria e do estado de conservação das travessas, assim como das características das partículas. Existem também relatos da determinação da rigidez através de ensaios de carga em placa realizados sobre a camada de balastro (Fortunato *et al.*, 2013).

No estudo da via-férrea constata-se ainda que quanto maior for a espessura da camada de balastro, menor será a tensão na plataforma, uma vez que as solicitações se degradam num espaço maior. Em contrapartida, foi verificado em diversos estudos que este aumento de espessura pode ser prejudicial devido à heterogeneidade de compactação em altura, e à perda de estabilidade da camada, o que aumenta as deformações totais e agrava as deformações diferenciais (Fortunato, 2005).

Como já foi referido anteriormente, o ideal seria que a camada de balastro não se deformasse ao longo do tempo, no entanto não é o que na realidade acontece, como se verifica na Figura 4. Parte da deformação advém da alteração granulométrica das partículas, que ocorre de forma gradual no tempo. Os fatores responsáveis por essa alteração são os seguintes:

- Ações mecânicas originadas pela construção ou trabalhos de manutenção da via e pela circulação dos comboios;
- Desgaste químico e mecânico associado ao meio ambiente;

- Contaminação com partículas finas, tanto provenientes da superfície como das camadas subjacentes ao balastro.

Deste modo, o balastro fica contaminado, perdendo consequentemente a sua granulometria monogranular e assim a capacidade de desempenhar adequadamente as funções de drenagem e resiliência (Selig e Waters, 1994). Para além disso, a quebra de arestas, o desgaste sucessivo e o esmagamento das partículas menos resistentes podem causar assentamentos diferenciais da estrutura e consequentes desníveis da superfície. Para que a velocidade de projeto, a segurança e o conforto dos passageiros sejam garantidas, é necessário recorrer a ações periódicas de manutenção (Indraratna *et al.*, 2011).

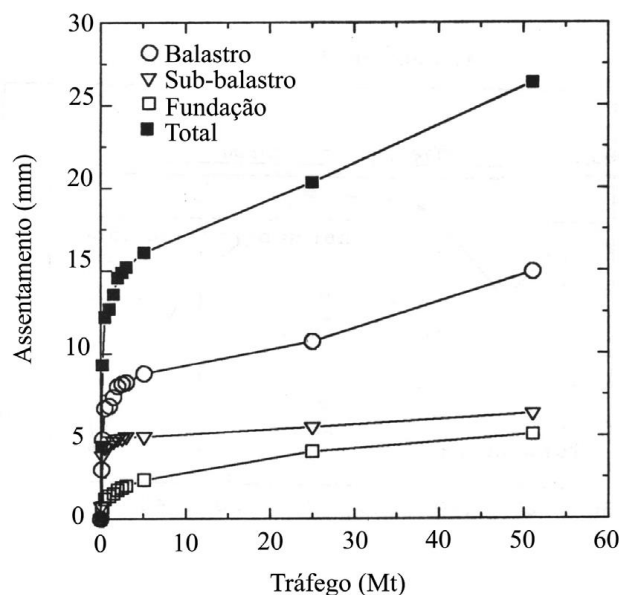


Figura 4 - Assentamentos permanentes devido à passagem dos comboios, observados numa via fundada num solo areno-siltoso (Fortunato, 2005, adaptado).

2.1.3. DEGRADAÇÃO E CONTAMINAÇÃO DO BALASTRO

A contaminação do balastro com finos é uma das principais causas de deterioração da via-férrea.

No que se refere à degradação das partículas da própria camada, os vértices e arestas do balastro partem com os elevados esforços que se desenvolvem nos pontos de contacto com as partículas adjacentes. Este mecanismo reduz as angularidades e consequentemente também o ângulo de atrito interno do balastro. Este processo é contínuo, e a fração fina resultante junta-se à proveniente da meteorização do balastro devida à agressividade do meio.

Moaveni *et al.* (2014), citando Tolppanen (2001), referem que os fatores mais importantes para a degradação do balastro são:

- as propriedades do material,
- a forma das partículas,
- a granulometria e arranjo iniciais das partículas;
- as forças concentradas na superfície das partículas;
- as operações de manutenção da camada de balastro e as condições ambientais do meio envolvente.

De modo a quantificar a contaminação da camada de balastro, foi proposto o índice de contaminação F_I (Selig e Waters, 1994):

$$F_I = P_4 + P_{200} \quad (1)$$

onde P_4 e P_{200} correspondem à percentagem de material passado no peneiro 4,75 mm (Nº 4) e 0,075 mm (Nº 200), respetivamente. Assim, foi sugerida uma classificação do balastro, consoante o seu índice de contaminação, representada no Quadro 1.

Quadro 1 - Categorias de balastro relativamente ao estado de contaminação.

Categoria de balastro	F_I
Limpo	<1
Moderadamente limpo	1 a 10
Moderadamente contaminado	10 a 20
Contaminado	20 a 40
Muito contaminado	≥ 40

A Figura 5 mostra a evolução granulométrica de balastro calcário com o aumento do número de rotações no ensaio de Los Angeles. Este ensaio, que será referido mais à frente, pretende avaliar a resistência à fragmentação do balastro. Como se pode concluir pela figura, a fração fina aumenta substancialmente com o aumento do número de rotações do ensaio.

As partículas finas geradas durante a fragmentação e desgaste da camada de balastro, são transportadas por gravidade até à parte inferior da camada, sendo o resultado semelhante ao observado em amostras recolhidas in situ num trecho de uma linha norte americana representadas na Figura 6.

Segundo Indraratna *et al.* (2011), Selig e DelloRusso (1991) referem que a quebra das partículas de balastro é a causa principal da sua contaminação.

No entanto, a contaminação pode também ocorrer pela intrusão de finos provenientes da camada subjacente, de detritos transportados pela água e pelo vento, e pelo derrame de mercadorias como carvão e outros minérios, como está representado na Figura 7.

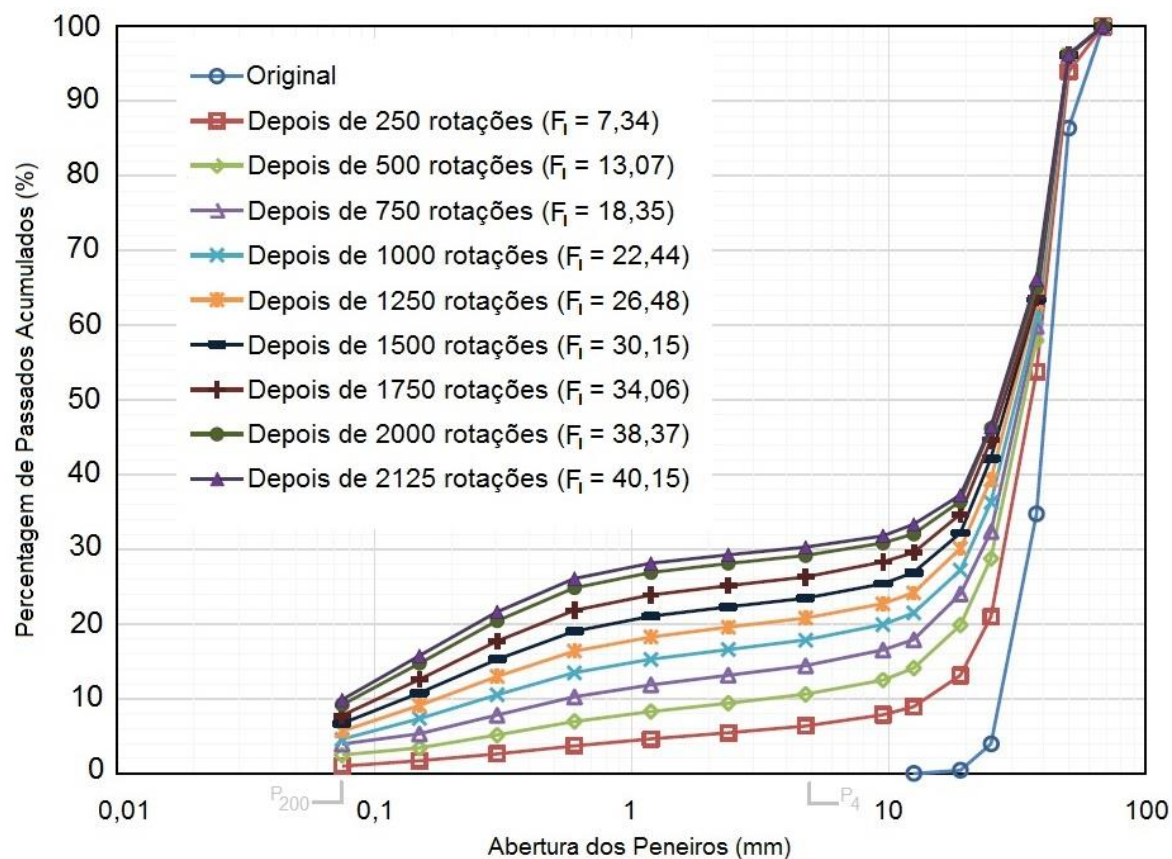


Figura 5 - Degradação de balastro granítico durante o ensaio de Los Angeles (Qian *et al.*, 2014, adaptado).



Figura 6 – Amostras de balastro recolhido à superfície, a cerca de 25,4 cm da superfície e a 40,6 cm da superfície (Moaveni *et al.*, 2014).

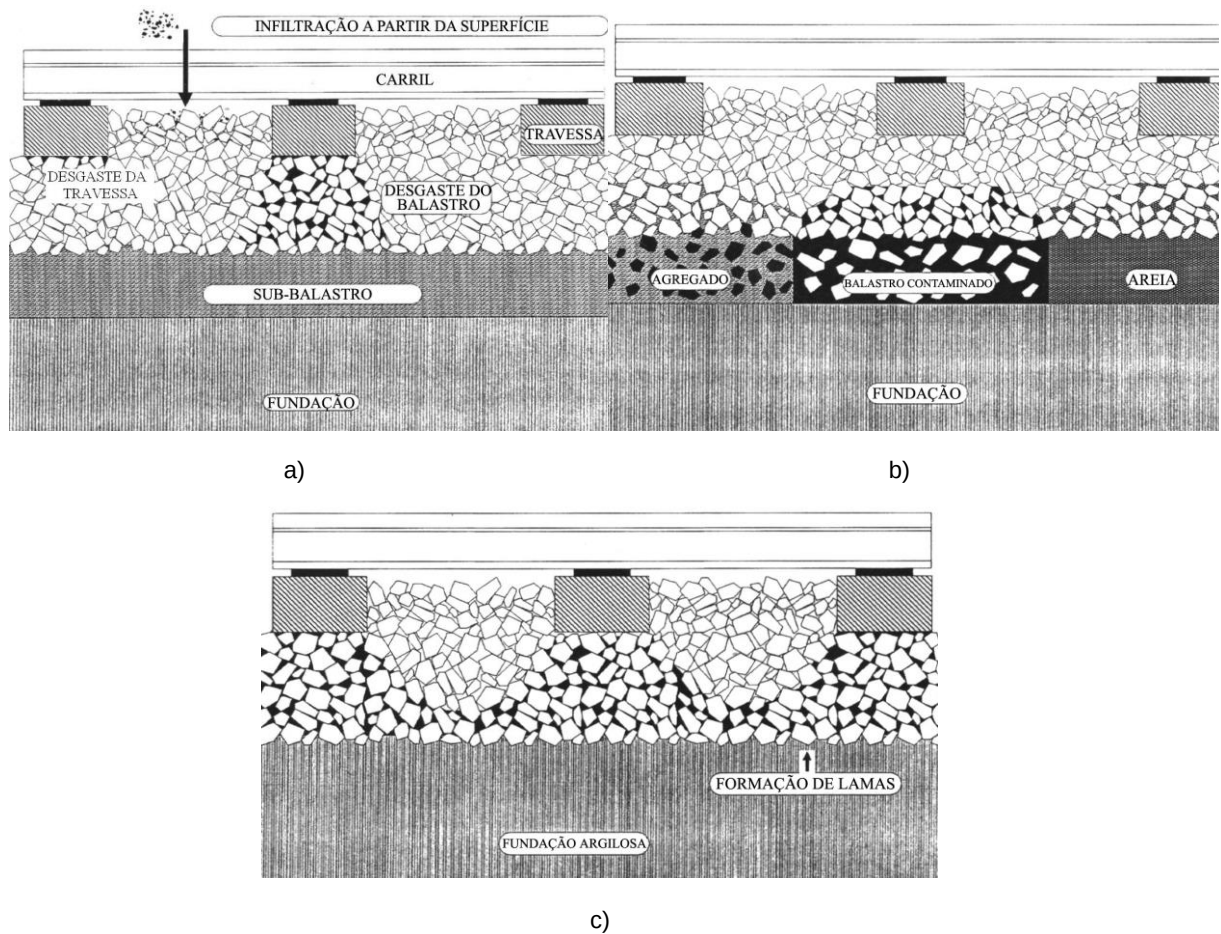


Figura 7 - Diferentes tipos de infiltração na camada de balastro: a) desgaste dos elementos da via e infiltração de materiais a partir da superfície; b) infiltração de materiais a partir das camadas granulares subjacentes ao balastro; c) infiltração de materiais a partir da fundação (Fortunato, 2005, adaptado).

A contaminação da camada de balastro tem como principais consequências (Indraratna *et al.*, 2011):

- Diminuição da resiliência da camada;
- Diminuição da permeabilidade da camada, devido à diminuição do índice de vazios (Figura 8);
- Assentamentos diferenciais e movimentos laterais da via;
- Formação de lamelas, na presença da água, que podem ser abrasivas (Figura 9).



Figura 8 – Acumulação de água à superfície causada por condições de drenagem insuficientes (Indraratna *et al.*, 2011).



Figura 9 - Bombagem de finos (Indraratna *et al.*, 2011).

As lamas que se formam e que se acumulam nos vazios debaixo das travessas podem ascender à superfície em forma de jato (fenómeno conhecido por “bombagem de finos”), devido a elevados gradientes hidráulicos originados pelas cargas resultantes dos comboios, que são aplicadas de forma relativamente rápida. Este mecanismo conduz ao desgaste tanto das travessas como do balastro envolvente. Além disso, os jatos de lama tendem a deslocar as partículas de balastro que envolvem as travessas, podendo culminar em assentamentos e em deslocamentos do plano da via.

No caso das travessas de betão, este processo pode levar a danos localizados, podendo mesmo expor a armadura de pré-esforço. Quando se trata de travessas de madeira, estas podem ser igualmente erodidas, no entanto o produto resultante destas últimas não alimenta o processo de degradação (Fortunato, 2005).

No que se refere à estabilidade lateral da via, ela pode também ser afetada pela degradação da camada de balastro. A encurvadura da via resultante deste processo pode ser observada na Figura 10. Na mesma figura constata-se que estas situações podem ser verificadas também em curva, onde as partículas de balastro deslizam pelo prisma lateral, diminuindo o confinamento da linha. Este problema pode ser reduzido pelo uso de geossintéticos (Indraratna *et al.*, 2011).

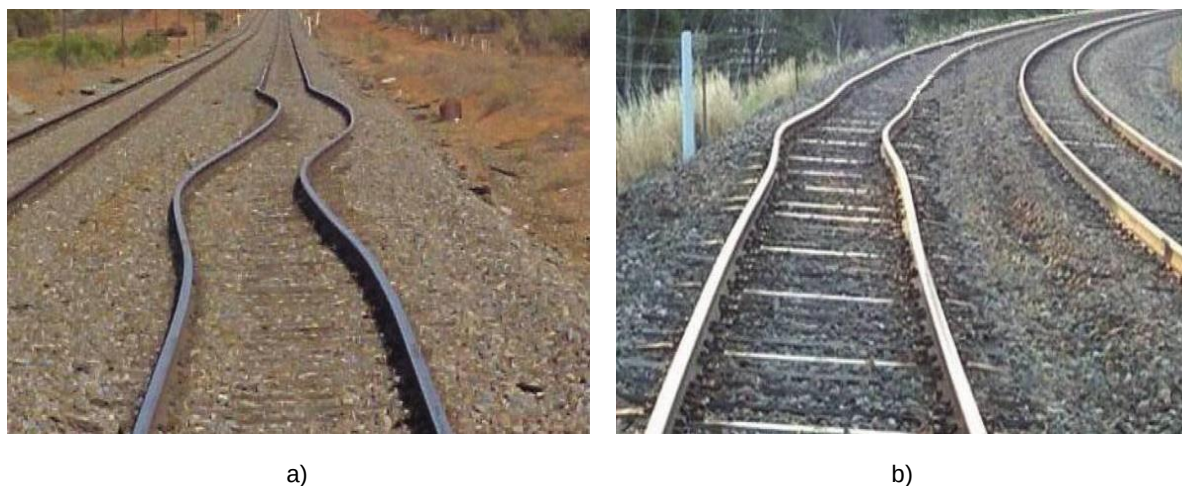


Figura 10 - Deslocamento lateral da via: a) em alinhamento reto; b) em curva (Indraratna *et al.*, 2011).

Deste modo, são necessárias operações de manutenção onde a camada de balastro contaminada é removida e substituída por balastro limpo ou quase limpo, para que se mantenham os requisitos de resiliência, a capacidade de carga, a permeabilidade e a geometria da via (Indraratna *et al.*, 2011).

2.2. CARACTERIZAÇÃO DO BALASTRO FERROVIÁRIO

Como já foi referido no subcapítulo 2.1, o balastro é um material selecionado com características particulares. Atualmente não existe um acordo universal que defina os índices que melhor especificam o balastro e que o levam a uma melhor performance, como: o tamanho, a forma, a resistência, a abrasividade e a composição (Selig e Waters, 1994). No entanto, foram criadas várias normas, entre as quais e a nível europeu, a EN 13450, onde se especificam as propriedades dos agregados para a via-férrea. A norma referida é utilizada a nível nacional e é complementada pela Instrução Técnica IT.GEO.001 da Rede Ferroviária Nacional (REFER), onde também se estabelecem critérios para a aceitação dos locais de extração de balastro.

Os agregados para balastro ferroviário são definidos segundo duas categorias (NP EN 13450, 2005):

- Balastro Tipo I: para os sistemas ferroviários de alta velocidade e velocidade alta;
- Balastro Tipo II: para a rede convencional¹.

Segundo os documentos acima citados, o balastro tem de obedecer a determinados valores para as seguintes características técnicas:

- resistência mecânica;
- características geométricas;

¹ Comboios de passageiros com velocidade inferior ou igual a 220 km/h e 20 t de carga por eixo; e comboios de mercadorias com velocidade inferior ou igual a 100 km/h e 25 t de carga por eixo.

- elementos prejudiciais.

2.2.1. RESISTÊNCIA MECÂNICA

Na avaliação da resistência mecânica do agregado são considerados pela norma NP EN 13450, os ensaios de *Los Angeles* e *Micro-Deval*.

2.2.1.1. Ensaio de *Los Angeles*

O ensaio de *Los Angeles* avalia a resistência à fragmentação do agregado. O balastro é colocado no cilindro rotativo da máquina de *Los Angeles*, semelhante à que consta na Figura 11, juntamente com 12 bolas de aço normalizadas. O cilindro executa o número de rotações estipulado pela norma e o contacto do agregado com as bolas de aço provoca fragmentação do balastro. O valor de *Los Angeles* determinado pela equação (2), corresponde à percentagem de partículas que no final apresentam uma dimensão inferior a 1,6 mm (NP EN 1097-2, 2011).

$$LA = \frac{10000 - m}{100} \quad (2)$$

onde m corresponde à massa retida no peneiro de abertura de 1,6 mm e 10000 corresponde ao valor da massa seca que a norma estipula para a amostra, em gramas.



Figura 11 - Máquina de *Los Angeles*.

2.2.1.2. Ensaio de *Micro-Deval*

Neste ensaio é avaliada a resistência das pedras ao desgaste. À semelhança do ensaio anterior, o balastro é colocado num tambor rotativo juntamente com bolas de aço normalizadas, porém de menor diâmetro. É adicionada uma quantidade pré-definida de água, mas o ensaio também pode ser feito a seco. A fricção criada pelo contacto entre o balastro, as bolas e a água, gera desgaste das partículas, sendo o seu valor quantificado pelo coeficiente de *Micro-Deval*, M_{DE} . Quando o processo termina, é determinado o peso m (em gramas) das partículas retidas no peneiro de abertura 1,6 mm. O coeficiente é determinado pela equação (3), onde mais uma vez, 10000 corresponde à massa seca da amostra ensaiada em gramas (BS EN 1097-1, 1996).

$$M_{DE} = \frac{10000 - m}{100} \quad (3)$$



Figura 12 - Máquina de *Micro-Deval*.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

No que concerne à geometria, o balastro é avaliado pela sua dimensão e forma. Como já foi referido anteriormente, trata-se de um agregado monogranular em que a dimensão mínima (d) é 31,5 mm e a máxima (D) 50,0 mm. Pode no entanto existir uma percentagem muito baixa de partículas com sobretamanho, ou seja, que fiquem retidas no peneiro 50,0 mm, ou com subtamanho e que deste modo ultrapassem o peneiro de 31,5 mm (IT.GEO.001, 2008). Assim, as curvas granulométricas para este agregado são feitas com recurso à série de peneiros: 80; 63; 50; 40; 31,5; e 22,4 mm (NP EN 933-1, 2000).

Antes, no subcapítulo 2.1.3.1 já foi referido que o balastro ferroviário tem de estar isento de partículas finas (0 - 0,5mm) e finos (0 - 0,063 mm), sendo admissível uma percentagem muito baixa destes elementos.

Para a avaliação da forma do agregado, a norma NP EN 13450 faz referência à medição do Índice de Achatamento, do Índice de Forma e do Comprimento.

2.2.2.1. Índice de Achatamento

Para a determinação do Índice de Achatamento (FI) são utilizados peneiros de barras semelhantes aos da Figura 13. Os peneiros a utilizar estão diretamente relacionados com a distribuição granulométrica do agregado, sendo que a cada fração granulométrica corresponde um peneiro com abertura igual a metade da maior dimensão do intervalo. O índice é calculado segundo a equação (4), onde M_1 corresponde à massa total seca da amostra, subtraída da massa das partículas rejeitadas, ou seja, a massa que passa o peneiro de 4,0 mm. A soma da massa das partículas que atravessam os peneiros de barras é denominada M_2 (BS EN 933-3, 1997).

$$FI = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (4)$$



Figura 13 - Peneiros de barras.

2.2.2.2. Índice de Forma

No caso do Índice de Forma, este é determinado com o auxílio de um paquímetro, instrumento representado na Figura 14. Neste ensaio é medida a dimensão máxima entre dois planos paralelos tangenciais à superfície da partícula (L), sendo verificado se a sua espessura (E) é menor ou maior que um terço de L . Se E for superior a $L/3$ a partícula é considerada cúbica, caso contrário é não cúbica. O Índice de Forma (SI) da equação (5) representa a percentagem da massa das partículas M_2 em que a razão L/E é superior a três em relação à massa total seca das partículas ensaiadas, M_1 (BS EN 933-4, 2008).

$$SI = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (5)$$



Figura 14 - Paquímetro (Coutinho, 2013).

2.2.2.3. Comprimento

Neste ensaio utiliza-se uma bitola metálica de perfil U, com dimensão interior de 100mm. Os elementos da amostra são medidos um a um, considerando-se que o comprimento da partícula (L) é a dimensão máxima de uma partícula definida pela distância maior entre dois planos paralelos tangenciais à superfície da partícula. Em seguida pesam-se as partículas que apresentam comprimento superior ao da bitola e determina-se a sua percentagem relativamente à amostra (IT.GEO.001, 2008).

2.2.3. ELEMENTOS PREJUDICIAIS

O balastro deve estar isento de elementos prejudiciais. Entende-se por elementos prejudiciais o conjunto de fragmentos de rochas alteradas, friáveis, grumos argilosos ou siltosos e elementos estranhos à rocha a utilizar, tais como pedaços de madeira, de plástico e de metal. Estes materiais são retirados manualmente da amostra e pesados para que se possa quantificar a sua percentagem relativamente ao peso total da amostra (IT.GEO.001, 2008).

2.2.4. VALORES LIMITE DA REFER

A Rede Ferroviária Nacional (REFER) define um conjunto de valores limite para as características descritas acima, que são resumidos no Quadro 2. São considerados dois conjuntos de valores, os de aceitação sem restrições e os de rejeição, sendo ideal que o balastro cumpra os valores de aceitação. A REFER apenas em casos excepcionais aceita agregado cujos valores das características estejam entre os de aceitação sem restrições e os de rejeição. A distribuição granulométrica que a REFER impõe é representada no fuso do balastro da Figura 15.

Quadro 2 - Resumo das características técnicas que implicam aceitação sem restrições e rejeição do balastro (IT.GEO.001, 2008).

Caraterísticas Técnicas		Valores de aceitação sem restrições		Valores de Rejeição		
Los Angeles		≤ 16 (Tipo I)		> 19 (Tipo I)		
		≤ 20 (Tipo II)		> 23 (Tipo II)		
Micro Deval		≤ 7 (Tipo I)		> 8 (Tipo I)		
		≤ 11 (Tipo II)		> 13 (Tipo II)		
Granulometria		Peneiros (mm)	Passados acu- mulados (%)	Peneiros (mm)	Passados acu- mulados (%)	
		80	100	80	100	
		63	100	63	100	
		50	≥ 70 ≤ 99	50	< 65	
		40	≥ 30 ≤ 65	40	< 25 > 70	
		31,5	≥ 1 ≤ 25	31,5	> 30	
		22,4	≤ 3	22,4	> 8	
		Partículas finas (%)		≤ 0,6	> 1,2	
		Finos (%)		≤ 0,5	> 1	
Forma	Índice de Achata- mento (%)	≤ 15	> 30			
	Índice de Forma (%)	≤ 10	> 20			
	Comprimento (%)	≤ 4	> 8			
Elementos prejudiciais (%)		≤ 3	> 6			

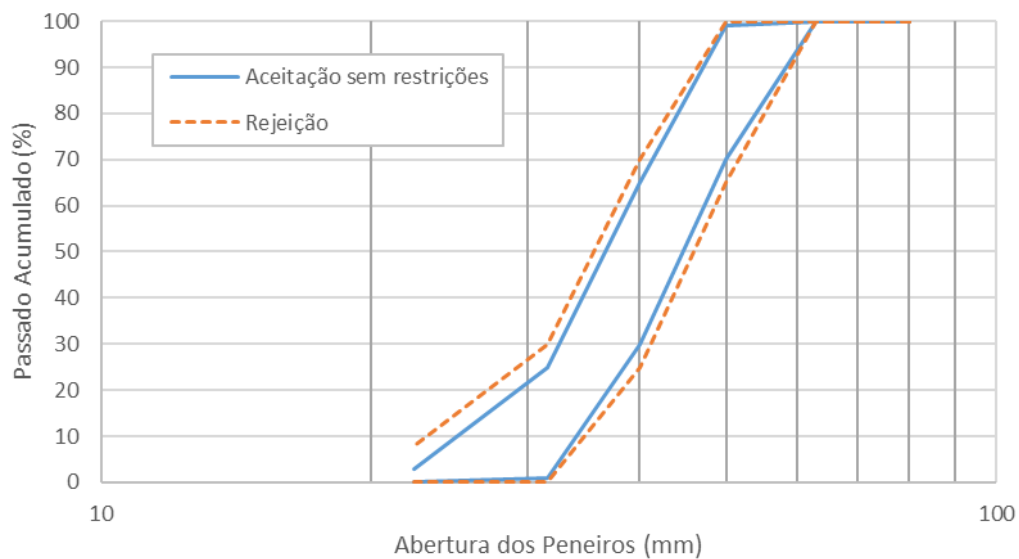


Figura 15 - Fuso granulométrico do balastro (IT.GEO.001, 2008).

2.2.5. OUTROS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS

Apesar de o tamanho e a forma das partículas de agregado serem dois fatores que afetam significativamente o desempenho da camada de balastro, a investigação nesta área não tem evoluído muito. A distribuição das partículas segundo o seu tamanho, como é feito através da peneiração, acaba por ser um método grosseiro para a sua caracterização, uma vez que em cada fração existem partículas com diferentes formas. Há, assim, necessidade de separar as partículas segundo a sua forma, em cada fração. Deste modo, têm vindo a ser desenvolvidos vários parâmetros que pretendem avaliar cada partícula para diferentes escalas: forma (ou morfologia), angulosidade e textura (Figura 16). Salienta-se que nenhum destes parâmetros é utilizado nas normas nacionais, daí o facto de serem apresentados numa seção separada.

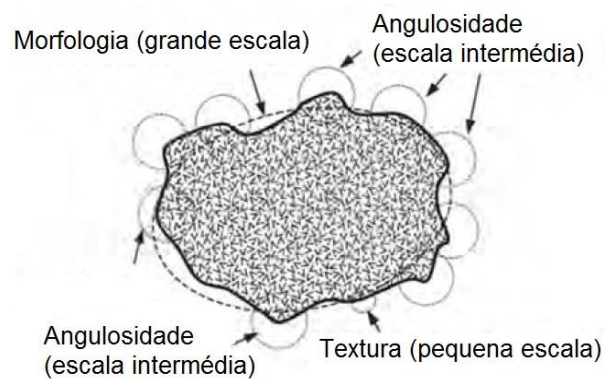


Figura 16 - A partícula segundo diferentes escalas (Rodriguez *et al.*, 2013, adaptado).

Para avaliar a forma da partícula foi proposto o parâmetro esfericidade. Segundo Rodriguez *et al.* (2013), Wentworth, em 1922, foi um dos primeiros autores que, medindo a dimensão segundo três eixos ortogonais da partícula, propôs o cálculo da esfericidade (ψ) (equação 6). Como se pode observar na Figura 17, é medido o comprimento segundo o maior eixo (L), o intermédio (I) e o menor eixo da partícula (S).

$$\psi = \frac{L + I}{2S} \quad (6)$$

Na sequência, foram propostas para várias alterações ao cálculo deste parâmetro, nomeadamente uma que propôs a relação entre a superfície da partícula e a de uma esfera com o mesmo volume.

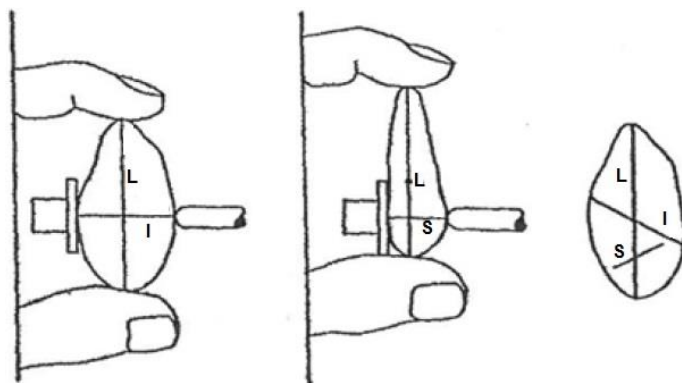


Figura 17 - Medição da partícula segundo eixos perpendiculares (Rodriguez *et al.*, 2013, adaptado).

Em Rodriguez *et al.* (2013) é feito um resumo de todos os trabalhos publicados acerca desta temática, nomeadamente a definição da esfericidade segundo Ashenbrenner em 1956 (equação 7), que será utilizada mais adiante neste estudo.

$$\psi = \frac{12,8 \times \sqrt[3]{(S/I)^2 \times (I/L)}}{1 + (S/I)(1 + (I/L)) + 6 \times \sqrt{1 + (S/I)^2(1 + (I/L)^2)}} \quad (7)$$

Como se pode verificar na equação anterior, há dois quocientes que se destacam, S/I e I/L . Trata-se da razão de achatamento (p) e da razão de alongamento (q), respetivamente. O fator de forma (F), por sua vez, trata o quociente entre a razão de achatamento e a razão de alongamento. Uma partícula cúbica ou redonda tem um fator de forma igual a um, enquanto uma partícula laminar tem um fator superior à unidade. Se F for menor que a unidade a partícula é mais alongada e fina (Uthus *et al.*, 2005).

Foram criados vários ábacos que relacionam a razão de achatamento e alongamento com a esfericidade, permitindo categorizar as partículas como tendo forma discoide, cúbica, vareta ou laminar. Salienta-se no entanto que os valores que separam cada categoria variam de autor para autor, tornando impreterível a criação de uma linguagem universal nesta área.

Existem também versões da esfericidade que assentam em projeções bidimensionais da partícula. Os parâmetros estudados até agora para definir a angulosidade também têm em conta estas projeções. No entanto, a linha limitadora de uma partícula angular varia com a escala e a verificação dos cantos, que é preponderante nesta análise, pode ser deturpada mediante a escala utilizada. Assim, estes parâmetros acarretam alguma subjetividade, para além de não reproduzirem verdadeiramente a forma da partícula. De modo a colmatar as limitações destes parâmetros Sun *et al.* (2014) tirou partido da evolução ao nível dos digitalizadores tridimensionais e propôs um novo parâmetro, a forma elipsoidal. Este conceito assenta no trabalho desenvolvido por Le-Pen *et al.* (2013), onde se pretende medir a angulosidade relacionando o perímetro de uma projeção da partícula com o perímetro de uma elipse de área equivalente. Sun *et al.* (2014) faz uma atualização deste princípio para uma forma tridimensional. A forma elipsoidal

(E) é definida como sendo o rácio entre a superfície (S_e) de um elipsoide de volume equivalente (V) ao da partícula, com a superfície (S_o) da mesma. O maior eixo do elipsoide (a) corresponde a metade de L (maior eixo da partícula) e os eixos menores (b e c) são iguais, por simplificação, e definem-se pela equação (10).

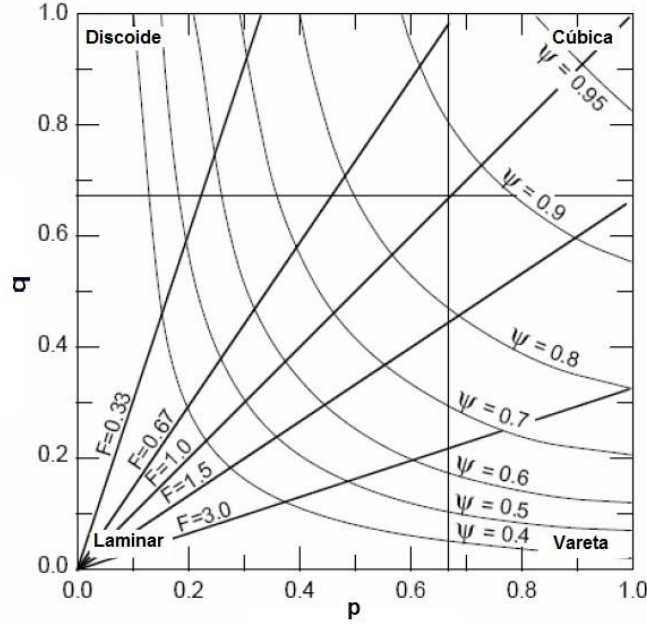


Figura 18 - Ábaco de classificação para partículas (Uthus *et al.*, 2005, adaptado).

$$E = \frac{S_e}{S_o} \quad (8)$$

em que

$$S_e = 4\pi \left(b^2 + a^2 \frac{\arccos(b/a)}{\tan(\arccos(b/a))} \right) \quad (9)$$

e

$$b = \left(\frac{3V}{2\pi L} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Por se tratar de uma análise tridimensional, acredita-se que o presente método resulta em soluções mais realistas para a avaliação da forma da partícula. Salienta-se ainda que a forma elipsoidal (E) pode assumir valores entre “0” e “1”.

2.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA CAMADA DE BALASTRO

Durante muito tempo o balastro foi considerado um material quase-elástico, sendo que a maioria dos estudos e modelações existentes assentam nessa consideração. Um dos primeiros estudos acerca do comportamento mecânico da via onde é feita esta consideração, foi realizado por Winkler (1867). Trata-se de um modelo muito simples onde o carril é apoiado em molas que de um modo contínuo, simulam

a rigidez equivalente de todos os elementos subjacentes, como se pode ver na Figura 19a) e b). A rigidez vertical da via por unidade de superfície e comprimento é representada, respetivamente, pelas letras C e u .

Foi igualmente desenvolvido um modelo simplificado em que o carril é apoiado de modo discreto sobre as travessas, representado na Figura 19c). A rigidez discreta do apoio, k_{eq} , engloba a rigidez da camada de balastro, da camada de sub-balastro e da fundação.

É no entanto evidente, a partir da observação de obras em utilização, que ao longo dos ciclos de carga se vão acumulando deformações plásticas. A verdade é que o comportamento da subestrutura associado aos ciclos de carga ainda não é bem compreendido, tornando-se difícil prevê-lo com um rigor desejado.

Uma vez que os comboios não circulam à mesma velocidade e que as carruagens não têm todas o mesmo peso por eixo, importa que sejam realizados ensaios dinâmicos ao balastro com vários valores de carga, uma vez que o seu comportamento pode ser bastante díspar para padrões de carga diferentes. Esses ensaios podem permitir desenvolver novos modelos de comportamento que contemplem a complexidade associada às cargas cíclicas, aos mecanismos de degradação dos elementos da via e à resposta a longo prazo. Os avanços computacionais deverão permitir integrar esses comportamentos em modelos numéricos representativos da infraestrutura.

Atualmente existem distintas metodologias de cálculo que permitem obter uma solução aproximada dos problemas. Na modelação da via-férrea destacam-se o Método dos Elementos Finitos e das Diferenças Finitas (MEF / MDF) e o Método dos Elementos Discretos (MED).

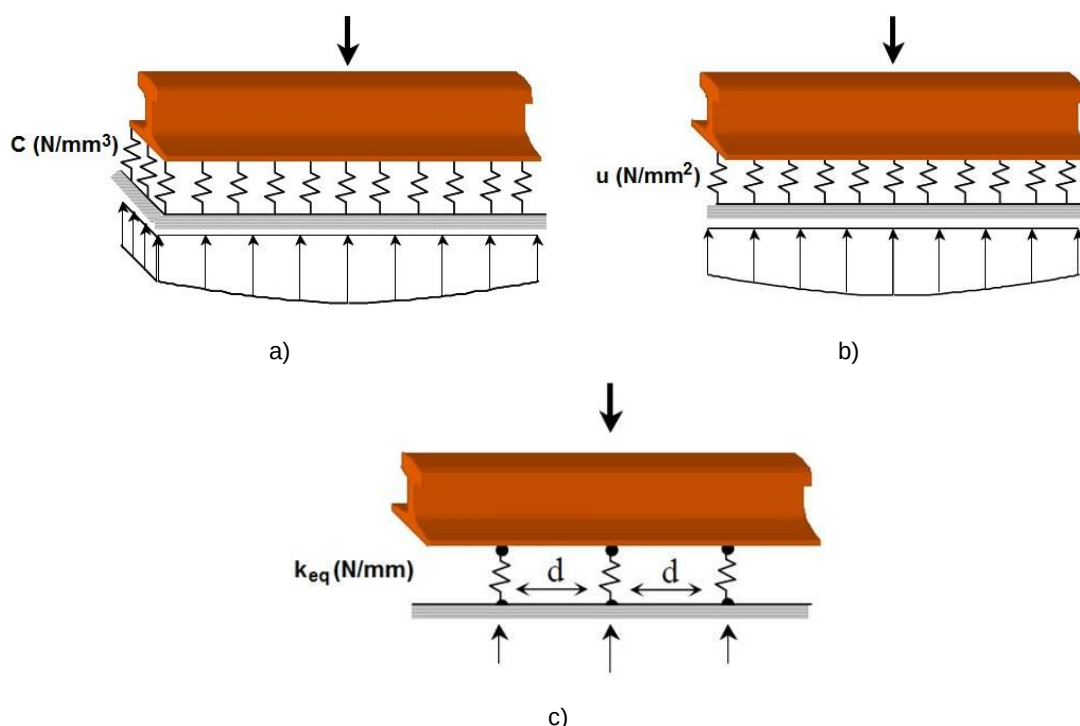


Figura 19 – Modelos da via sobre meio elástico: a) rigidez da via por unidade de superfície; b) rigidez da via por unidade de comprimento; c) rigidez da via por apoios discretos (Teixeira, 2003, adaptado).

2.3.1. MÉTODOS CONTÍNUOS

O Método dos Elementos Finitos e o Método das Diferenças Finitas são métodos numéricos que partem da discretização de um meio contínuo em elementos mais pequenos, considerando as propriedades dos materiais, as condições de fronteira do problema e as solicitações. Estes elementos podem ser de duas ou três dimensões e são ligados entre si nos pontos nodais. Podem também ter diferentes tamanhos, constituindo malhas mais ou menos refinadas, consoante seja mais conveniente. Malhas com número maior de elementos conduzem a melhores resultados, no entanto também ocupam mais memória computacional, podendo o cálculo tornar-se excessivamente demorado.

Esta abordagem tem como vantagens (Belytschko, 1983): permitir a análise não linear do modelo, que deste modo considera que a geometria e o comportamento dos materiais não são constantes; análise dinâmica, uma vez que as ações aplicadas em algumas estruturas são desta natureza; e a análise de geometrias complexas.

Na Figura 20 é representado um exemplo da modelação da via-férrea balastrada com o *software* de diferenças finitas tridimensional *FLAC3D*. Neste caso só é representada metade da via, uma vez que esta é simétrica tanto a nível geométrico como de aplicação das cargas.

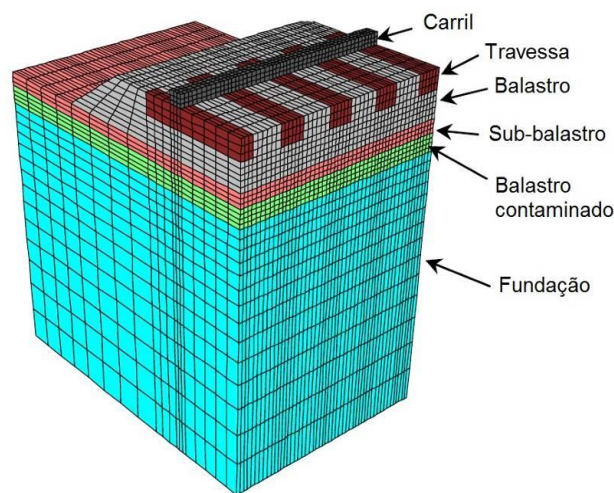


Figura 20 - Malha utilizada na modelação da via-férrea balastrada com o *FLAC3D* (Fortunato e Resende, 2006, adaptado).

Como foi referido, no MEF/MDF o meio em análise é representado como um meio contínuo. No caso da camada de balastro da via-férrea, tendo em conta as dimensões das partículas e os contactos que se estabelecem entre elas, esta aproximação é relativamente grosseira.

2.3.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Os modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Discretos permitem simular o comportamento de materiais granulares como o balastro ferroviário. O material granular é modelado como um conjunto de partículas que interagem entre si, como mostra a Figura 21.

Neste método é analisado o movimento de cada partícula, que constitui um elemento discreto, possibilitando uma modelação mais realista da camada de balastro, dado considerar o material e as propriedades

físicas das partículas, como a forma, o tamanho e a angulosidade. Neste modelo também se pode controlar o grau de compactação e o coeficiente de atrito entre as partículas (Vale, 2010). Os fatores mencionados permitem reproduzir e compreender melhor o comportamento da via-férrea nas várias escalas.

A interação entre as partículas é controlada pelos parâmetros de contacto representados na figura abaixo. A rigidez normal de ligação por contacto, K_n , controla a relação entre a força normal e o deslocamento relativo na direção perpendicular ao plano comum entre duas partículas. A rigidez tangencial de ligação por contacto, K_s , controla a relação entre a força de corte e o movimento das partículas segundo a direção paralela ao plano de contacto entre elas. O ângulo de atrito controla o deslizamento entre as duas partículas através da fricção gerada, quando a resistência ao corte é excedida.

Deste modo, o funcionamento do MED resume-se às seguintes operações: cálculo das forças de contacto entre os elementos; cálculo do movimento das partículas; e restabelecimento dos contactos. Este procedimento pode ser verificado no diagrama da Figura 22 proposto por ITASCA e que vem citado no trabalho de Huang (2010).

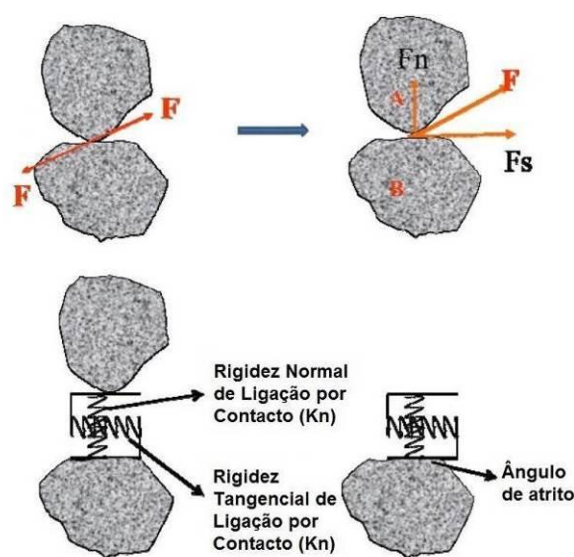


Figura 21 - Parâmetros do MED (Huang, 2010, adaptado).

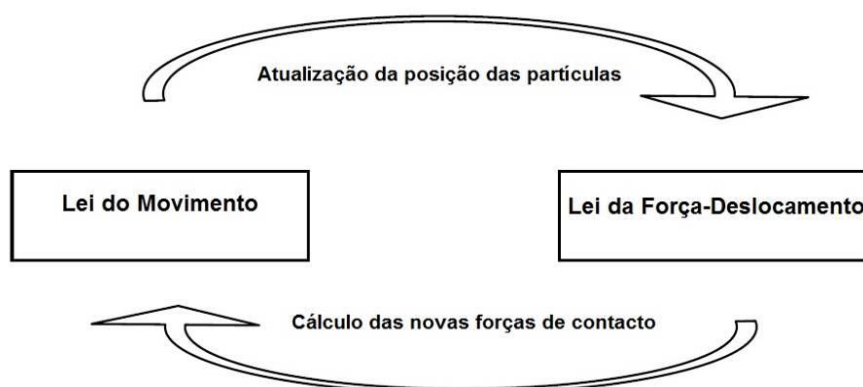


Figura 22 - Ciclo de cálculo no MED segundo ITASCA (Huang, 2010, adaptado).

Importa referir que a Lei da Força-Deslocamento relaciona a força atuante nas duas entidades em contacto, com o deslocamento entre elas. A Lei do Movimento relaciona as forças e momentos que atuam numa partícula isolada, com a translação e rotação da mesma.

As forças de contacto entre as partículas têm duas componentes, a normal (F_n) e a de corte (F_s). A força máxima de corte a que as partículas resistem sem deslizarem ou rolarem entre elas depende do ângulo de atrito (θ). Como já foi referido no subcapítulo 2.1., algum tempo depois de o balastro se encontrar em uso na via-férrea, tende a ser contaminado por finos. Neste caso, os contactos entre as partículas diminuem e consequentemente também o ângulo de atrito. Deste modo a força de corte máxima a que o sistema resiste é também menor. A Figura 23 mostra um esquema da modelação das partículas com balastro limpo e balastro contaminado.

Apesar de se tratar de um método exigente do ponto de vista computacional, no que concerne à modelação do balastro leva a resultados mais realistas que os métodos contínuos.

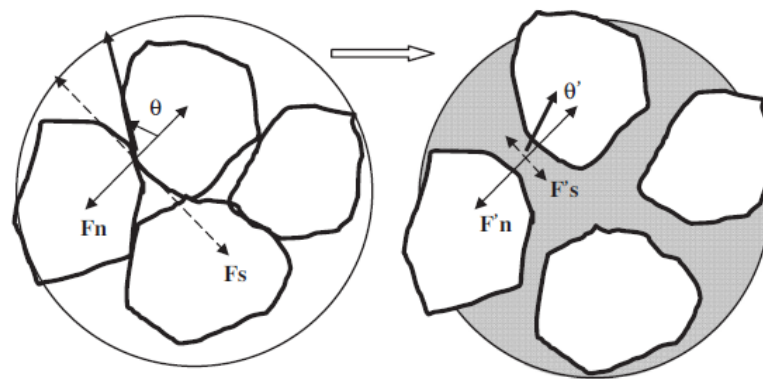


Figura 23 - Forças de contacto entre partículas de balastro limpo (à esquerda) e contaminado com finos (à direita) (Huang *et al.*, 2007).

Em termos de modelação das partículas, estas tendem a ser constituídas por círculos no caso de modelos de duas dimensões, ou por esferas caso se esteja a trabalhar a três dimensões. Estes elementos podem ter diferentes diâmetros para simular diferentes frações granulométricas, mas pode-se também criar conjuntos de partículas para simular elementos com diferentes formas, os *clumps* (Figura 24).

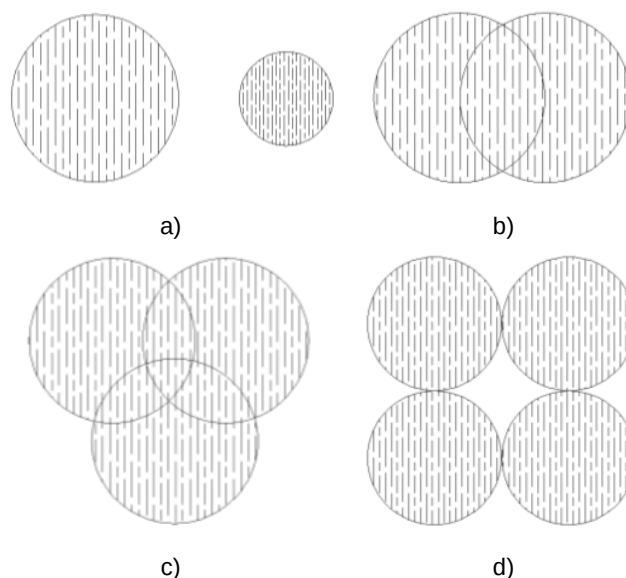


Figura 24 – Formas para elementos MED: a) partículas com dois diâmetros; b) *Clump* formado por duas partículas; c) *Clump* formado por três partículas; d) *Clump* formado por quatro partículas (Ferreira, 2012).

Os *clumps* podem ser criados com partículas de diferentes diâmetros, como é mostrado no trabalho de Lobo-Guerrero e Vallejo (2005), que modelaram ensaios de corte e propuseram uma idealização do arranjo dos fragmentos dos elementos cuja tensão de rotura podia ser ultrapassada (Figura 25).

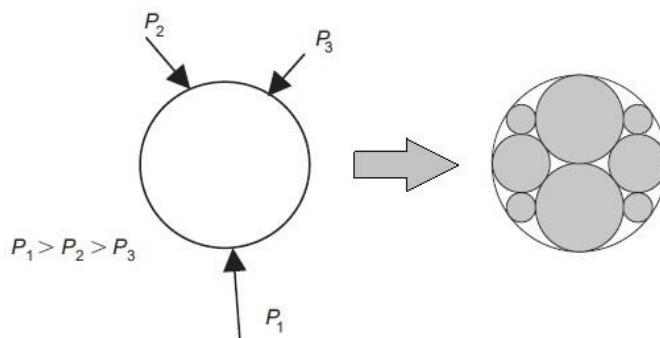


Figura 25 - Idealização do arranjo dos fragmentos de um elemento cuja tensão de rotura foi ultrapassada (Lobo-Guerrero e Vallejo, 2005, adaptado)

Os mesmos autores, em 2006, publicaram um novo trabalho onde desenvolveram até três “gerações” de elementos que modelam a fragmentação das partículas de balastro na via-férrea, quando sujeitas a ciclos de carga (Figura 26).

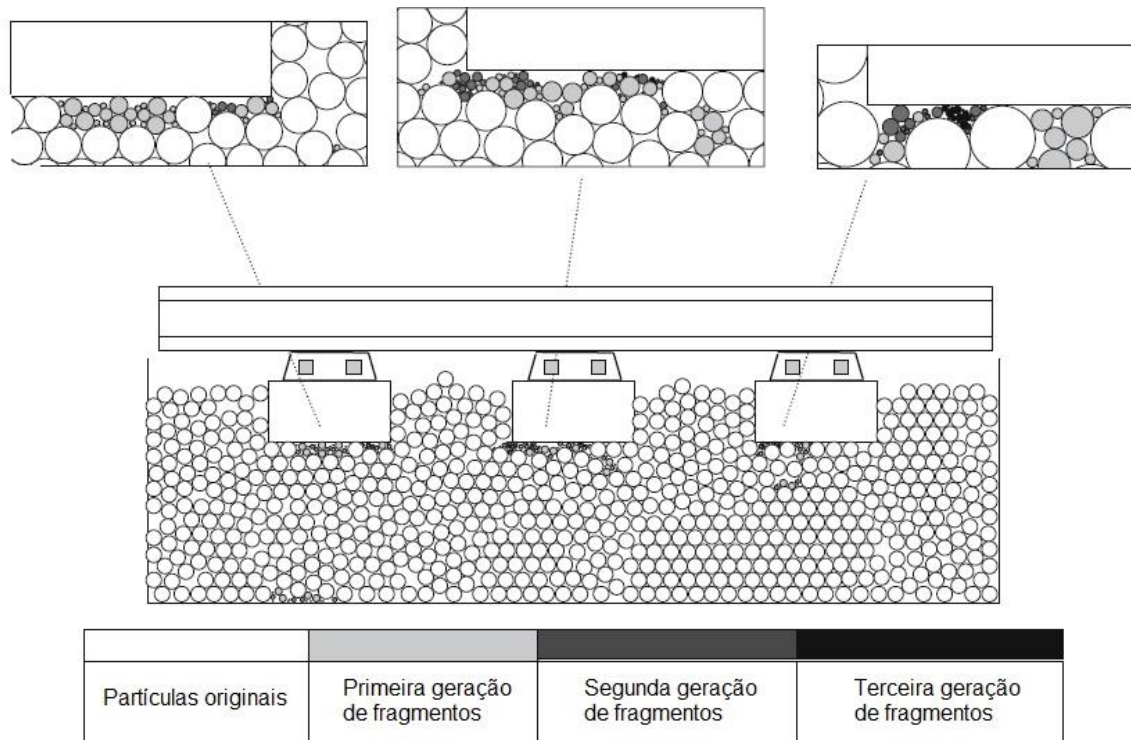


Figura 26 – Detalhe das partículas de balastro depois de terem sido aplicados 200 ciclos de carga (Lobo-Guerrero e Vallejo, 2006, adaptado)

No trabalho de Lu e McDowell (2007) são descritos processos de geração de *clumps* mais complexos, tendo em conta a forma da partícula de balastro. Deste modo estipulam-se direções segundo as quais se vão juntar as partículas e de seguida estas propagam-se com diferentes diâmetros para se aproximar da forma da partícula de balastro (Figura 27).

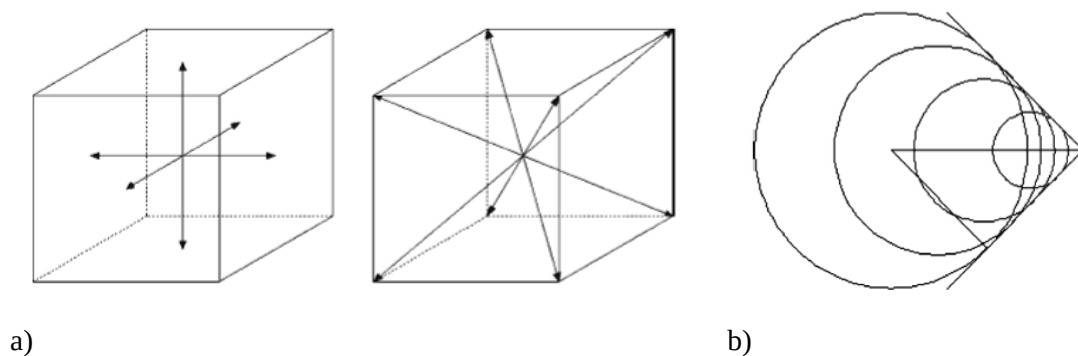


Figura 27 - Geração de *clumps*: a) direções de propagação de partículas; b) propagação de partículas segundo uma direção (Lu e McDowell, 2007).

Uma partícula de balastro pode ser modelada por *clumps* mais complexos ou mais simples, sendo que os mais complexos, apesar de simularem melhor a partícula são computacionalmente mais exigentes (Figura 28).

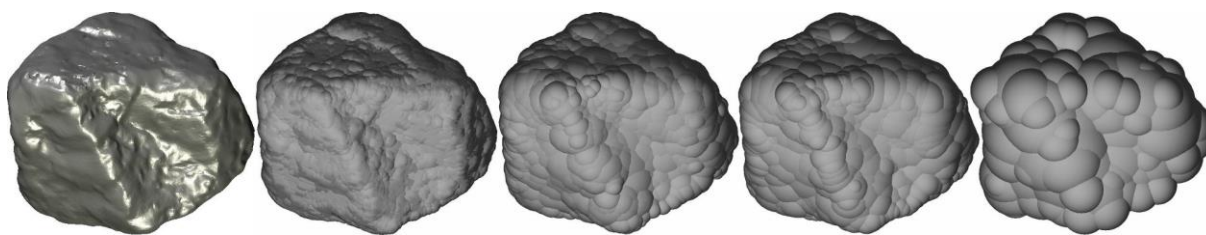


Figura 28 – Partícula de balastro (à esquerda) e os seus modelos de *clumps*, onde o número de partículas do elemento decresce da esquerda para a direita (Baghsorkhi *et al.*, 2014).

Realça-se que a modelação das partículas por um elemento circular ou por *clumps*, não conduz exactamente aos mesmos resultados. Veja-se a título de exemplo os testes realizados no trabalho de Lu e McDowell (2007). Foi simulado o comportamento de uma travessa sobre uma camada de balastro, à qual foi aplicada uma carga cíclica (Figura 29). Apesar do procedimento ser idêntico, é visível (Figura 30) nos contactos entre os elementos que a simulação com esferas apresenta linhas mais carregadas, o que significa que se desenvolvem forças de contacto maiores do que na simulação com *clumps*. A forma do elemento influencia portanto o valor das forças de contacto, tal como a sua transmissão ao longo do modelo. A nível do deslocamento dos elementos, a Figura 31 mostra que no caso das esferas é obtida uma deformação mais pronunciada nos cantos e nas faces da travessa. Já com os *clumps* a deformação ocorre debaixo da travessa, em sentido descendente, o que coincide com a realidade observada. A resposta dos dois modelos é portanto bem diferente, sendo que na simulação com esferas a deformação do modelo é substancialmente maior (Figura 32).

Desta forma se conclui que a criação de elementos com forma aproximada à das partículas de balastro gera modelos com comportamentos mais adequados à realidade.

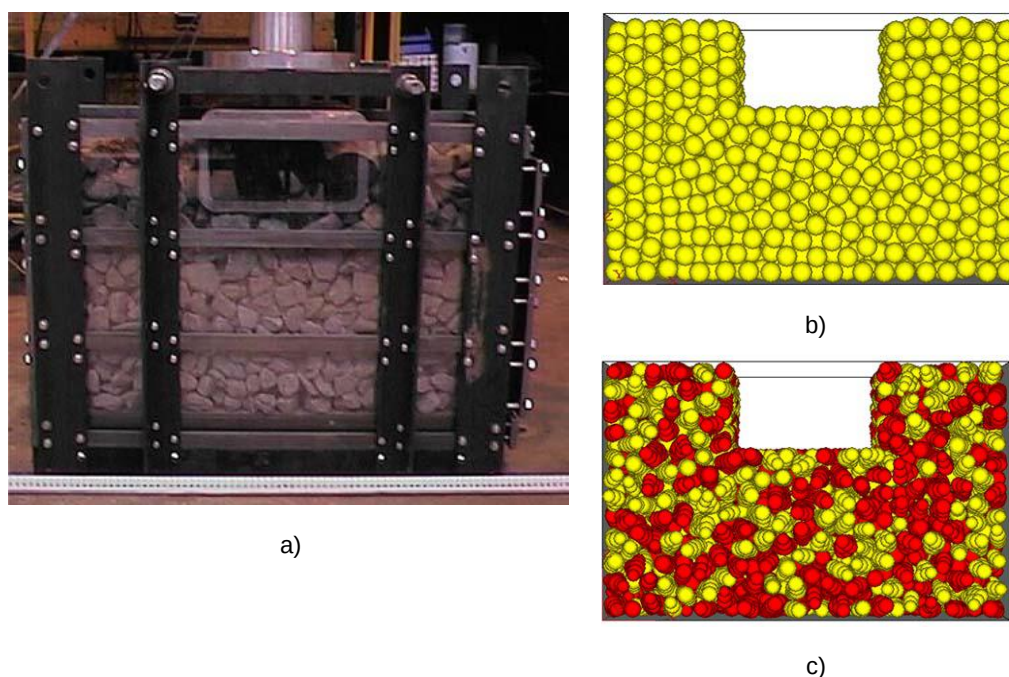


Figura 29 - Ensaio: a) caixa de teste; b) simulação com esferas; c) simulação com *clumps* (Lu e McDowell, 2007).

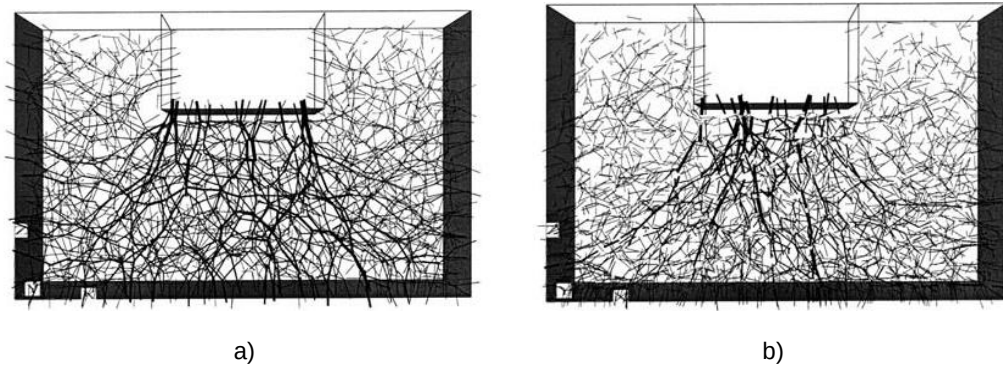


Figura 30 - Forças de contacto entre elementos: a) simulação com esferas; b) simulação com *clumps* (Lu e McDowell, 2007).

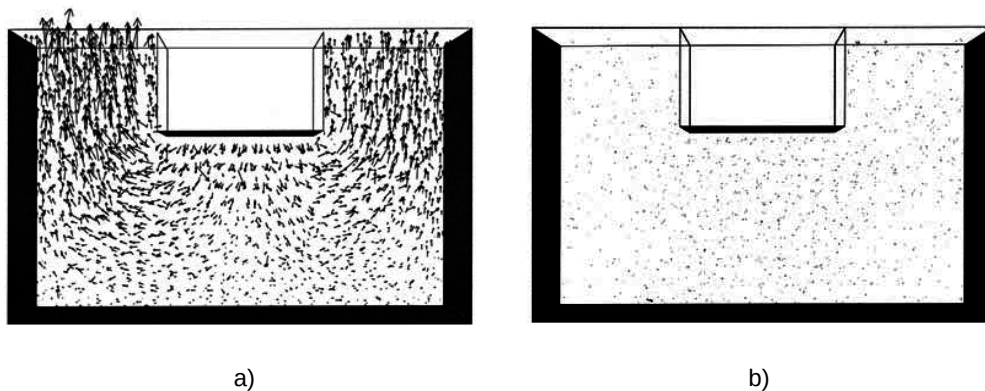


Figura 31 - Vetores de deslocamento dos elementos: a) simulação com esferas; b) simulação com *clumps* (Lu e McDowell, 2007).

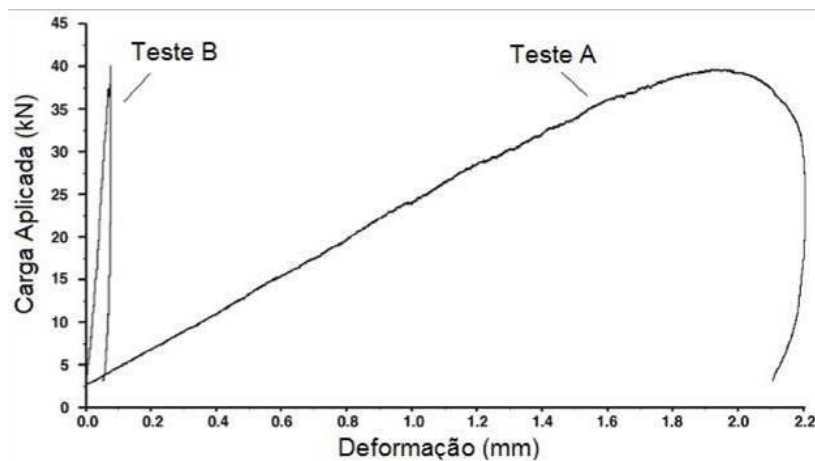


Figura 32 - Resposta dos modelos à carga cíclica, sendo que o teste A corresponde à simulação com esferas e o teste B à simulação com *clumps* (Lu e McDowell, 2007).

Atualmente é possível encontrar na bibliografia da especialidade estudos onde as partículas de balastro são modeladas através de formas poliédricas. Estas formas pretendem reproduzir as arestas vivas dos grãos do agregado. Na Figura 33 estão representados exemplos destes elementos, sendo que os cantos “afiados” que as arestas formam entre si são suavizados no cálculo computacional. O cálculo de modelos

com estes elementos é mais exigente quando comparado com aqueles que utilizam os *clumps*, pois existem mais configurações para as ligações das partículas poliédricas, o que pesa na resolução dos contactos entre partículas.

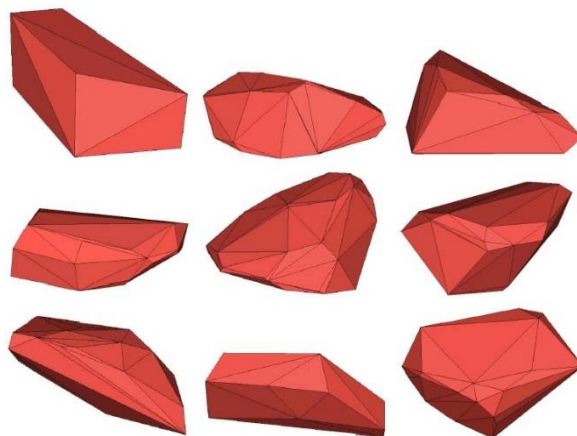


Figura 33 - Exemplos de modelos de partículas de balastro poliédricas (Azéma, 2007).

Tendo em conta o que foi referido, conclui-se que a modelação do balastro por elementos discretos faz mais sentido que por elementos finitos, dado tratar-se de um meio granular, não homogéneo e muito poroso. Da mesma forma, conclui-se que os elementos cuja forma aproxima a do balastro, levam a resultados mais realistas. Apesar de ser um método de cálculo muito exigente em termos computacionais, é de prever que, em face do desenvolvimento dos computadores, seja possível, num futuro próximo, realizar este tipo de análises considerando uma parte significativa da via-férrea, sem grande dificuldade.

2.3.3. ESTADO DE ARTE

Com este trabalho pretende-se captar a forma de várias partículas de balastro, para que, posteriormente, seja criada uma biblioteca de pedras que possa ser usada num modelo por elementos discretos que simule a camada de balastro ferroviário.

Outros autores desenvolveram já trabalhos de investigação onde foram utilizadas técnicas para captar as características das partículas como a sua forma, textura, angularidade, entre outras. Neste subcapítulo referem-se alguns destes trabalhos.

2.3.3.1. Sistema AIMS (Al-Rousan *et al.*, 2005)

Neste trabalho pretendeu-se desenvolver um novo método para classificar os agregados, baseado na distribuição das suas características. Esta nova metodologia assenta nas seguintes particularidades:

- Representar três características do agregado: a forma, a angulosidade e a textura. Estas características são medidas com recurso ao sistema “Aggregate Imaging System” (AIMS);
- Unificar os métodos utilizados para medir as características dos finos e dos materiais granulares;
- Representar as características das partículas segundo uma lei de distribuição, em vez de um valor médio.

Os métodos de análise para a medição da forma, angulosidade e textura dos agregados fazem parte do *software* do AIMS. Este equipamento é equipado com uma luz superior e inferior, e um microscópio

com focagem automática (Figura 34). Todos estes elementos são necessários de modo a captar imagens a preto e branco e escala de cinza para diferentes ampliações. Os movimentos do equipamento segundo x, y e z são controlados por computador, tal como a ampliação da imagem.

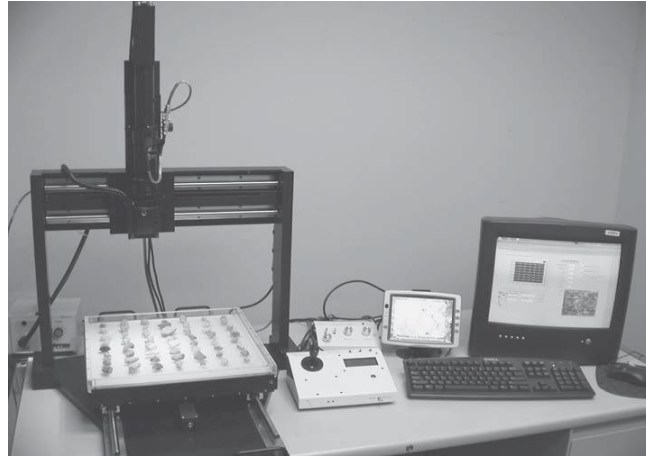


Figura 34 – Sistema AIMS (Al-Rousan *et al.*, 2005).

Para caracterizar a forma do agregado, é necessário ter em conta que se trata de partículas tridimensionais. O conjunto câmara-microscópio é usado para captar projeções das partículas que se encontram na mesa de digitalização. As projeções são utilizadas para medir a maior e menor dimensão da partícula através da análise com vetores próprios. Nesta análise, o binário da imagem é bidimensional e cada *pixel* é representado por um vetor bidimensional. Estes vetores são utilizados para calcular os vetores próprios, que formam entre si 90° . A maior e menor dimensão são alinhadas com estes vetores. A profundidade da partícula é determinada segundo a localização da focagem automática do microscópio. A distância entre a mesa de digitalização e a lente é guardada como referência. De seguida o microscópio move-se segundo x, y e z para focar a superfície da partícula. A distância entre as duas posições do microscópio é igual à profundidade da partícula. Com os resultados deste procedimento pode medir-se a esfericidade e o índice de forma (Figura 35).

A angulosidade é analisada segundo o método do gradiente. Este método quantifica a mudança de gradiente no contorno da partícula. Um gradiente mais alto corresponde a uma angulosidade mais elevada. Começa-se por calcular a inclinação dos vetores gradiente nos pontos do contorno segundo a direção x. As alterações da média da inclinação são tidas como uma indicação de angulosidade.

Para avaliar a textura é utilizado o método de onda curta. Neste método a imagem é decomposta segundo diferentes níveis. Assim em cada nível é analisado a textura segundo uma escala de textura.

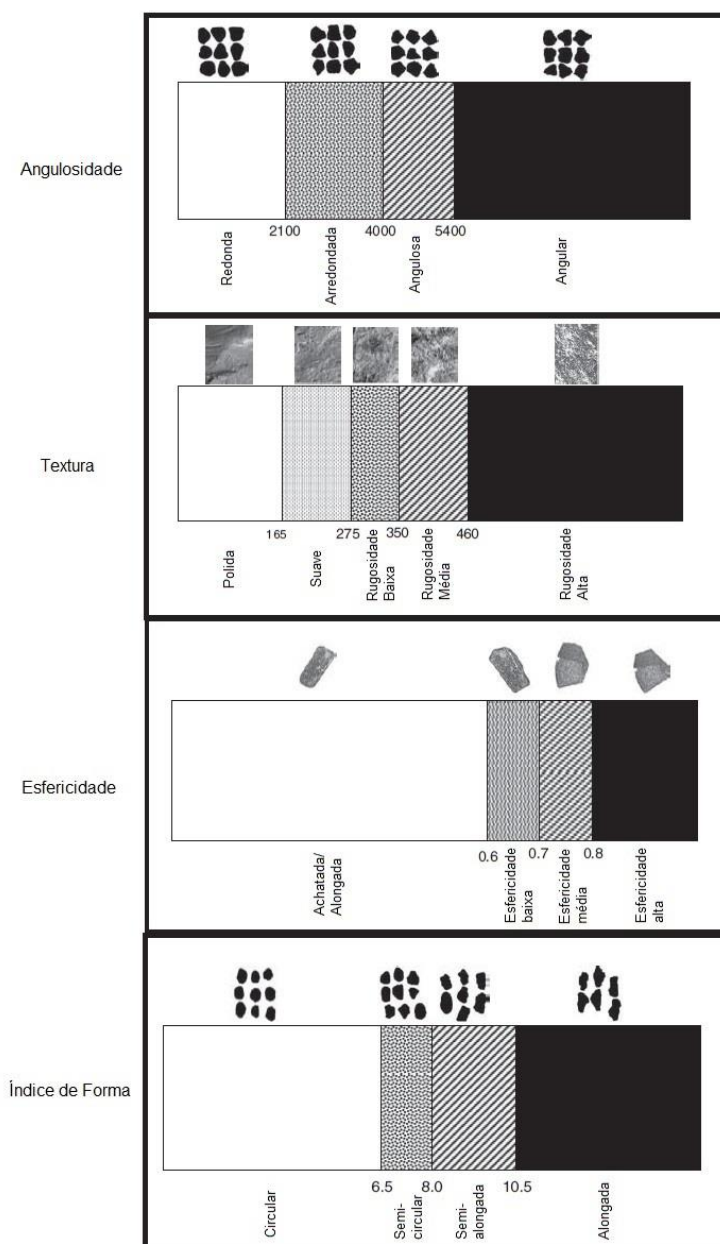


Figura 35 – Gráfico para classificação do agregado (Al-Rousan et al., 2005, adaptada).

2.3.3.2. Scanner da Roland DGA Corporation (Anochie-Boateng et al., 2011)

Durante vários anos, a área da superfície das partículas usada para avaliar o índice AFT (*Asphalt Film Thickness*) foi determinada por métodos que revelaram ter baixa precisão. No entanto as técnicas de digitalização emergiram, tornando-se numa opção viável para determinar a forma e a superfície do agregado utilizado nas misturas de asfalto.

Neste estudo foi utilizado um scanner 3D a laser desenvolvido originalmente pela *Roland DGA Corporation* nos Estados Unidos. Utiliza um sensor que permite a digitalização de objetos à distância e tem uma resolução de 0,1 mm. Permite a medição direta da superfície dos objetos quer estes tenham uma forma regular ou irregular. O aparelho tem dois modos de digitalização: plano e rotativo. Neste último, os objetos são colocados numa mesa giratória e são percorridos verticalmente por um feixe de laser,

sendo gerado um ficheiro digital (Figura 36). O equipamento foi calibrado pela CSIR (*Council for Scientific and Industrial Research*) para conseguir determinar a forma e a superfície das partículas do agregado. Testada a precisão do equipamento, o *scanner* foi utilizado para digitalizar as partículas do agregado de cinco misturas de asfalto Sul-africano. Foram digitalizadas seis faces de cada partícula do agregado, através do modo de digitalização plano. Depois de digitalizadas, uniram-se as faces através de um *software*. O tempo de digitalização depende da resolução utilizada e do tamanho do objeto. Neste caso utilizou-se uma resolução de 0,1 mm para todas as partículas, tendo-se digitalizado 564 partículas das cinco misturas.

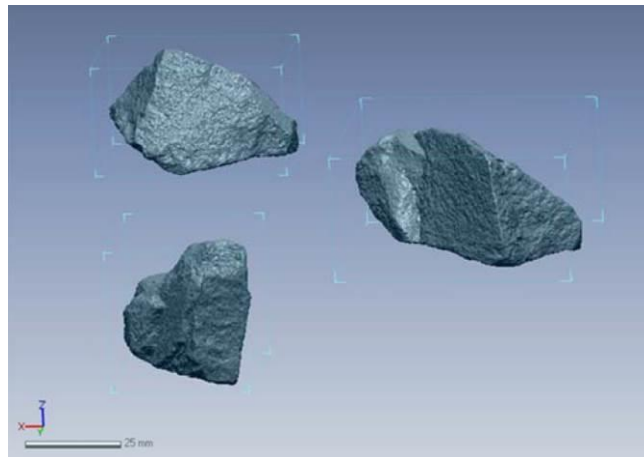


Figura 36 – Digitalizações das amostras de agregados numa vista axonométrica em 3D (Anochie-Boateng *et al.*, 2011).

Deste estudo retiraram-se as seguintes conclusões: é vantajoso utilizar técnicas de medição direta da superfície das partículas para melhorar o cálculo do AFT; e importa implementar técnicas que tenham como base a digitalização a laser para caracterizar a forma e superfície das partículas, uma vez que tendo resultados melhores, pode-se melhorar o desempenho da camada de asfalto.

2.3.3.3. Sistema UI-AIA (Moaveni *et al.*, 2014, Tutumluer *et al.*, 2013, Uthus *et al.*, 2005)

O sistema UI-AIA foi desenvolvido na Universidade de Illinois tornado possível determinar automaticamente o tamanho e a forma das partículas. Através deste equipamento é fácil obter a razão achatamento/alongamento, o índice de angulosidade e o índice de textura.

O equipamento utiliza três câmaras que captam imagens segundo direções ortogonais. As partículas são colocadas uma a uma numa correia transportadora e são detetadas por um sensor quando se aproximam do campo de visão das câmaras. As câmaras estão sincronizadas para que as fotos sejam tiradas simultaneamente. Depois de retiradas as imagens a preto e branco, o “*aggregate particle image-aided DEM approach*” recria a forma do agregado em três dimensões, como um elemento individual que se pode utilizar no âmbito das aplicações do MED. Na Figura 37 apresenta-se a sequência do procedimento utilizado na criação de elementos de balastro.



Figura 37 – Processo de modelação de balastro em DEM (Tutumluer *et al.*, 2013, adaptado).

Recentemente foi produzido um equipamento de segunda geração, o equipamento E-UIAIA (*Enhanced* -UIAIA), que é equipado com câmaras de alta resolução para captar imagens digitais a cores (Figura 38). Este equipamento foi calibrado para mudar automaticamente a resolução, consoante o tamanho da partícula. Estão também integrados quatro LED's para criar contraste na superfície e otimizar a luminosidade.

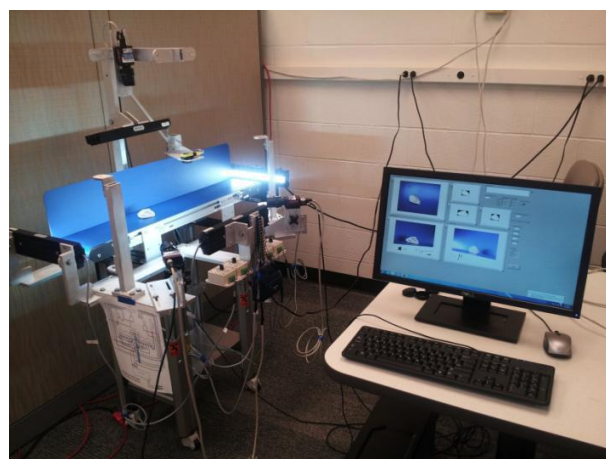


Figura 38 - Equipamento UI-AIA de segunda geração (Moaveni *et al.*, 2014).

Do exposto pode-se concluir que existem métodos e equipamentos que permitem adquirir as características físicas das partículas com vista à sua reprodução em termos digitais. Esta reprodução é útil para a criação de elementos que possam ser inseridos em modelos numéricos baseados no MED.

3

MÉTODOS DE DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS PARTÍCULAS DE BALASTRO

Como já foi referido anteriormente, a forma das partículas de balastro é uma das características determinantes do seu comportamento. Assim, para que se possam melhorar os modelos de análise da via-férrea, em particular através do recurso a modelos numéricos de elementos discretos, importa criar digitalmente elementos que reproduzam de forma rigorosa as dimensões e as diferentes formas que estas partículas assumem.

Atualmente existem equipamentos que permitem captar tridimensionalmente a forma de objetos, que posteriormente podem ser manipulados com recurso a *software* que possuem ferramentas de edição e análise de dados 3D. Entre outras ferramentas, detêm um módulo de inspeção de superfícies, permitindo comparar diferentes malhas no espaço tridimensional.

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois métodos distintos baseados em dois equipamentos de digitalização tridimensional (*scanners*), que são descritos em seguida.

3.1. UTILIZAÇÃO DO SCANNER ROLAND MODELA MDX-20

O primeiro equipamento utilizado foi o *scanner Roland Modela MDX-20* pertencente ao FabLab² de Lisboa, que o disponibilizou, a título gracioso, para a digitalização de quatro negativos feitos em plastilina, onde estavam impressas as características de duas pedras de balastro.

O *Roland Modela MDX-20*, representado na Figura 39, pode ser utilizado como fresadora de precisão, reproduzindo com grande fidelidade superfícies numéricas tridimensionais em formato CAD/CAM para materiais como plástico, madeira ou mesmo alumínio. Porém para este trabalho a característica mais relevante é a de digitalizar objetos tridimensionais através de uma agulha piezoelétrica de grande sensibilidade que permite uma resolução até 0,05 mm no plano e 0,025 mm na vertical. A área máxima de trabalho do aparelho é de 203,2×152,4 mm² e a altura máxima de 60,5 mm, no entanto as dimensões podem ser ajustadas às de objetos de menores dimensões através do *software* de controlo do processo, *Dr. Picza*.

A agulha piezoelétrica faz varrimentos paralelos da área pré estabelecida e baixa até tocar o objeto, sendo assim possível obter as coordenadas de cada ponto que simultaneamente é representado no *Dr.*

² “FabLab” é o termo abreviado de “*Fabrication laboratory*”, criado pelo professor Neil Gershenfeld do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), através da disciplina “*How to do (almost) anything*”. Um FabLab é um espaço totalmente equipado com ferramentas industriais de fabricação digital e de prototipagem rápida, onde o objetivo principal é que qualquer pessoa possa transformar ideias em realidade. Os equipamentos disponíveis incluem fresadoras, cortadores a laser, máquinas de corte de vinil, bancada eletrónica, computadores e ferramentas de programação apoiadas por *open source software*, motivando a criatividade e a invenção (*FabLab Lisboa*, 2014).

Picza. O número de pontos por peça depende das dimensões da peça e da resolução escolhida, sendo este último parâmetro merecedor de especial atenção, pois sempre que a resolução duplica, o tempo de leitura aumenta aproximadamente quatro vezes.



Figura 39 - Scanner Roland Modela MDX 20 do FabLab.

3.1.1 PREPARAÇÃO DOS MOLDES

Uma vez que a agulha do *Roland Modela* apenas se desloca na vertical e que uma pedra de balastro tem uma forma irregular e com reentrâncias, a digitalização foi feita segundo vários planos para que a pedra fosse totalmente representada. Esses planos foram posteriormente unidos recorrendo a *software* de desenho, a fim de se obter a forma original da pedra. De modo a evitar a digitalização do mesmo ponto tridimensional várias vezes, fizeram-se moldes das pedras, onde em cada negativo ficou impressa uma parte da pedra.

Na elaboração dos negativos surgiram algumas preocupações relativas à escolha do material: por um lado tinha de captar bem a forma da pedra e adquirir rigidez suficiente de forma a mantê-la ao longo do tempo. Por outro, impunha-se que tivesse propriedades descofrantes, impedindo que o molde ficasse agarrado à pedra; e, por fim, que permitisse retirar a pedra de dentro do molde sem quebrar ou deformar, devido às reentrâncias da pedra.

Assim, para o trabalho de moldagem ponderaram-se vários materiais: gesso, barro, plasticina, silicone e também poliestireno. Por uma questão de disponibilidade testaram-se a plasticina e o gesso. Primeiro testou-se a plasticina, tendo-se optado por um tipo que apresentasse alguma rigidez para que quando a pedra fosse retirada o molde deformasse o menos possível. A plasticina é um material facilmente trabalhável e não necessita de tempo de presa, permitindo a escolha das faces da pedra a imprimir em cada negativo. Esta propriedade torna-se relevante uma vez que permite limitar a dois o número de moldes por pedra, diminuindo assim o tempo de processo. As pedras usadas nesta fase foram designadas de pedra I e pedra II (Figura 40). Na imagem é também evidente que o material permite captar relativamente bem a forma da pedra, conduzindo a resultados satisfatórios. No entanto, e como já referido, quando se extraíram as pedras, os negativos desviaram-se ligeiramente da sua posição original, acabando por introduzir pequenos erros ao nível do volume original da pedra. Outra questão que surgiu foi o facto de a face de contacto de cada par de negativos não ser lisa, como pode ser verificado na Figura 40, dificultando a montagem das superfícies digitalizadas.



Figura 40 - Moldes de plasticina: a) encaixe de negativos da pedra I; b) negativos da pedra I – vista 1; c) pedra I e pormenor da impressão da forma nos moldes; d) Negativos da pedra I – vista 2; e) encaixe de negativos da pedra II; f) negativos da pedra II – vista 1; g) pedra II e pormenor da impressão da forma nos moldes; h) negativos da pedra II – vista 2.

Em seguida, e com apoio do Departamento de Barragens de Betão do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), testaram-se moldes de gesso. Cada pedra foi inserida dentro de uma caixa de madeira retangular com cerca de $15 \times 20 \text{ cm}^2$ de área. Na base da caixa foi colocado um material que

permitiu a fixação das partículas de balastro na posição desejada. O material escolhido necessitava de ser removido facilmente assim que o molde estivesse pronto, pelo que se optou por plasticina e areia, como se pode ver na Figura 41. De modo a facilitar a descrição do processo, a pedra inserida na base de plasticina será denominada de “pedra MP”, e a da base de areia “pedra MA”. Cada caixa e respetiva pedra foram envoltas em óleo lubrificante para que fosse possível descofrar o molde e a pedra quando o gesso secasse. De seguida, como representado na Figura 42, encheu-se a caixa com gesso ainda líquido e aguardou-se que ganhasse presa, o que aconteceu passado 5 horas. A utilização de gesso parecia inicialmente a solução mais viável, por ser um material que não permite grandes deformações. Porém, depois de seco a sua trabalhabilidade é muito baixa e quando se tentou retirar a pedra, o molde acabou por partir, como consequência do preenchimento de algumas reentrâncias que impediram que o balastro saísse livremente. O resultado do processo está representado na Figura 43 e na Figura 44. Assim, este método apenas seria exequível se fossem criados moldes para cada face do balastro, o que se traduziria num processo relativamente demorado. Pelas razões referidas, este método acabou por ser abandonado.

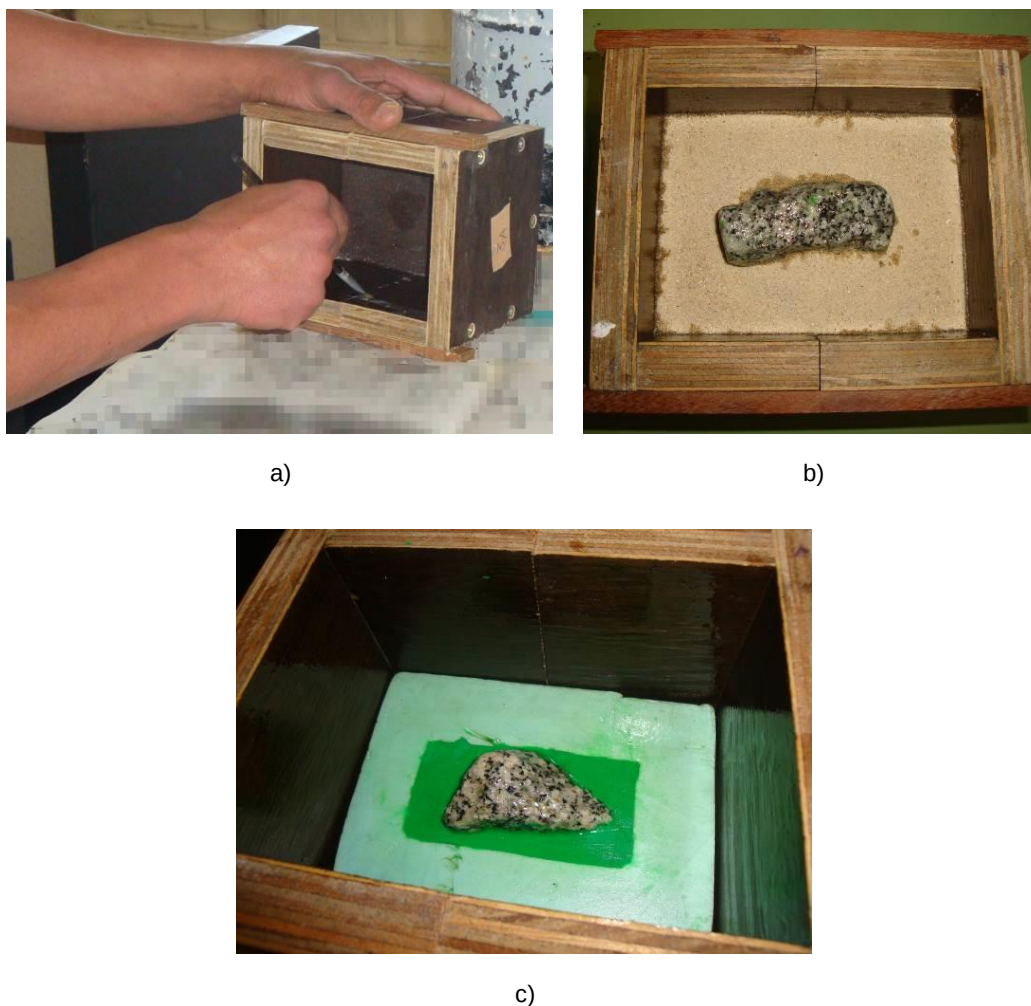


Figura 41 - Preparação da caixa de madeira para os moldes de gesso: a) lubrificação da caixa de madeira com óleo; b) pedra MA inserida em base de areia; c) pedra MP inserida em base de plasticina.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 42 - Preparação do gesso e enchimento das caixas de madeira: a) colocação do gesso em pó na água; b) mistura do gesso com água; c) Enchimento da caixa com base de plasticina; d) Enchimento da caixa com base de areia; e) caixas com gesso líquido.

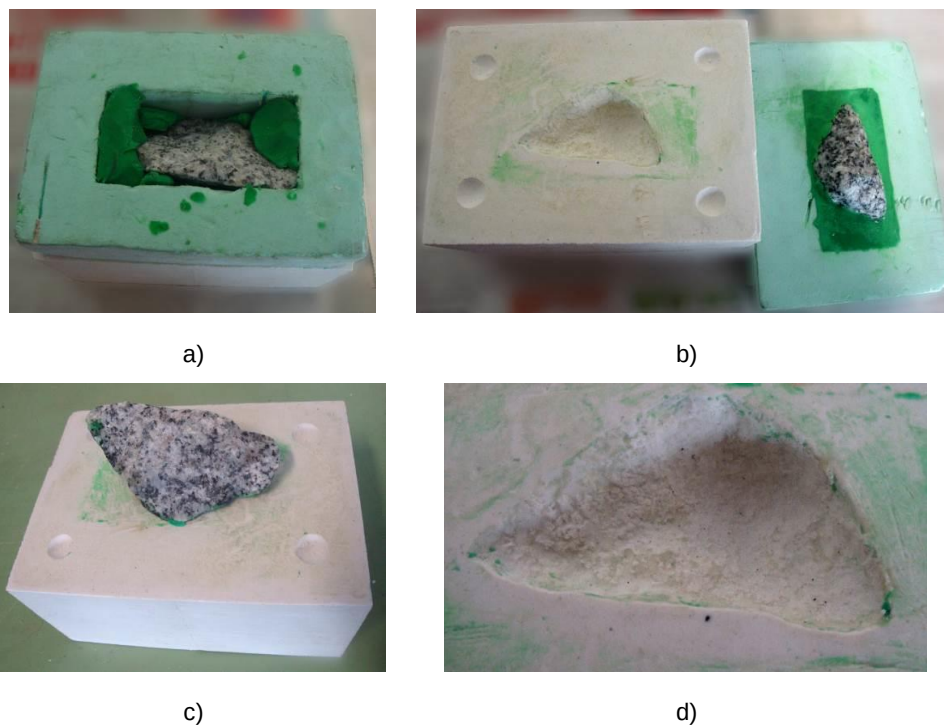


Figura 43 - Negativo de gesso da pedra MP: a) Desmontagem da caixa da pedra MP; b) Negativo em gesso da pedra MP e base de plasticina; c) Pedra MP sobre negativo de gesso; d) Pormenor da impressão da pedra MP no gesso.

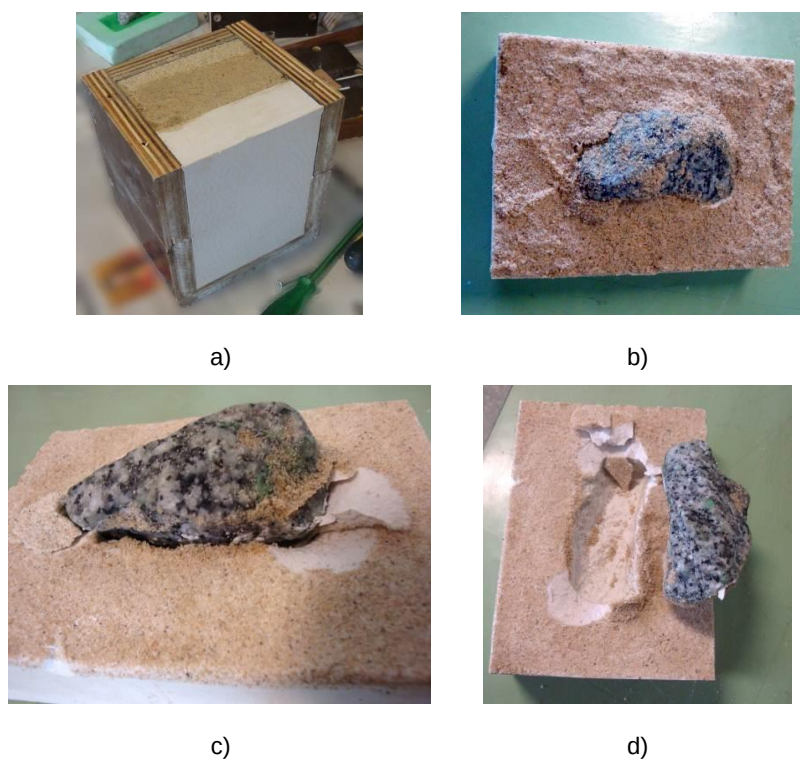


Figura 44 - Negativo de gesso da pedra MA: a) desmontagem da caixa da pedra MA; b) negativo e pedra MA; c) pormenor do negativo quando se retirou a pedra MA - vista 1; d) pormenor do negativo quando se retirou a pedra MA – vista 2.

3.1.2 PROCESSO DE DIGITALIZAÇÃO

Com o *scanner Roland Modela*, digitalizaram-se os quatro negativos de plasticina referentes à pedra I e à pedra II. Uma vez que os quatro moldes preencheram uma área de trabalho inferior à do equipamento, a digitalização foi feita em simultâneo, reduzindo significativamente o número de horas do processo.

Numa fase inicial colocaram-se os moldes na mesa de trabalho e redefiniu-se a área de digitalização a $166,0 \times 139,8 \text{ mm}^2$ (Figura 45). Para a altura mínima da agulha teve-se em conta a espessura dos moldes na base, limitando-se a 2 mm, enquanto para a altura máxima usou-se o ponto mais elevado dos moldes como referência. Uma vez que se pretende obter a projeção das arestas vivas da pedra, a resolução adotada foi de 0,75 mm, que apesar de ser um valor baixo para as capacidades do aparelho, é suficiente para o grau de pormenor exigido. A Figura 45 mostra como os moldes foram colocados na mesa de trabalho do aparelho.

O processo de digitalização demorou cerca de 12 a 13 horas, sendo gerado um ficheiro com a extensão *.PIX pelo *Dr.Picza*, que é representado na Figura 46.

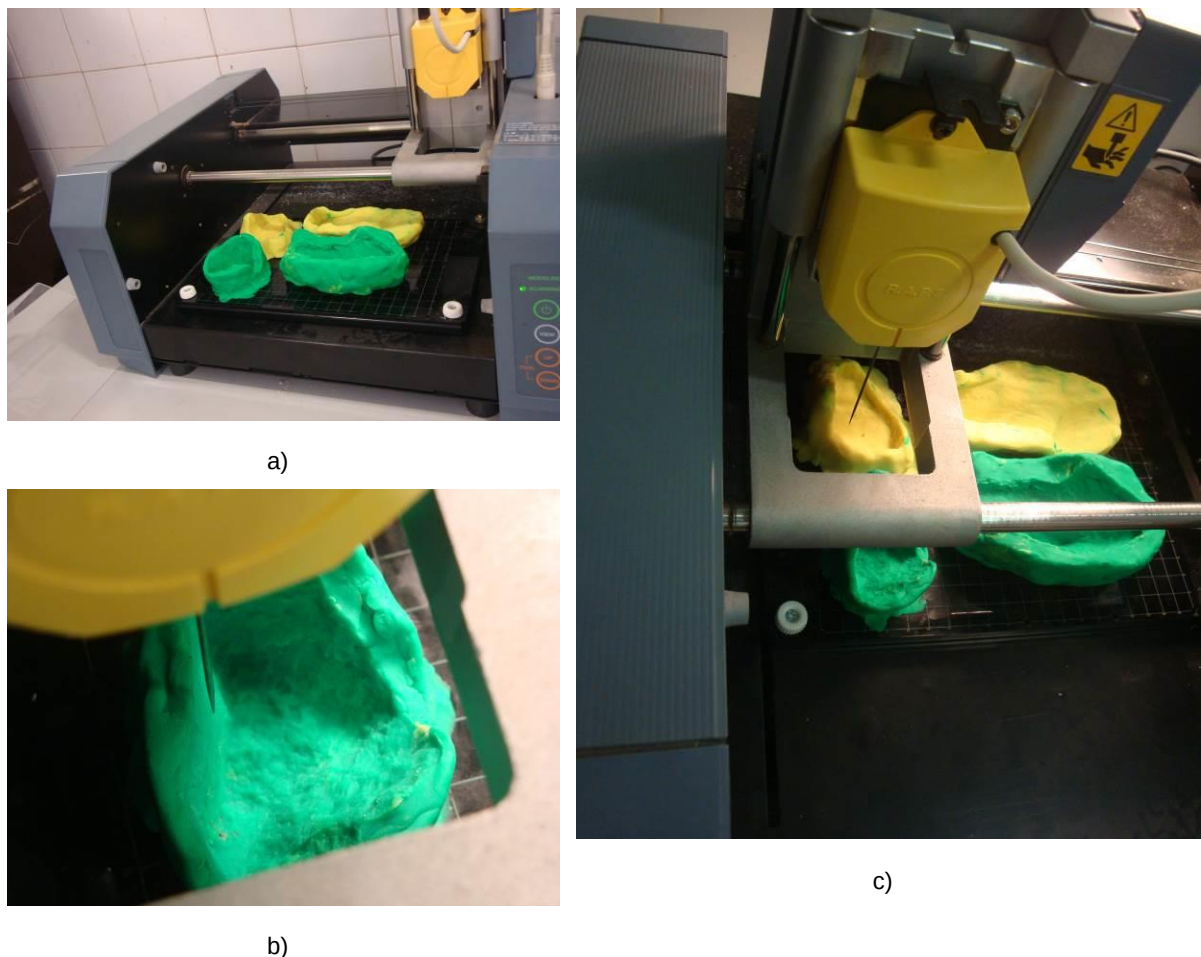


Figura 45 - Negativos de plasticina no *Roland Modela MDX 20*: a) negativos na mesa de trabalho do *Roland Modela MDX 20*; b) pormenor da agulha do scanner – vista 1; c) pormenor da agulha do scanner – vista 2.

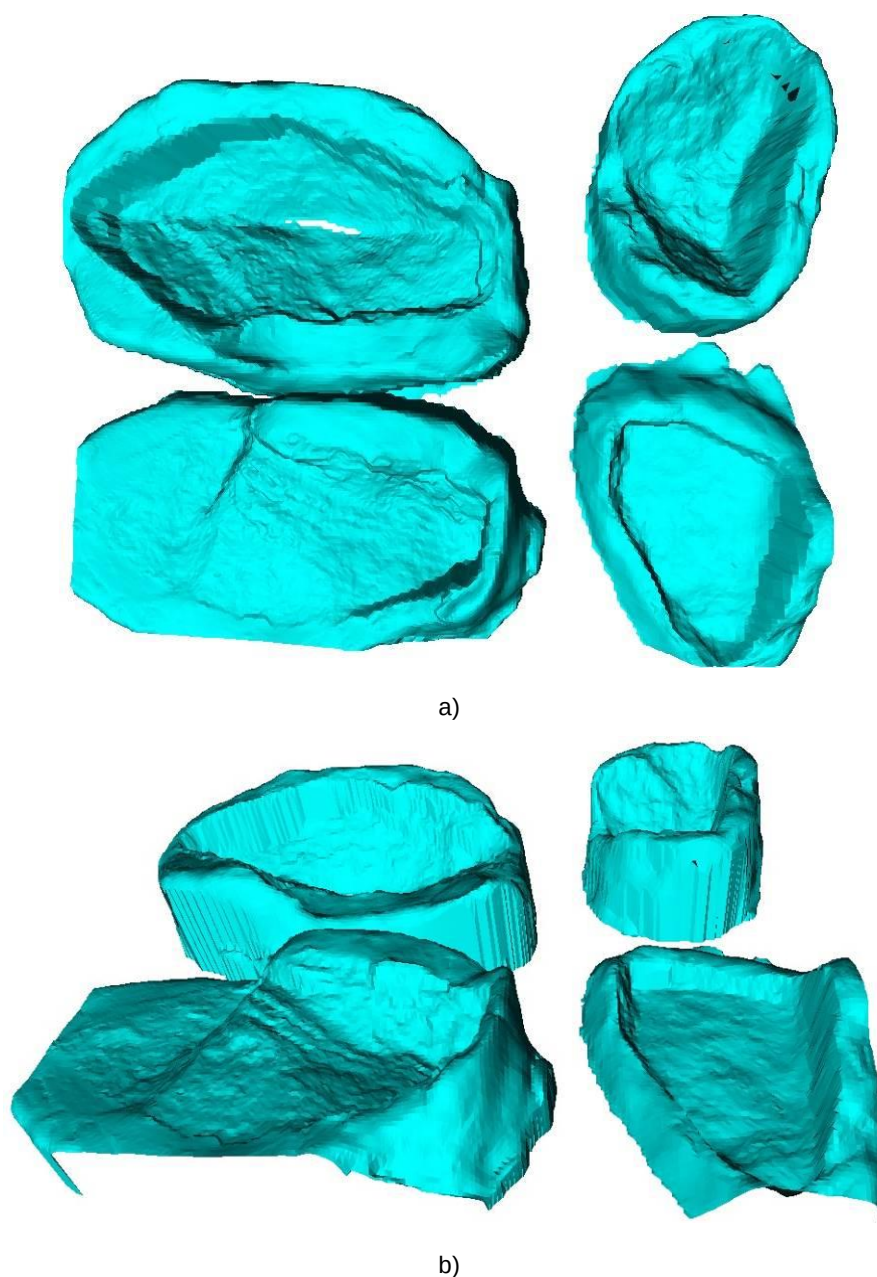


Figura 46 - Resultado da digitalização com *Roland Modela MDX 20* – Imagens obtida no *Dr. Picza*: a) vista 1; b) vista 2.

Como se constata na Figura 46 existe um vazio na digitalização do molde superior esquerdo, o que significa que o valor assumido para a altura mínima foi alto e portanto a agulha não “picou” a plasticina. No entanto, este problema é facilmente resolvido com um *software* de edição de malhas como o *Mesh-mixer*. Apesar de esta operação introduzir um erro na reprodução da forma da peça, este não é de ordem superior ao introduzido pelo uso da plasticina.

3.1.3 RESULTADOS OBTIDOS

Depois de se digitalizar os negativos, estes necessitaram de ser tratados com o intuito de se obter a forma de cada pedra. O tratamento consistiu em: preencher os buracos existentes; encaixar as duas metades da

pedra; remover a malha da plasticina em excesso; dependendo do *software* utilizado, inverter as normais da malha uma vez que a parte digitalizada é um negativo da pedra; e, por fim, unir as duas malhas numa só, para criar a forma da pedra.

Numa primeira instância, exportou-se o ficheiro do *Dr. Picza* para o formato *.STL³, de forma a o tornar compatível com a maior parte dos *softwares* de edição de malhas. De seguida foi utilizado o *software Meshmixer* para preencher o buraco identificado no final do subcapítulo 3.1.2, o que resultou no ficheiro representado na Figura 47.

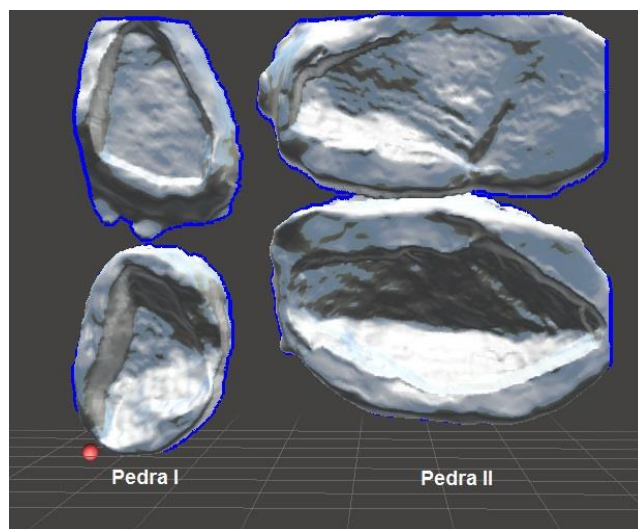


Figura 47 - Negativos da pedra I e II – Imagem adaptada do *Meshmixer*.

Para fazer o encaixe das duas metades, foi utilizado o *software Rhinoceros*, onde por operações manuais de translação e rotação, se fizeram coincidir as malhas. Apesar de existirem algoritmos que aproximam automaticamente as duas metades, estes exigem que haja uma área comum nas duas malhas para facilitar a sua sobreposição, o que não acontece nos negativos digitalizados.

Depois de as duas metades estarem encaixadas como mostra a Figura 48, retiraram-se os excessos correspondentes à plasticina auxiliar.

Para unir as malhas foram utilizados dois procedimentos. Na pedra I foram extraídos todos os pontos da malha e transformados numa nuvem de pontos, que posteriormente foi exportada para o *software “open source” CloudCompare*. Neste *software* todos os pontos foram unidos por uma única malha triangular, resultando na forma final da pedra I, como se pode ver na Figura 49.

No entanto, com este procedimento não se chegou aos mesmos resultados para a pedra II, muito possivelmente por ser uma pedra de maiores dimensões com um número de pontos dez vezes maior que a pedra I. Deste modo foi utilizada a versão *freeware* do *software GOM Inspect*. Trata-se de um *software* que possui ferramentas de edição e análise de dados 3D, nomeadamente para a inspeção de malhas,

³ O *.STL (*STereoLithography*) é um formato de arquivo criado para *softwares* CAD (*Computer-Aided Design*) de estereolitografia, pela 3D Systems. Os arquivos *.STL são suportados pela maioria dos *softwares* de desenho tridimensional e representam a geometria do objeto tridimensional através de uma estrutura triangulada. Os triângulos são definidos por vértices, orientados segundo um vetor normal (ordenados pela regra da mão direita) num sistema de coordenadas cartesianas. Não representa a cor, a textura ou outros atributos do objeto (*STL (file format)*, 2014).

desenvolvido pela empresa GOM *Optical Measuring Techniques* e representado em Portugal pela empresa S3D, que se disponibilizou, a título gracioso, para auxiliar na utilização do *software*.

Neste caso foi utilizado o *.STL da pedra II que resultou do *Rhinoceros* e foram criadas pontes de contacto entre as duas malhas que foram posteriormente preenchidas. Para atenuar as arestas e o “ruído” que resultaram da sobreposição das duas malhas, fez-se um “*Repair*”, que consiste na aproximação da área seleccionada à circundante, através de iterações. O resultado deste método pode ser visualizado na Figura 50 e será discutido no subcapítulo 3.3.

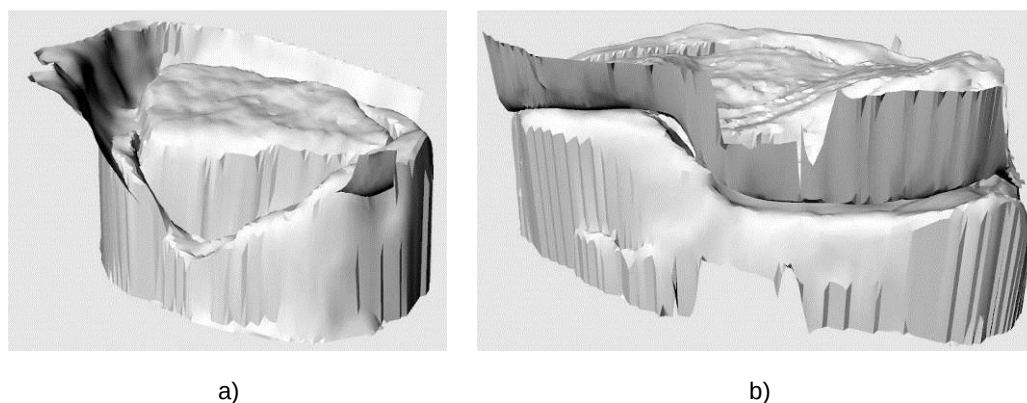


Figura 48 - Encaixe das pedras I e II – Imagens obtida pelo *Rhinoceros*: a) encaixe da pedra I; b) encaixe da pedra II.

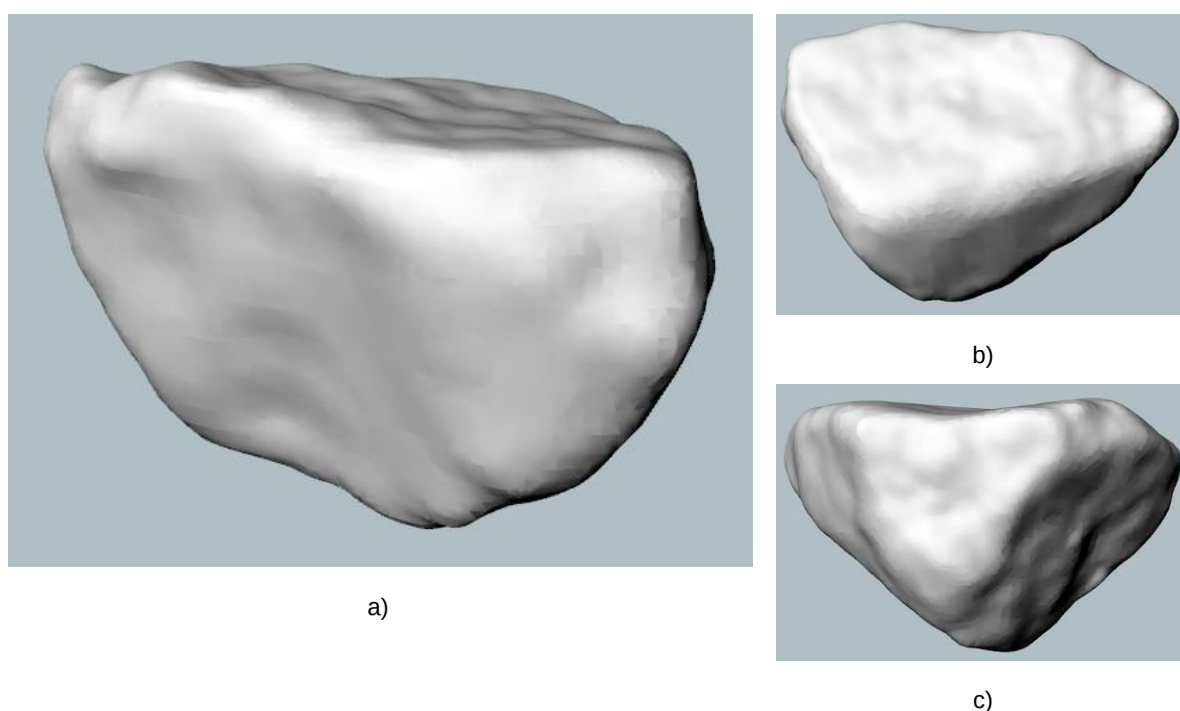


Figura 49 – Forma da pedra I – Imagens obtida pelo *Rhinoceros*: a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3.

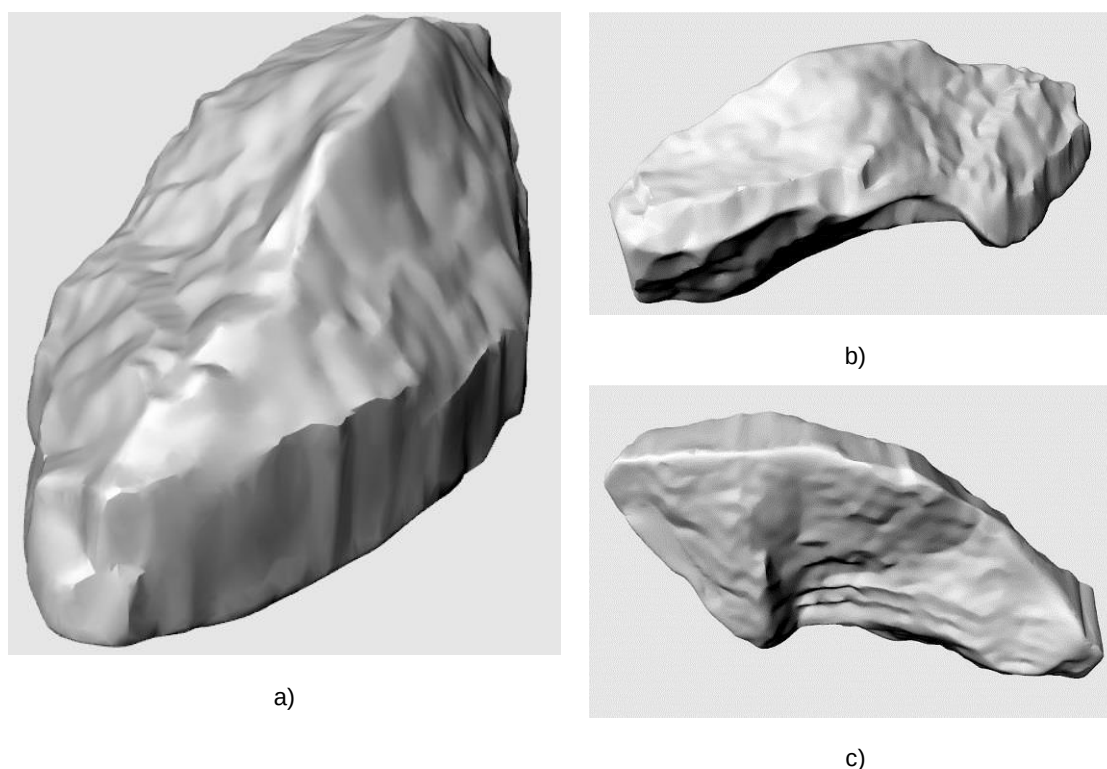


Figura 50 – Forma pedra II – Imagens obtida pelo *Rhinoceros*: a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3.

3.2. UTILIZAÇÃO DO *EXAScan HANDYSCAN 3D* DA *CREAFORM*

Devido à colaboração da empresa *GEOTRILHO*, a título gracioso, neste trabalho, foi possível recorrer a uma ferramenta de digitalização tecnologicamente mais avançada, o *scanner* laser portátil *EXAscan* da *Creaform*, representado na Figura 51. Esta ferramenta é equipada com três câmaras de alta definição, um emissor laser e oito *leds* localizados em torno das câmaras, que permitem digitalizações de grande rigor. O *EXAscan* tem uma resolução de 0,05 mm e uma exatidão superior a 0,04 mm, permitindo digitalizar superfícies com grande detalhe e textura e objetos de pequenas dimensões, como é o caso das pedras de balastro. Entenda-se como exatidão do equipamento, o somatório da exatidão pontual e volumétrica, ou seja, o raio máximo que se desenvolve em torno do ponto real e o máximo de erro acumulado por metro linear digitalizado (*Quality Digest*, 2014).

O *EXAscan* destaca-se por não necessitar de um sistema de referência externo, sendo a sua localização alcançada com a ajuda de alvos retrorrefletores. Trata-se de adesivos que podem ser colocados no objeto ou na área envolvente, formando um padrão irregular com uma distância entre eles de sensivelmente 100 mm. No início do processo os alvos são reconhecidos pelo *scanner* e é gerado um sistema de referência, pelo que importa que a posição destes permaneça constante ao longo da digitalização. Os feixes refletidos pelos alvos são captados pelas câmaras e por triangulação é possível obter a localização do equipamento em tempo real. Assim impõe-se que, à semelhança do que acontece no sistema de GPS, o feixe incida no mínimo em três alvos ao mesmo tempo.



Figura 51 - Equipamento EXAScan da Creaform (Creaform, 2014).

A luz refletida pela superfície digitalizada é também captada pelas câmaras. O *software* integrante do EXAScan, o *VXelements*, transforma-a numa malha de triângulos de grande resolução, que representam o objeto em 3D e em tempo real, guardando a informação num ficheiro *.CSF (Coordinate System File). Após a digitalização, é exportado um ficheiro *.STL pelo *VXelements*, com as faces da malha. O ficheiro criado é importado no *3DReshaper*, *software* da empresa “Hexagon Metrology”, onde cada objeto é guardado no formato *.RSH, extensão associada ao *software*, e em seguida faz-se o processamento dos dados.

Quando é exportado o ficheiro *.STL no *VXelements*, os pontos estão no sistema de coordenadas definido pelo EXAScan. Este equipamento considera o centro de coordenadas coincidente com o centro do equipamento aquando o início da digitalização. No *3DReshaper* pode-se redefinir um novo sistema de coordenadas com a origem no objeto.

Este equipamento apresenta uma grande vantagem para este projeto, pois uma vez que não necessita de artefactos auxiliares como os moldes utilizados anteriormente, as reentrâncias das pedras de balastro não geram problemas.

3.2.1 PROCEDIMENTO

No início foram realizados diversos testes com o equipamento de forma a aferir a viabilidade da solução e a otimizar o processo de digitalização. Deste modo foi escolhida uma pedra da amostra, denominada neste trabalho como “pedra grande”, que foi colocada na mesa de alvos criada pela GEOTRILHO e digitalizada com uma resolução de 0,2 mm. Ao longo do procedimento verificou-se que a luz é refratada pelos quartzitos do granito, criando buracos na malha triangular, nos sítios onde estes minerais se localizavam. Assim, foi necessário proceder a um tratamento com o *spray* de digitalização “*Helling 3D Laserscanning*” que corresponde a uma mistura líquida que contém um grão fino e uniforme, e que depois de secar origina uma camada de pó sobre a superfície da pedra, tornando-a opaca. O pó, apesar de formar uma película pouco espessa, introduz um pequeno erro na medição das dimensões do balastro.

A malha de 0,2 mm pode ser observada na Figura 52, onde é conferido pormenor ao nível da textura rugosa. No âmbito deste trabalho será utilizada a designação “textura rugosa” quando se verifica mais pormenor nas áreas em análise, e “textura lisa” quando tem menos pormenor. Para que o ficheiro criado pudesse ser manipulado facilmente num computador comum, introduziu-se um algoritmo com o intuito de reduzir o número de pontos da malha após a aquisição. Essa ferramenta junta os triângulos de uma superfície com a mesma inclinação num só triângulo de maior dimensão.

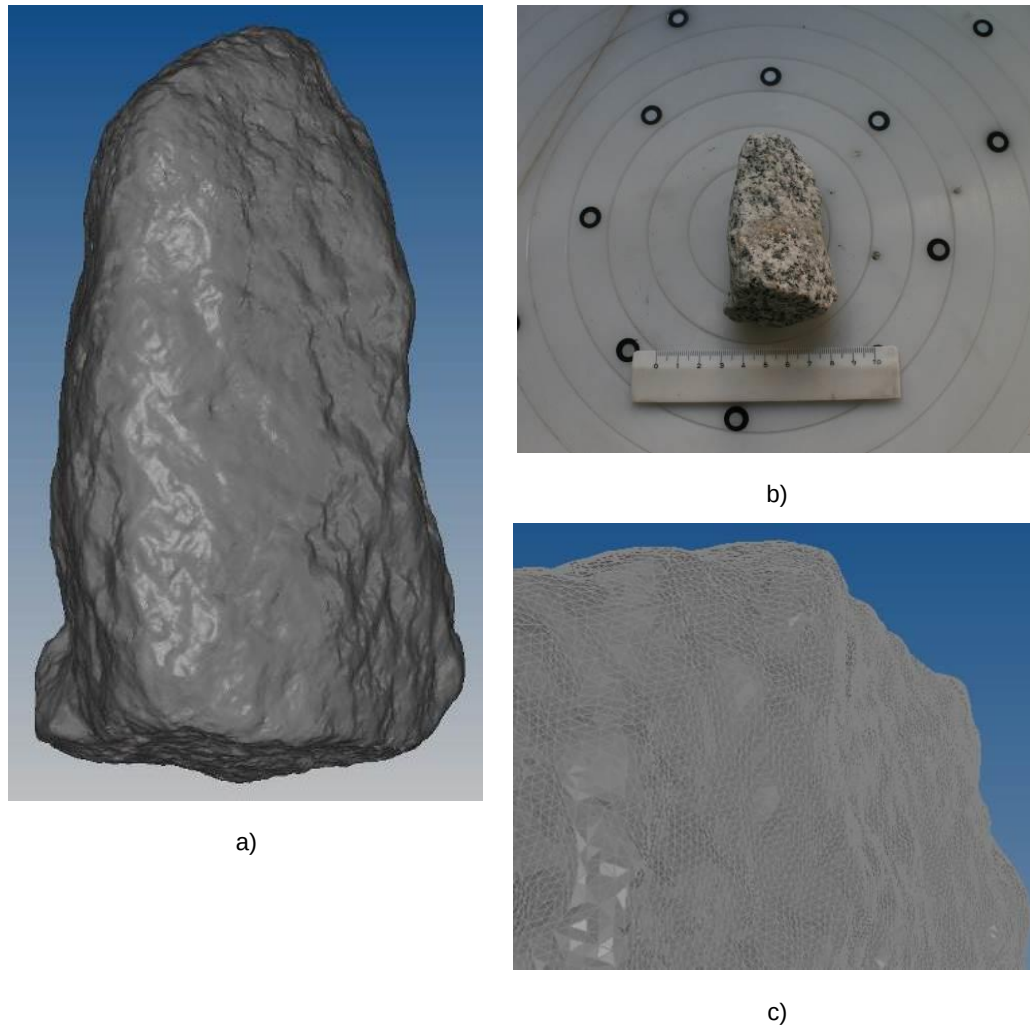


Figura 52 – Formato da pedra grande – Imagens obtida pelo 3DReshaper: a) imagem da pedra grande; b) pedra grande na mesa de alvos criada pela GEOTRILHO; c) pormenor da malha da pedra grande.

Depois de digitalizada a pedra foi impressa à escala real a partir da impressora 3D “*MakerBot – Replicator x2*”. A impressão é feita com *PLA* (ácido polilático), um plástico biodegradável que depois de seco ganha resistência (*MakerBot*, 2014). Como pode ser notado pela Figura 54, o balastro e a sua réplica coincidem a olho nu na sua forma, o que realça novamente a precisão do aparelho.

Uma vez que o processo de digitalização se mostrou bastante moroso, foram testadas novas soluções. Recorreu-se a uma outra pedra, denominada neste trabalho como “pedra média” por ser um pouco menor em termos de volume, que foi digitalizada com três resoluções: 0,2; 0,5; e 1,0 mm. Como esperado, quanto maior é a resolução, mais demorado é o processo, mas em contrapartida maior é o grau de pormenor da malha gerada. Salienta-se que a resolução define o intervalo entre os pontos captados. Desta forma não é de estranhar que seja nas arestas dos objetos que se acumulam mais erros, uma vez que os pontos das arestas podem não se encontrar no limite do intervalo e assim os representados na digitalização são obtidos por interpolação.

Relativamente à duração da digitalização, a resolução de 0,2 mm demora aproximadamente 2 horas; a de 0,5 mm, 1 hora; e a de 1 mm, apenas 30 minutos. Na duração referida já é contabilizado o tempo que o equipamento leva a fazer a calibração da temperatura, da pressão atmosférica e da luminosidade. Esta

calibração é necessária para que o equipamento se adapte às condições do meio e é desejável que estas se mantenham relativamente idênticas ao longo do processo uma vez que, por exemplo, uma mudança de luminosidade introduz ruído na digitalização.

Salienta-se ainda que uma resolução como a de 0,2 mm exige movimentos do *scanner* mais lentos, caso contrário a malha gerada terá “buracos” que correspondem a zonas da superfície onde não foram captados pontos por defeito.

No que concerne ao detalhe da malha para cada resolução, na de 0,2 mm é possível ter perceção da textura rugosa da pedra, como referido anteriormente; já na de 0,5 mm apenas da textura lisa; e por fim, na de 1 mm salienta-se a forma do balastro, tal como pode ser visualizado na Figura 55. Os volumes associados a estas representações são: 35135,5 mm³ para a resolução de 0,2 mm; 35483,1 mm³ para 0,5 mm; e 35335,7 mm³ para a resolução de 1,0 mm. Deste modo constata-se que a diferença entre os volumes para as diferentes resoluções é inferior a 1%.

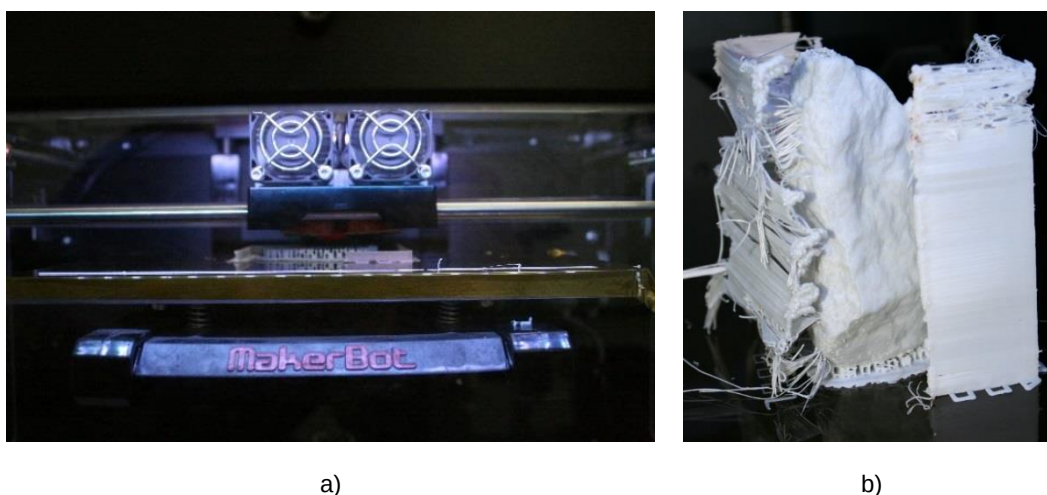


Figura 53 – Impressão da réplica da pedra grande: a) impressora 3D MakerBot; b) impressão com PLA.

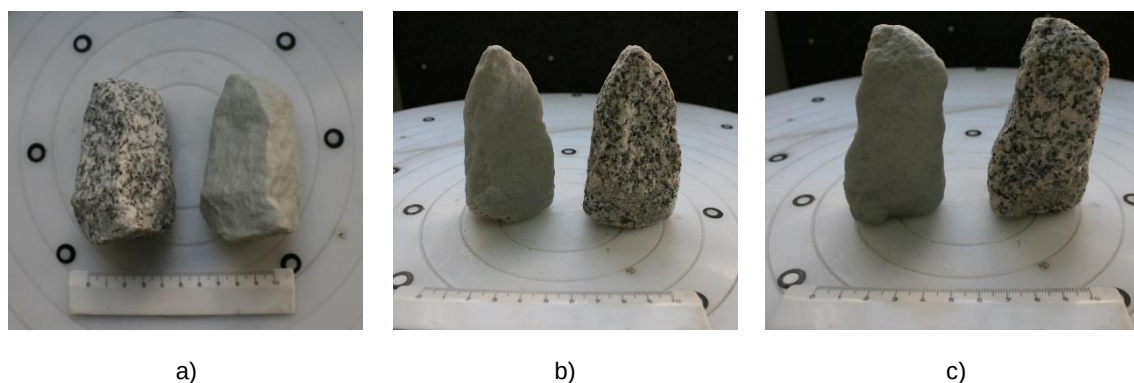


Figura 54 – Comparação da réplica da pedra grande e comparação com a original: a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3.

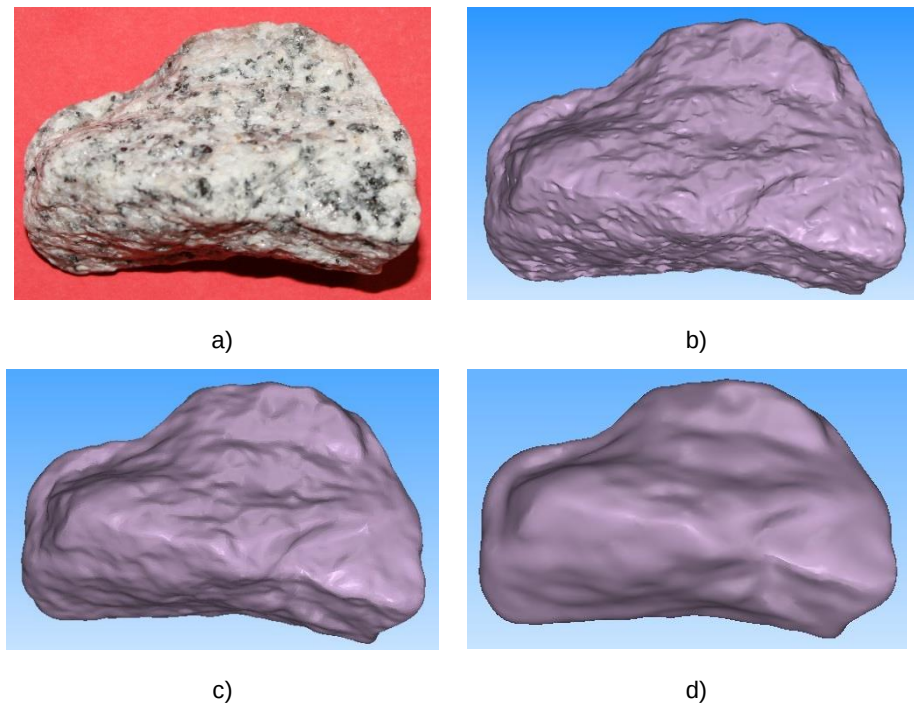
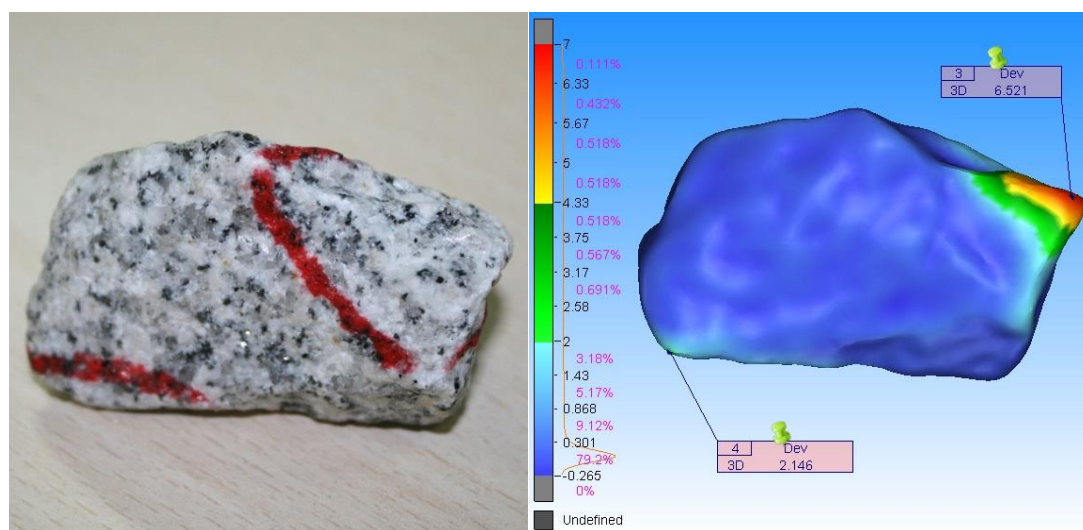


Figura 55 – Pedra média e a variação do pormenor com a resolução de digitalização – Imagens digitais obtidas no *3DReshaper*: a) pedra média; b) resolução de 0,2 mm.; c) resolução de 0,5 mm; d) resolução de 1,0 mm.

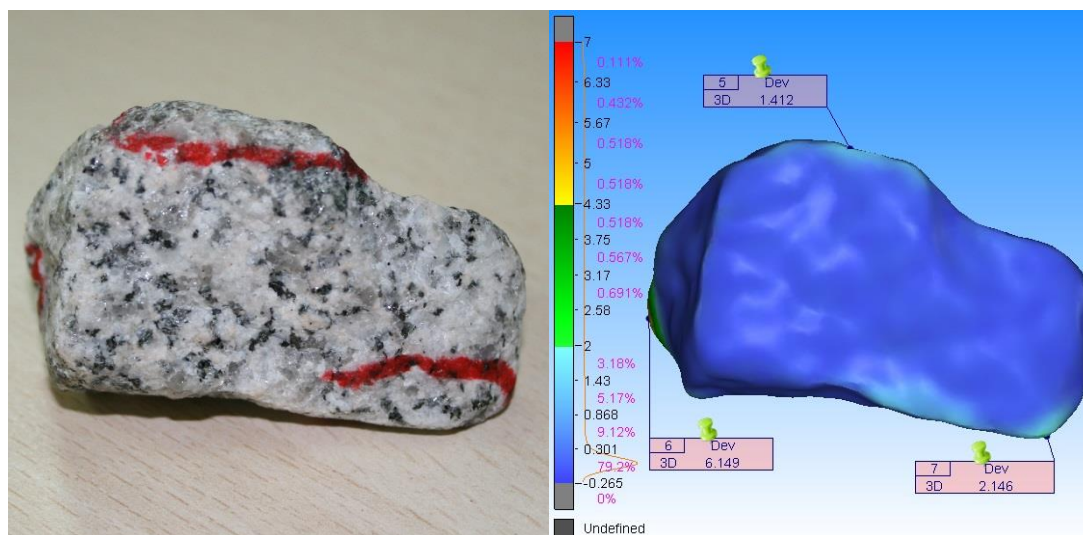
Em seguida a pedra foi erodida manualmente, de modo a simular o efeito dos ensaios de desgaste e de fragmentação e foi novamente digitalizada nas três resoluções. Nesta etapa testou-se se o *scanner* tem exatidão suficiente para detetar as diferenças de volume consequentes da erosão. A pedra original, à semelhança do que aconteceu com a anterior, foi impressa à escala real de modo a se observarem as diferenças que as perdas de volume introduziram. Neste ponto o *3DReshaper* desempenhou um papel crucial pela sua capacidade de inspeção, uma vez que sobrepondo as duas malhas antes e depois da erosão, é possível gerar um mapa de cores com a diferença de cotas entre elas, como se pode ver na Figura 56. A azul estão representadas as áreas que não foram erodidas e a vermelho as que sofreram maior erosão. Nesta figura está também representada a pedra depois da erosão, com as zonas erodidas contornadas a caneta vermelha. O mapa de cores apresenta valores realistas, mesmo numa resolução mais baixa como a de 1,0 mm. Assim, de modo a tornar o procedimento de digitalização viável para um número de pedras considerável e ainda porque o que se pretende é a forma das pedras de balastro, concluiu-se que a resolução de 1,0 mm é suficiente para a digitalização.

No procedimento descrito até agora, cada pedra foi digitalizada por fases, ou seja, depois de ser colocada na mesa de alvos, digitaliza-se a superfície orientada para cima e em seguida roda-se a pedra para digitalizar uma nova superfície. O processo repete-se até se captar toda a pedra. Como resultado obtêm-se três malhas separadas, com uma área comum entre elas, para que o *3DReshaper* possa aproximar todo o conjunto na forma da pedra através do algoritmo “*Best Fit*”. Contudo, para fazer com que o algoritmo convirja, é frequente ter de se aproximar e direcionar as malhas manualmente, o que é trabalhoso. Depois das malhas estarem alinhadas, o comando “*Stitch*” une as malhas numa só, e nas áreas onde convergem as três malhas o comando cria uma nova superfície correspondente à média das superfícies. Para colmatar os erros acumulados, fazem-se várias iterações até que a tolerância do comando “*Stitch*” seja da ordem de grandeza da resolução. Este processo acumula vários erros de edição, dos quais se destacam os erros introduzidos nas arestas de junção das três malhas, que normalmente são muito vincadas, pelo que é necessário aligeirá-las com o “*Smooth*”.

Para melhorar este procedimento, interessava poder digitalizar toda a superfície de cada pedra de uma só vez. Assim, foram criados dois pedestais constituídos por um varão de aço com um diâmetro de sensivelmente 5,0 mm e uma base. Num dos pedestais a base é acrílica e no outro de PVC, tendo sido utilizada a base de PVC. Foram feitos furos de sensivelmente 10 mm de profundidade em todas as pedras com uma broca de 4,0 mm de diâmetro (Figura 57). Realça-se que os furos foram concebidos em faces de pormenor relativamente baixo, de modo a reduzir os erros introduzidos quando estes são “fechados” no *software* de edição. Para a digitalização, a *GEOTRILHO* criou um biombo de alvos (Figura 58) e o comprimento do varão de aço foi condicionado pela distância a que o *scanner* se deve encontrar dos alvos. Uma vez que esta varia de 300 a 450 mm, considerou-se um comprimento de sensivelmente 110 mm para o varão, que em conjunto com a base forma um pedestal de 150 mm.



a)



b)

Figura 56 - Pedra média depois da erosão e mapa de cores que quantifica a erosão sofrida - Imagens digitais obtidas pelo *3DReshaper*: a) vista 1; b) vista 2.



a)



b)



c)



d)

Figura 57 – Furação das pedras e pedestal com base de PVC: a) Engenho de furação; b) Pedra média no pedestal com base de PVC; c) Furação de uma pedra; d) Furo feito na pedra média.

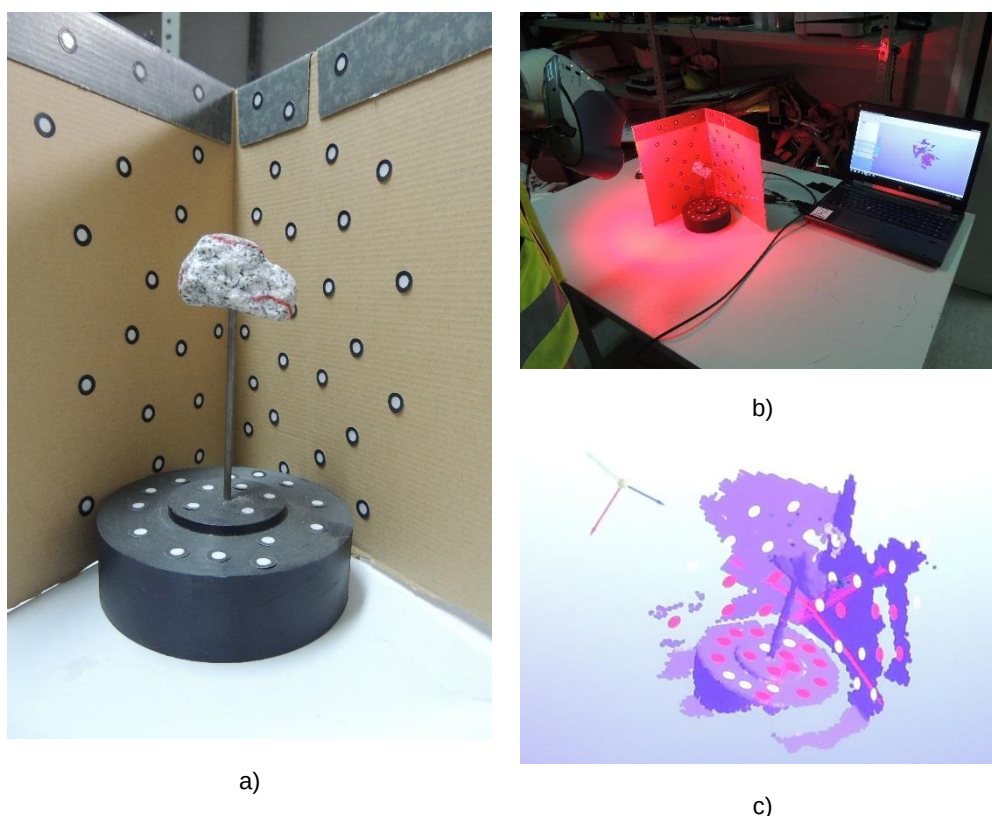


Figura 58 - Digitalização com pedestal de PVC: a) pormenor do biombo de alvos; b) digitalização da pedra média; c) pormenor da imagem gerada durante a digitalização.

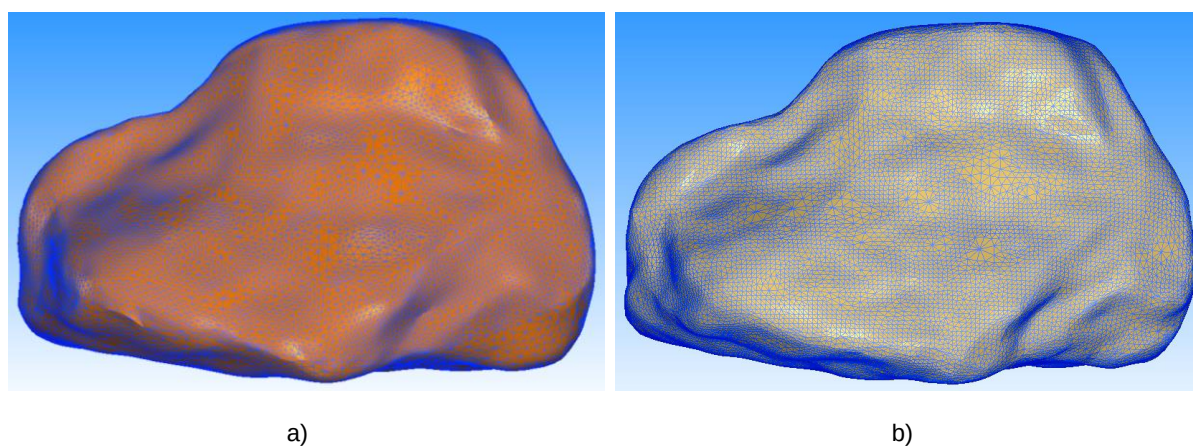


Figura 59 – Comparação da forma da pedra média para a digitalização por fases e digitalização com o auxílio do pedestal – Imagens obtidas pelo 3DReshaper: a) digitalização por fases e pormenor da malha de triângulos reduzida; b) digitalização com o auxílio do pedestal e pormenor da malha de triângulos reduzida.

Na Figura 59 está representada a forma da pedra média digitalizada por fases e a da pedra digitalizada com o auxílio do pedestal, ou seja, captada de uma só vez. As malhas azuis na figura representam as malhas reduzidas de triângulos. A olho nu as figuras apresentam semelhanças, se bem que se assinalam diferentes densidades de triângulos em áreas equivalentes, o que remete para que não sejam exatamente

iguais. No entanto, em termos de volume a pedra da esquerda tem $33784,0 \text{ mm}^3$ e a da direita $35403,2 \text{ mm}^3$, o que equivale a uma diferença de mais de 4,5%. Apesar de não ser uma diferença significativa, mostra que os métodos não conduzem ao mesmo resultado. Na origem desta diferença estão as operações de edição a que a técnica de digitalização por fases está sujeita. A digitalização integral da pedra é considerada mais rigorosa, tendo sido, deste modo, o método adotado. A digitalização com o recurso ao pedestal reduz também o tempo do processo de 30 para 15 minutos, na resolução de 1,0 mm. A este ganho de produtividade acresce o menor tempo de edição do modelo.

3.2.2 RESULTADOS OBTIDOS

As pedras I e II foram novamente digitalizadas, desta vez com o *EXAscanner*. Como já foi referido, adotou-se uma resolução de 1,0 mm. Para que as pedras pudessem ser digitalizadas com recurso ao pedestal foram feitos furos, como é exibido na Figura 60.



Figura 60 - Furo das pedras I e II: a) furo da pedra I; b) pedra I no pedestal de PVC – vista de cima; c) furo da pedra II; d) pedra II no pedestal de acrílico – vista de frente.

Digitalizadas as pedras, o ficheiro gerado foi importado para o *3DReshaper* onde se procedeu ao seguinte tratamento:

- “fecharam-se” todos os buracos do objeto, tornando-o num sólido com volume;
- eliminou-se algum “ruído”, erros nítidos de digitalização e picos anómalos à forma do balastro;
- executou-se um ligeiro “Smooth”, função que permite regularizar a superfície da malha;
- calculou-se o volume;
- por fim, exportou-se para um novo ficheiro *.STL para que o ficheiro possa ser visto noutros programas.

Os resultados obtidos são representados na Figura 61 e na Figura 62.

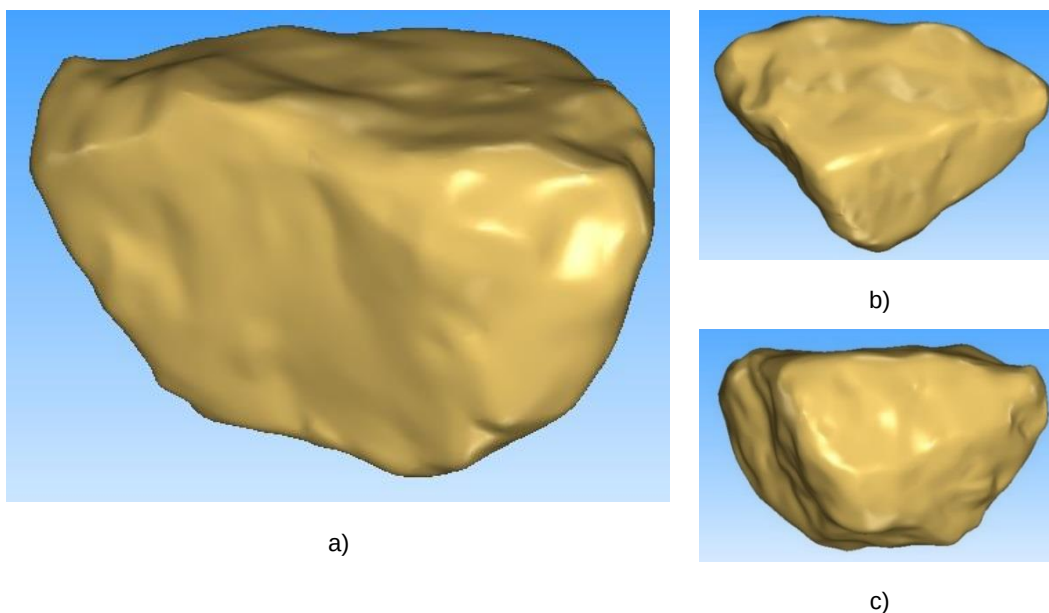


Figura 61 – Forma da pedra I – Imagens obtida pelo 3DReshaper: a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3.

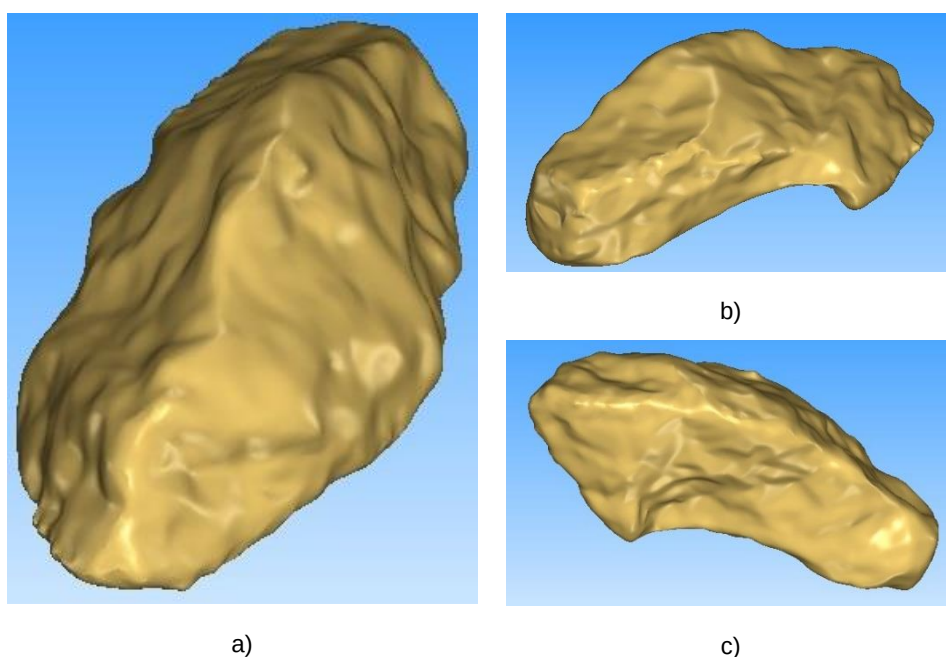


Figura 62 – Forma da pedra II – Imagens obtidas pelo 3DReshaper: a) vista 1; b) vista 2; c) vista 3.

3.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Nas secções anteriores descreveram-se dois métodos de digitalização distintos: o *scanner Roland Model MDX-20* do FabLab e o *EXAscan HandyScan 3D* da empresa *GEOTRILHO*. Salientaram-se algumas características dos dois procedimentos como a duração da digitalização, trabalho envolvido na preparação das partículas de balastro, manipulação dos ficheiros gerados e os erros acumulados.

Nesta secção é feita uma análise comparativa dos resultados obtidos anteriormente para as pedras I e II. Estas pedras foram escolhidas por terem uma forma distinta, sendo que a pedra I tem uma forma cúbica regular e a pedra II uma forma alongada irregular e com várias reentrâncias, como se observa na Figura 63.

Pela Figura 64 e Figura 65 verifica-se que, a olho nu, as malhas obtidas para a pedra I pelos dois métodos são semelhantes, e os seus volumes diferem pouco. Já para a pedra II, a Figura 66 e a Figura 67 mostram que as formas são um pouco diferentes e os volumes das duas malhas variam mais de 12%.

De modo a verificar o que acabou de ser referido, fez-se um mapa de cores semelhante ao do subcapítulo 3.2, todavia como ao longo deste projeto nem sempre foi possível recorrer ao *3DReshaper*, foi utilizada a versão *freeware* do software *GOM Inspect*. Deste modo obtiveram-se os ficheiros que se apresentam na Figura 68 e na Figura 69.

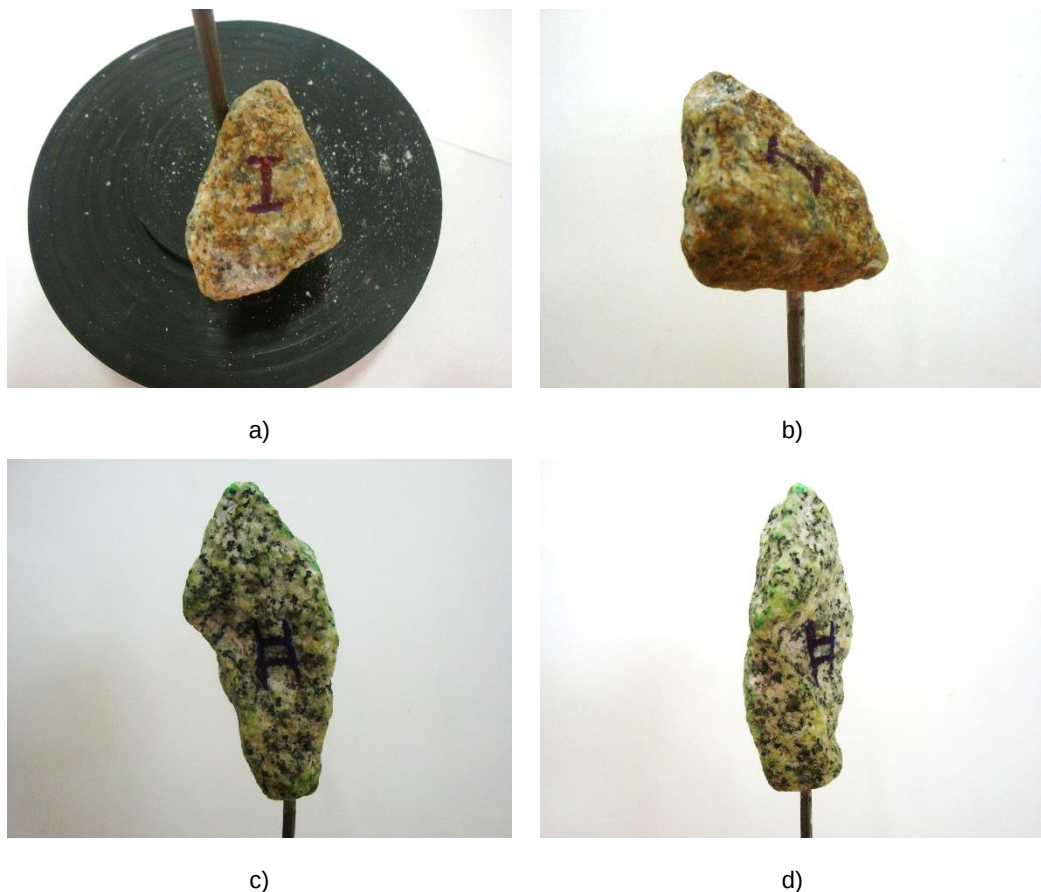


Figura 63 - Diferentes vistas das pedras I e II: a) pedra I - vista 1; b) pedra I - vista 2; c) pedra II - vista 1; d) pedra II - vista 2.

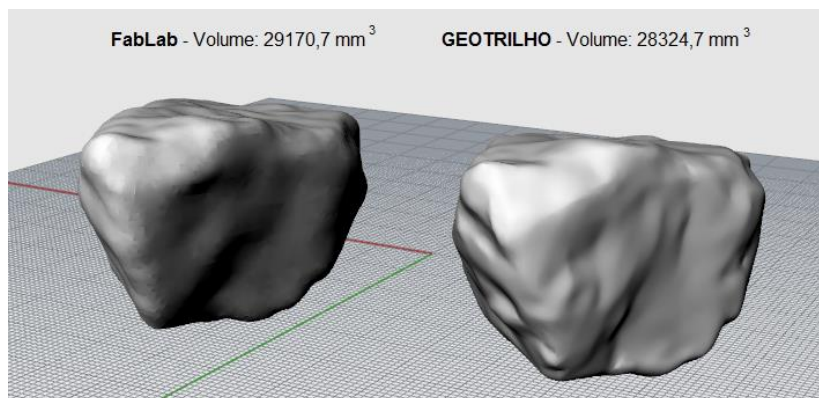


Figura 64 - Pedra I: comparação da forma e volume obtidos no FabLab e na *GEOTRILHO* - Imagem obtida pelo *Rhinoceros*.

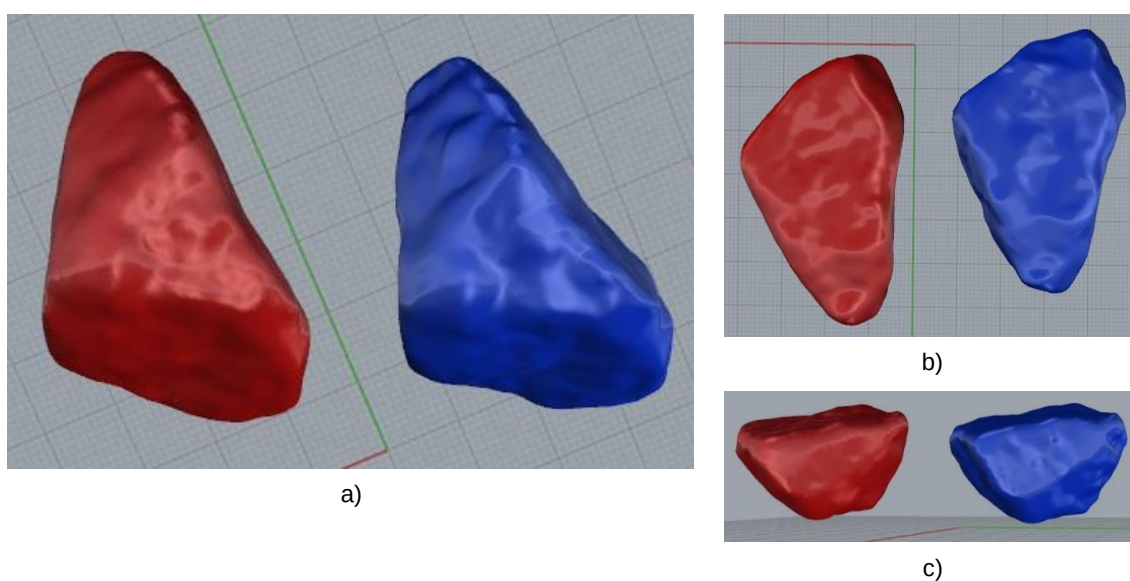


Figura 65 – Comparação da pedra I - Imagens obtida pelo *Rhinoceros*: a vermelho a pedra obtida no FabLab e a azul a obtida na *GEOTRILHO*: a) vista inferior; b) vista superior; c) vista de lado.

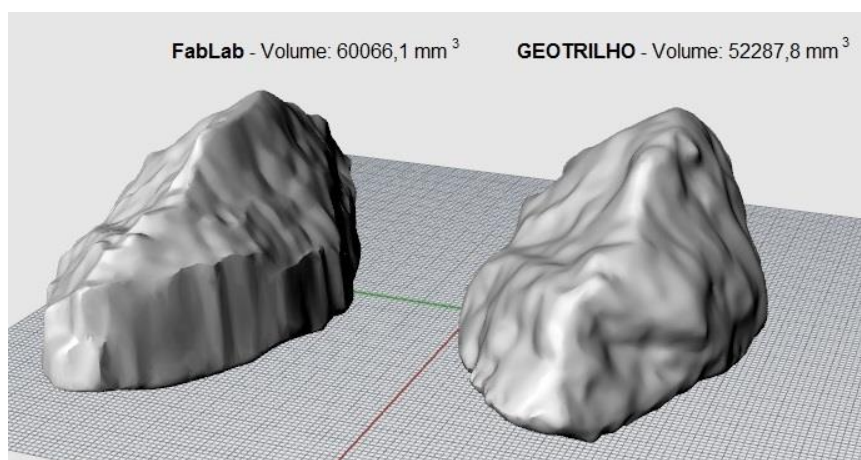


Figura 66 - Pedra II: comparação da forma e volume obtidos no FabLab e na *GEOTRILHO* - Imagem obtida pelo *Rhinoceros*.

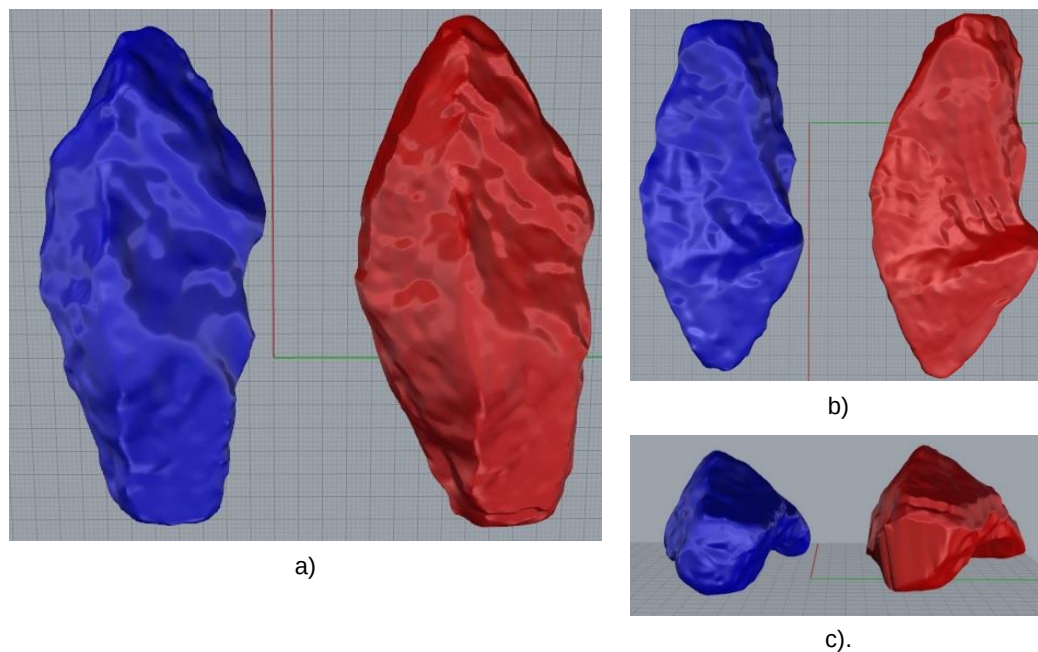


Figura 67 - Comparação da pedra II - Imagens obtida pelo *Rhinoceros*: a vermelho a pedra obtida no FabLab e a azul a obtida na *GEOTRILHO*: a) vista superior; b) Vista inferior; c) vista de trás.

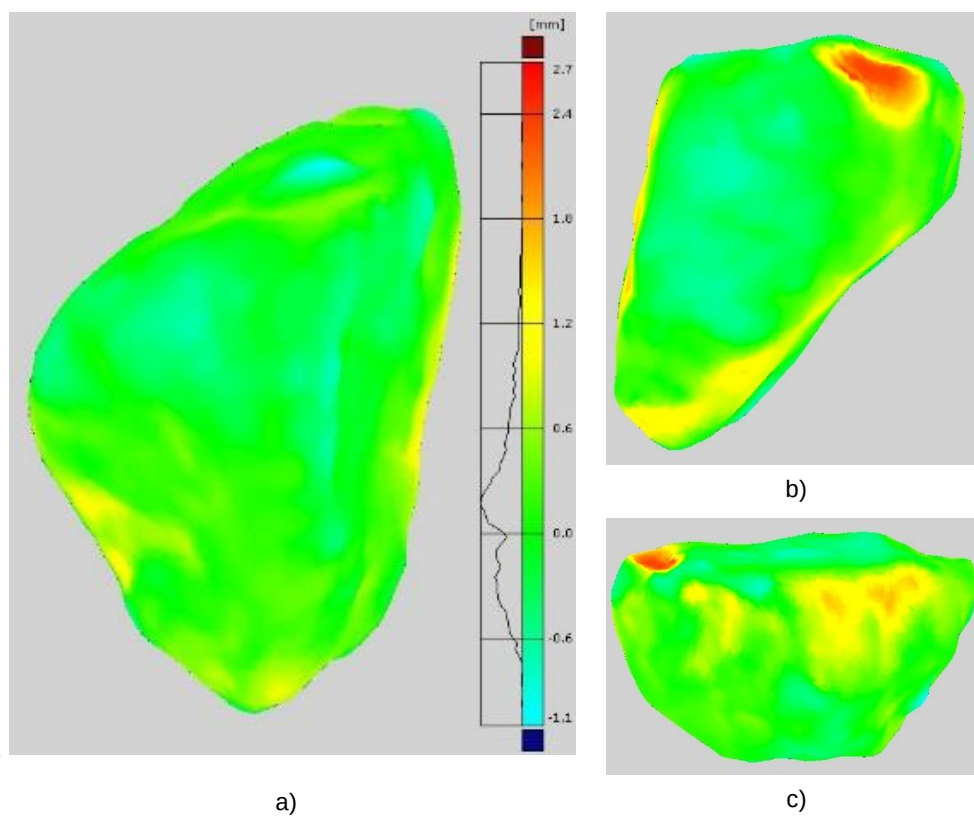


Figura 68 - Mapa de cores para comparação da pedra I – Imagem obtida pelo *GOM Inspect*: a) vista inferior; b) vista superior; c) vista de lado.

Na pedra I verifica-se que a maior diferença entre as duas malhas é de aproximadamente 2,7 mm. Na Figura 68a) é apresentada a preto uma linha de distribuição da diferença das cotas das duas malhas que são comparadas. Neste caso, grande parte da superfície varia entre os -0,6 e os 0,6 mm. Em contrapartida, na pedra II existe uma diferença máxima que ronda os 4,5 mm, sendo que a maior percentagem de superfície varia entre -1,0 e 3,0 mm. E deste modo fica comprovado que no caso da pedra II os dois métodos levaram a resultados diferentes, o que em parte já se previa uma vez que no *scanner Roland Modela* algumas reentrâncias não foram captadas.

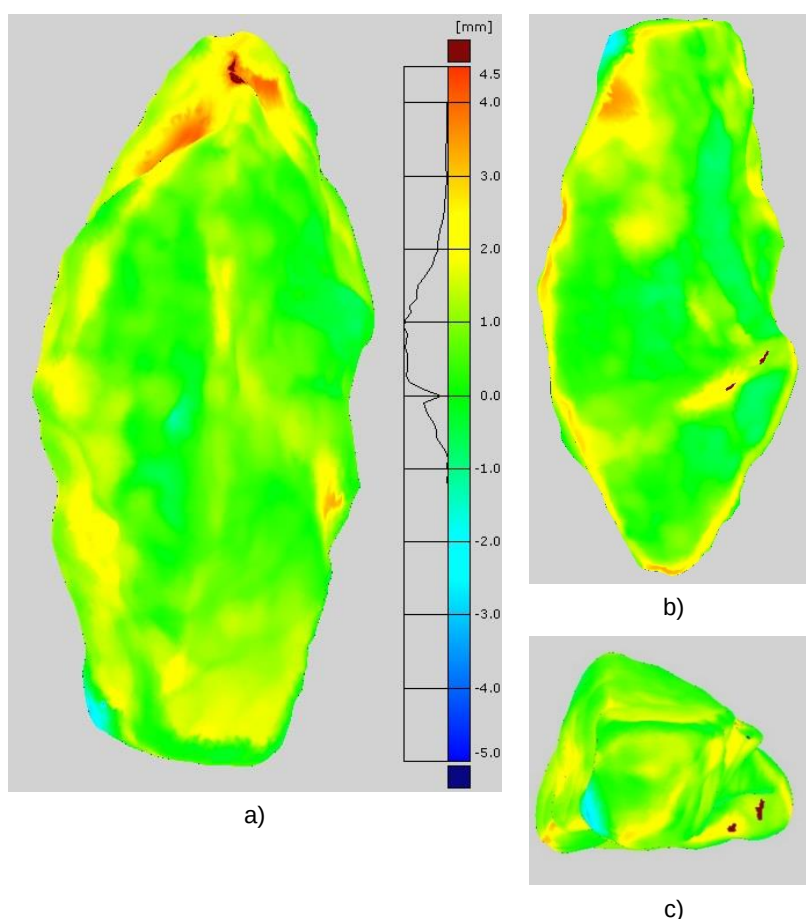


Figura 69 - Mapa de cores para comparação da pedra II – Imagem obtida pelo *GOM Inspect*: a) vista superior; b) vista inferior; c) vista de trás.

Para averiguar qual o equipamento a utilizar para a elaboração da biblioteca de pedras, foi feito um quadro resumo com as características que mais se destacaram ao longo deste estudo nas duas metodologias. Pela análise do Quadro 3 é fácil constatar que o *EXAscanner* é o equipamento mais indicado quando se pretende digitalizar uma quantidade considerável de pedras de balastro, sendo portanto o método adotado.

Quadro 3 – Resumo das características dos dois processos de digitalização.

Característica	<i>Roland Modela MDX-20</i>	<i>EXAscan HandyScan 3D</i>
Resolução do Equipamento	0,05 mm	0,05 mm
Tempo de digitalização por pedra	6,5 horas	15 minutos
Tempo de preparação das pedras/moldes	elevado	baixo
Tempo de edição das malhas	elevado	baixo
Especificidades	Agulha vertical que não digitaliza reentrâncias	Tratamento da pedra com <i>spray</i> de digitalização

4

MODELOS DAS PARTÍCULAS DE BALASTRO

No capítulo anterior foram analisadas duas técnicas para obter a forma das partículas de balastro, tendo-se concluído que a digitalização com o *EXAscan*, com uma resolução de 1,0 mm e com recurso ao pedestal é a solução mais viável. Neste capítulo será descrita a recolha e modelação de exemplares duma amostra de balastro ferroviário para posteriormente integraram a biblioteca de pedras.

4.1. AMOSTRAGEM

O balastro utilizado neste estudo provém duma pedreira certificada pela REFER, ou seja, cumpre os requisitos estipulados no IT.GEO.001 (2008). No entanto, para garantir que as propriedades exibidas são as requeridas, foi recolhida uma amostra representativa com cerca de 60 kg, foi feita a sua peneiração (Figura 70) e determinados os índices de achatamento e de forma.

Como se verifica na Figura 71, a amostra está dentro do limite de “aceitação sem restrições” do fuso do balastro convencionado pela instrução técnica da REFER.



Figura 70 - Peneiração da amostra.

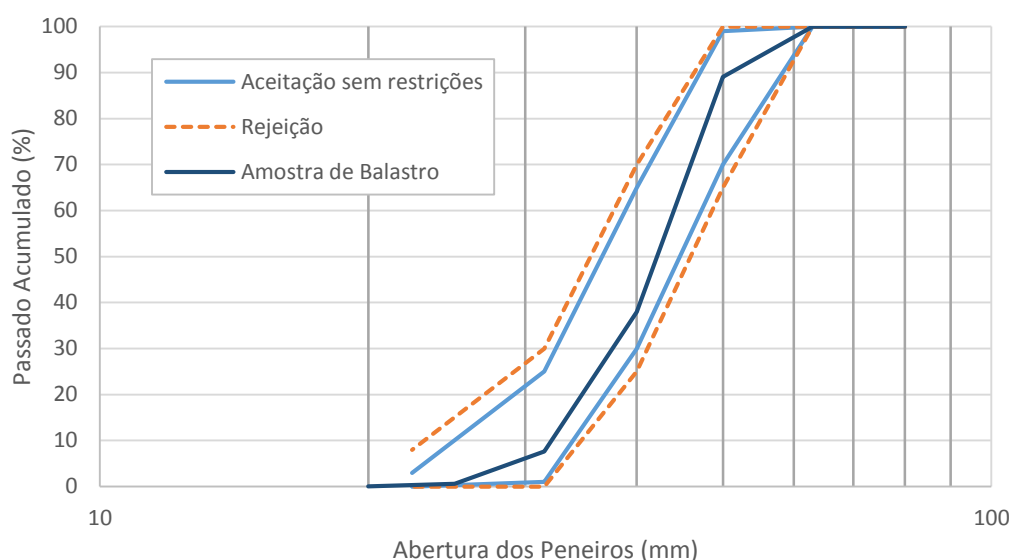


Figura 71 - Curva granulométrica da amostra de balastro.

Os índices de achatamento e de forma foram determinados segundo o que está referido no subcapítulo 2.2.2 e as folhas de ensaio estão em anexo. Para o índice de achatamento, de acordo com a equação (11), obteve-se o valor de 5% e para o índice de forma, segundo a equação (12), o valor de 6%. Uma vez que os limites de “aceitação sem restrições” são de 15% e 10%, respetivamente, conclui-se que o balastro está em conformidade com o IT.GEO.001 (2008).

$$FI = \frac{M_2}{M_1} \times 100 = 5\% \quad (11)$$

$$SI = \frac{M_2}{M_1} \times 100 = 6\% \quad (12)$$

Desta amostra foram escolhidas vinte e duas pedras para modelação, onde se inserem as pedras I e II mencionadas no Capítulo 3.

4.2. CARACTERÍSTICAS E MODELOS DAS PARTÍCULAS SELECIONADAS

Da amostra de balastro foram escolhidas dez pedras da fração 31,5 a 40,0 mm, que foram referenciadas de “a” a “j”, e mais dez da fração 40,0 a 50,0 mm, numeradas de “1” a “10” (Figura 72). À primeira fração juntaram-se também as pedras “I” e “II”.

Antes de serem digitalizadas, foi medida a grandeza que se designou neste trabalho por “volume real”, com recurso a provetas de precisão de 5 e 10 cm³, consoante a dimensão das partículas (Figura 73a). Para este procedimento, deixaram-se saturar as pedras numa tina de água durante um dia. Depois, encheu-se a proveta até um dado volume fixo, sendo em seguida colocada a pedra. A diferença entre o volume fixo e o novo volume medido indica o volume real da pedra. Todas as pedras foram medidas mais do que uma vez, para confirmar o seu volume.

Depois de secas na estufa, as pedras foram pesadas numa balança com precisão de 0,01 gramas (Figura 73b).



Figura 72 - Pedras de "a" a "j" e de "1" a "10".



a)



b)

Figura 73 - Instrumentos de medição utilizados: a) proveta com precisão de 5 cm³; b) balança com precisão de 0,01 g.

Para digitalizar as pedras com recurso ao pedestal, foi necessário furá-las, como já foi descrito no capítulo 3. Durante o processo de furação a pedra “b” ficou destruída, reduzindo o número de partículas a estudar para vinte e uma. De modo a verificar a diferença de massa que o furo introduziu, todas as pedras voltaram a ser medidas depois da furação.

Foram medidos os índices de achatamento e de forma (Figura 74) das vinte e uma partículas para averiguar se se trata de pedras achatadas ou não achatadas, cúbicas ou não cúbicas. Recorrendo às equações (13) e (14), os índices assumem, para algumas partículas, valores bem diferentes dos obtidos no subcapítulo 4.1. e o índice de forma ultrapassa largamente o limite de “aceitação sem restrições”. No entanto, o critério não foi escolher um conjunto de partículas representativas de toda a amostra, mas sim compilar as diferentes formas que o balastro assume. Nos programas de geração de partículas pode-se gerar amostras com os índices pretendidos, adicionando diferentes quantidades de cada partícula.

$$FI_{21partículas} = \frac{M_2}{M_1} \times 100 = 9\% \quad (13)$$

$$SI_{21partículas} = \frac{M_2}{M_1} \times 100 = 15\% \quad (14)$$



Figura 74 - Determinação da forma da pedra 2 com paquímetro.

O próximo passo foi proceder à digitalização das partículas e verificar o volume da malha de cada pedra, denominado neste trabalho por “volume digital”. O modelo das pedras pode ser visto nas figuras abaixo.

No Quadro 4 são referidas as características descritas até agora neste capítulo. Como se pode verificar os volumes reais e digitais são da mesma ordem de grandeza, e o furo introduz uma diferença de massa inferior a 0,5%. Observa-se também que grande parte das pedras escolhidas são cúbicas e não achatadas.



Figura 75 - Pedras e modelos obtidos no 3DReshaper: a) pedra e modelo “I”; b) pedra e modelo “II”.

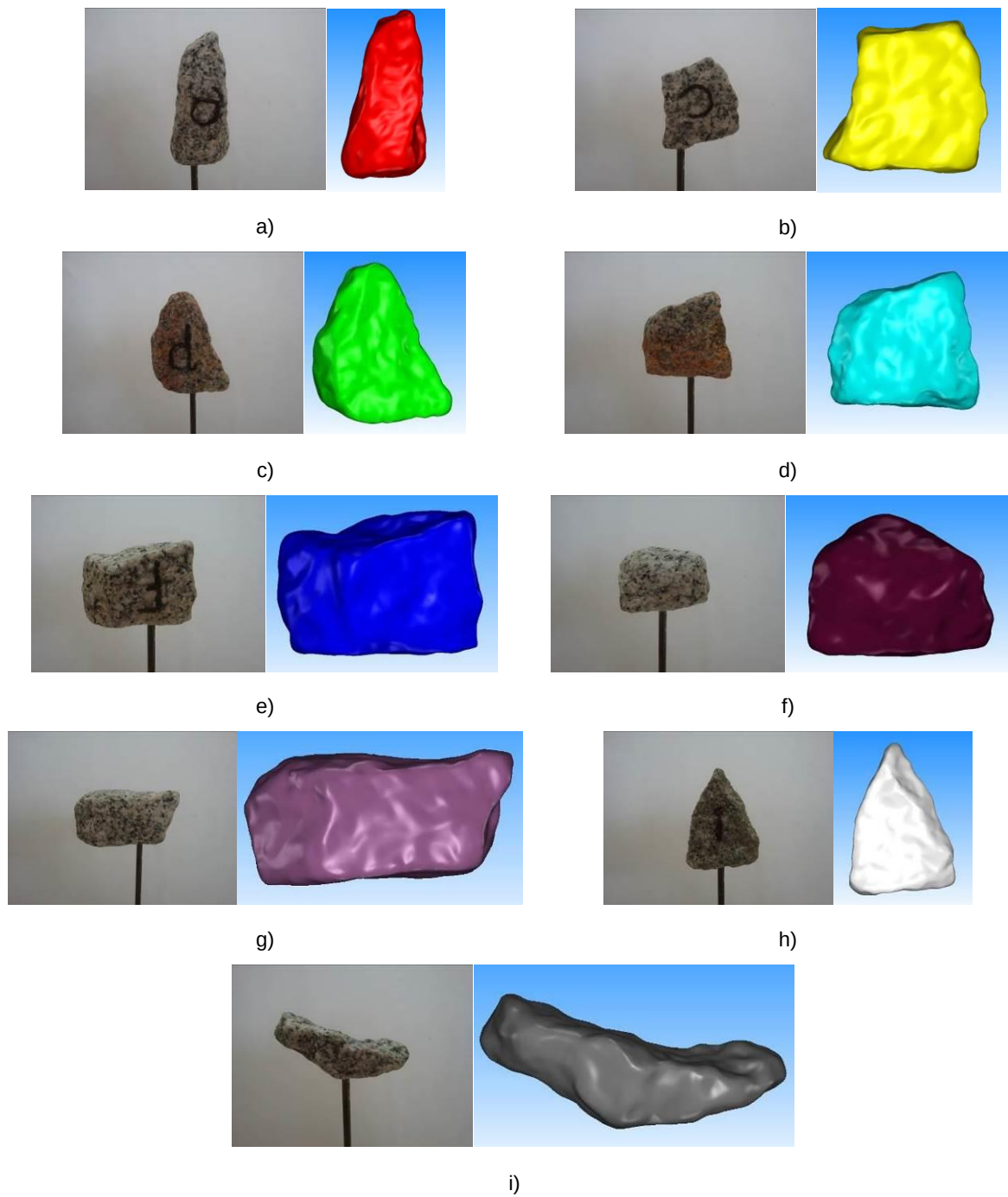


Figura 76 – Pedras e modelos obtidos no 3DReshaper de "a" a "j": a) pedra e modelo "a"; b) pedra e modelo "c"; c) pedra e modelo "d"; d) pedra e modelo "e"; e) pedra e modelo "f"; f) pedra e modelo "g"; g) pedra e modelo "h"; h) pedra e modelo "i"; i) pedra e modelo "j".

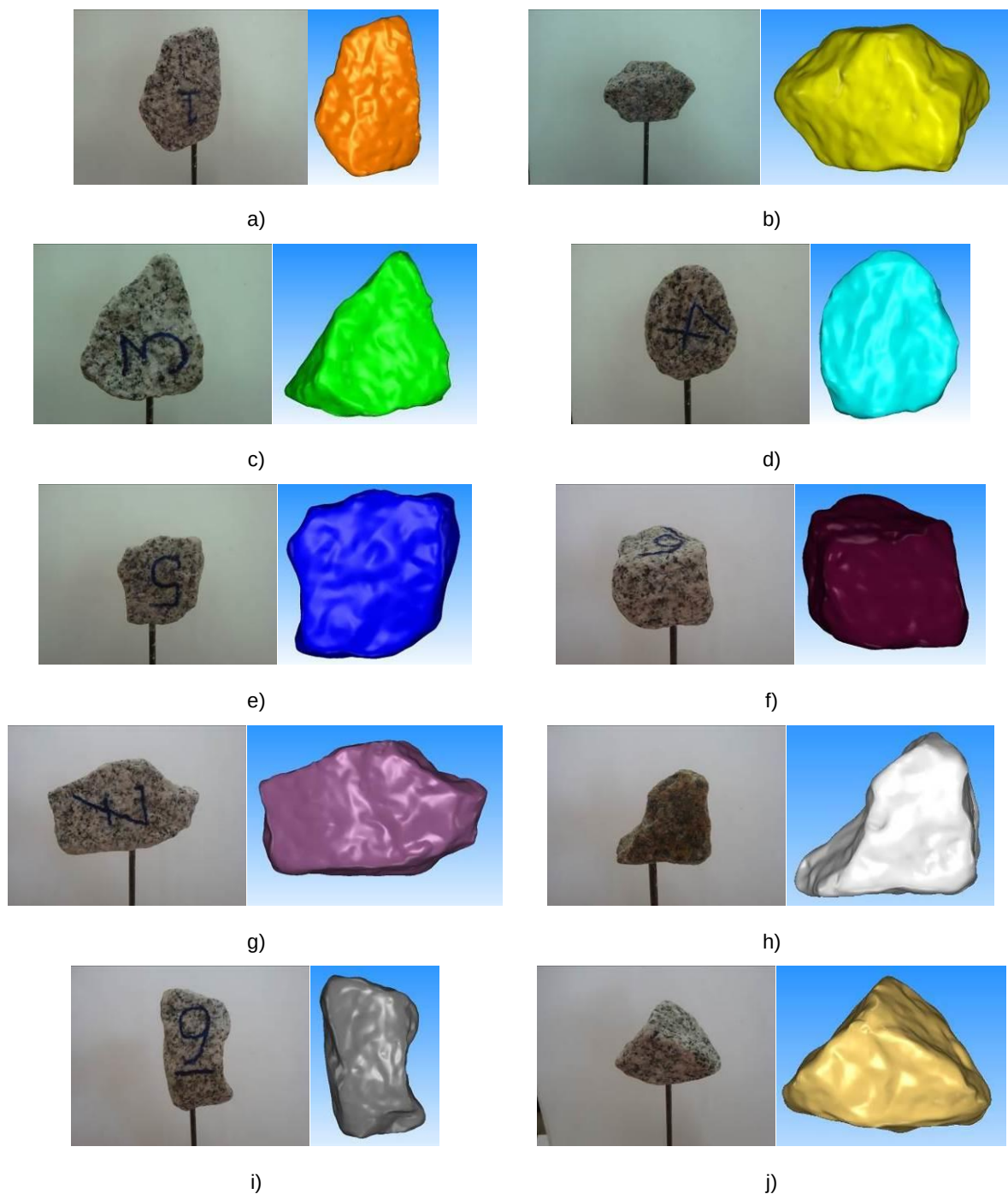


Figura 77 - Pedras e modelos obtidos no *3DReshaper* de "1" a "10": a) pedra e modelo "1"; b) pedra e modelo "2"; c) pedra e modelo "3"; d) pedra e modelo "4"; e) pedra e modelo "5"; f) pedra e modelo "6"; g) pedra e modelo "7"; h) pedra e modelo "8"; i) pedra e modelo "9"; j) pedra e modelo "10".

Quadro 4 - Características das partículas selecionadas.

Pedra	V _{pedra} (cm ³)	V _{digital} (cm ³)	M _{inicial} (g)	M _{após furação} (g)	Forma da Pedra	Achatamento
1	35	37,1	94,22	93,71	Não cúbica	Achatada
2	67	68,0	176,57	176,16	Cúbica	Não Achatada
3	55	54,2	140,86	140,44	Cúbica	Não Achatada
4	30	32,5	84,32	83,87	Cúbica	Achatada
5	22	24,6	63,46	63,1	Não cúbica	Não Achatada
6	55	55,8	145,29	144,59	Cúbica	Não Achatada
7	69	70,9	182,69	182,33	Não cúbica	Não Achatada
8	50	47,3	123,56	123,22	Cúbica	Não Achatada
9	90	91,1	237,40	236,93	Cúbica	Não Achatada
10	68	69,4	179,15	178,64	Cúbica	Não Achatada
a	35	35,9	90,69	90,07	Cúbica	Não Achatada
c	15	16,7	42,42	41,75	Não cúbica	Achatada
d	40	43,1	110,13	109,68	Cúbica	Não Achatada
e	30	30,0	75,44	74,99	Cúbica	Não Achatada
f	42	40,2	103,3	102,74	Cúbica	Não Achatada
g	21	22,5	57,44	56,92	Cúbica	Não Achatada
h	61	63,8	164,58	164,07	Cúbica	Não Achatada
i	25	27,3	69,79	69,18	Cúbica	Não Achatada
j	24	23,8	61,41	60,84	Não cúbica	Não Achatada
l	27	28,3	71,87	71,32	Cúbica	Não Achatada
ll	50	52,3	132,05	131,50	Cúbica	Não Achatada

4.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Depois de feita a caracterização e digitalização das partículas selecionadas, estas foram submetidas aos ensaios de resistência mecânica descritos no subcapítulo 2.2, os ensaios de *Los Angeles* e de *Micro-Deval*. O objetivo é tentar perceber se as técnicas de digitalização permitem identificar os danos nas partículas provocados por estes ensaios, e avaliar de que forma as características geométricas das partículas se podem relacionar com a quantidade e tipo de desgaste que sofrem.

Como estes ensaios provocam elevada erosão das pedras de balastro, estas foram fotografadas segundo vários ângulos para se poder identificar as partículas selecionadas no final do ensaio. Foi também criada uma paleta de cores com plasticina (Figura 78). O objetivo foi fazer corresponder a cada pedra uma cor e preencher o furo feito para colocação no pedestal com plasticina de uma cor distinta.

As partículas foram divididas pelos dois ensaios, como mostra a Figura 79, e de seguida cada amostra foi completada com mais agregado, até se obter a massa de 10.000 ± 100 gramas estipulada pelas normas.

Dos ensaios de *Los Angeles* (Figura 80) e *Micro-Deval* resultaram os valores indicados em (15) e (16), respetivamente.

$$LA = \frac{10000 - m}{100} = 16 \quad (15)$$

$$M_{DE} = \frac{10000 - m}{100} = 6,5 \quad (16)$$

Com estes valores se confirma mais uma vez que o balastro cumpre os requisitos da REFER, quer no que se refere ao balastro do Tipo I, cujo limite de LA é de 16 e de M_{DE} é de 7, quer ao balastro do Tipo II, cujos limites são superiores. As folhas com os resultados dos ensaios são apresentadas em anexo.



Figura 78 - Paleta de cores de plasticina para identificação das partículas selecionadas.



a)



b)

Figura 79 - Distribuição das partículas pelos ensaios de resistência mecânica: a) *Los Angeles*: 2, 3, 4, 5, 6, 7, d, e, j, l e II; b) *Micro-Deval*: 1, 8, 9, 10, a, c, f, g, h e i.

No final dos ensaios, as pedras foram identificadas com base nas fotografias tiradas antes dos ensaios, pela plasticina, pelo furo e também pela tinta da numeração. As partículas provenientes do ensaio de Los Angeles estavam fragmentadas, enquanto as do Micro-Deval ficaram com uma forma mais arredondada (Figura 81). O ensaio de Los Angeles foi mais destrutivo, sendo que quatro das onze partículas selecionadas ficaram destruídas. Encontraram-se partes das partículas “5”, “d” e “e” (Figura 82), porém da partícula “II” não se identificou nenhum pedaço. A partícula “e” fragmentou pelo furo, pelo que se pode concluir que a furação introduziu uma zona de fragilidade nas pedras. Na Figura 83 apresenta-se um aspeto da amostra e das partículas selecionadas, depois dos ensaios.



Figura 80 - Amostra de balastro e esferas de aço dentro do tambor rotativo da Máquina de *Los Angeles* no início do ensaio.



a)



b)

Figura 81 - Amostras de balastro no final dos ensaios: a) amostra do ensaio de *Los Angeles*; b) amostra do ensaio de *Micro-Deval*.

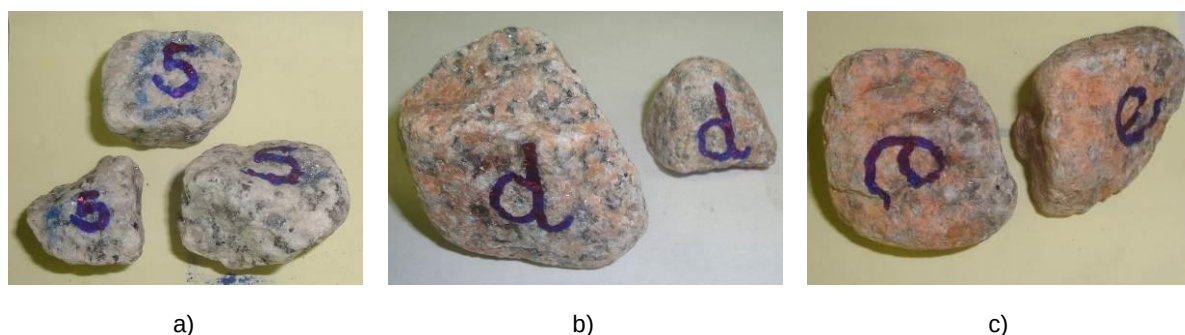


Figura 82 – Pormenor das partículas depois do ensaio de *Los Angeles*: a) partícula “5”; b) partícula “d”; c) partícula “e”.



Figura 83 – Amostra e partículas selecionadas depois dos ensaios: a) *Los Angeles*; b) *Micro-Deval*.

4.4. COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS PARTÍCULAS APÓS ENSAIOS

Depois dos ensaios de resistência mecânica, o número de partículas selecionadas ficou reduzido a dezasseis. De seguida submeteram-se de novo as pedras aos procedimentos referidos no subcapítulo 4.2., ou seja, foi medido o volume real com recurso a provetas, foi determinada a massa de cada pedra, calculados os índices de achatamento e de forma e foram digitalizadas as partículas (Figura 84 e Figura 85). Por fim foi determinado o volume digital de cada pedra.

Os valores da massa, do volume real e digital estão no Quadro 5. Uma vez mais se verifica que o volume real e o digital coincidem na ordem de grandeza.

Relativamente ao índice de achatamento e forma realça-se que ambos diminuíram, sendo que o decréscimo foi mais acentuado no índice de forma, que baixou de 15% para 7%.

$$FI_{17partículas} = \frac{M_2}{M_1} \times 100 = 7\% \quad (17)$$

$$SI_{17partículas} = \frac{M_2}{M_1} \times 100 = 7\% \quad (18)$$

Estes valores são influenciados pela diminuição do número de partículas selecionadas e também pela alteração da geometria que a erosão provocou em algumas pedras, como é o caso da “4”, da “7” e da “i”, apresentadas no Quadro 6. Algumas partículas passaram a pertencer a frações granulométricas diferentes das iniciais, mas aparentemente não há um padrão que relacione a forma das pedras com esta alteração.

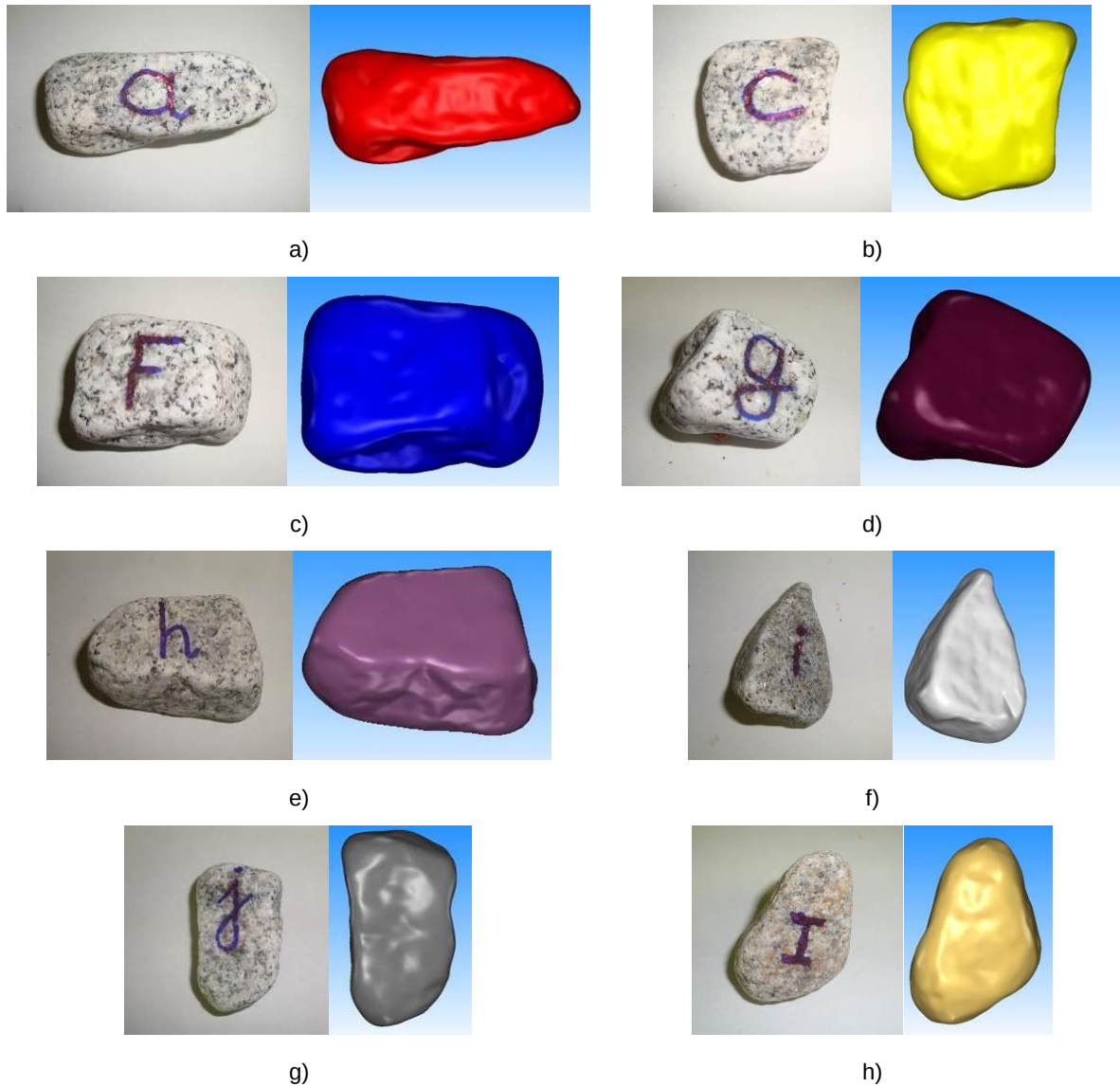


Figura 84 - Pedras e modelos obtidos no 3DReshaper de "a" a "j" e "I": a) pedra e modelo "a"; b) pedra e modelo "c"; c) pedra e modelo "f"; d) pedra e modelo "g"; e) pedra e modelo "h"; f) pedra e modelo "g"; g) pedra e modelo "i"; h) pedra e modelo "I".

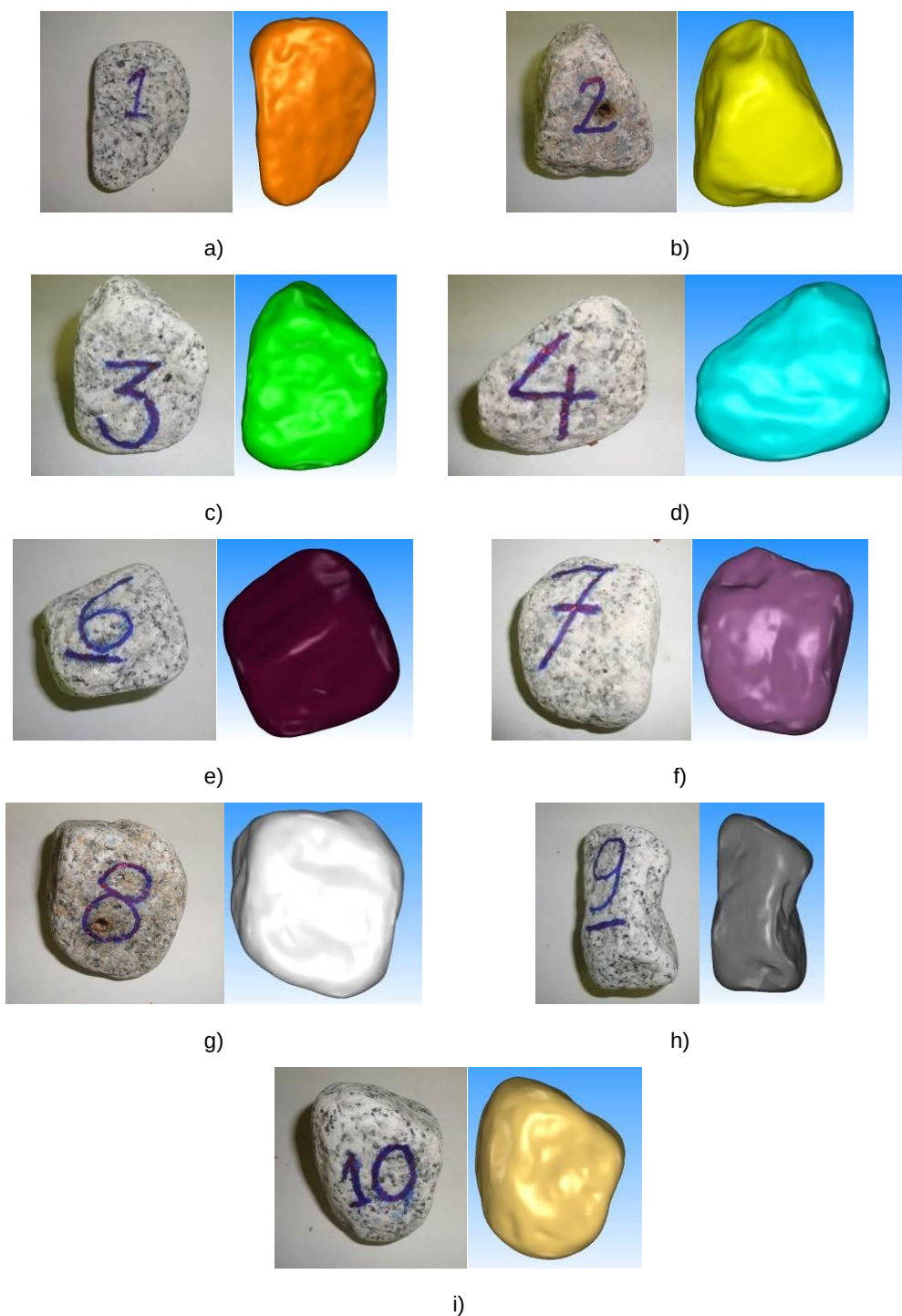


Figura 85- Pedras e modelos obtidos no 3DReshaper de "1" a "10": a) modelo e pedra "1"; b) modelo e pedra "2"; c) modelo e pedra "3"; d) modelo e pedra "4"; e) modelo e pedra "6"; f) modelo e pedra "7"; g) modelo e pedra "8"; h) modelo e pedra "9"; i) modelo e pedra "10".

Quadro 5 - Características das partículas seleccionadas depois dos ensaios de resistência mecânica.

Pedra	$V_{\text{pedra}} \text{ (cm}^3\text{)}$	$V_{\text{digital}} \text{ (cm}^3\text{)}$	$M_{\text{após ensaio}} \text{ (g)}$
1	30	32,7	85,06
2	60	62,1	161,1
3	42	44,2	114,8
4	28	26,9	69,33
6	50	50,1	129,25
7	40	42,3	108,89
8	40	44,8	115,42
9	90	88,1	228,56
10	65	65,4	169,98
a	34	32,8	84,39
c	13	15,5	38,82
f	38	37,6	96,39
g	20	20,8	53,31
h	55	57,7	147,98
i	25	25,4	64,3
j	15	15,7	39,4
l	20	23,3	58,62

Quadro 6 – Comparação da forma e achatamento antes e depois dos ensaios de resistência mecânica.

Pedra	Antes do Ensaio		Após Ensaio	
	Forma da Pedra	Achatamento	Forma da Pedra	Achatamento
1	Não cúbica	Achatada	Não cúbica	Achatada
2	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
3	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
4	Cúbica	Achatada	Cúbica	Não achatada
6	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
7	Não cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
8	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
9	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
10	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
a	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
c	Não cúbica	Achatada	Não cúbica	Achatada
f	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
g	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
h	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
i	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
j	Não cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada
l	Cúbica	Não Achatada	Cúbica	Não achatada

Tendo em conta os dados do Quadro 7, estudou-se a relação entre as diferentes grandezas, de modo a averiguar se há uma relação entre elas, a geometria das partículas e os ensaios a que foram submetidas.

Quadro 7 - Comparação do volume e massa das partículas para os ensaios de resistência mecânica.

Pedra	ΔV (cm ³)	ΔV (%)	$\Delta V_{\text{digital}}$ (cm ³)	$\Delta V_{\text{digital}}$ (%)	ΔM (g)	ΔM (%)	Ensaio
1	5	14	4,4	12	8,65	9,2	M _{DE}
2	7	10	5,9	9	15,06	8,5	LA
3	13	24	10,0	18	25,64	18,3	LA
4	2	7	5,7	17	14,54	17,3	LA
6	5	9	5,7	10	15,34	10,6	LA
7	29	42	28,7	40	73,44	40,3	LA
8	10	20	2,5	5	7,8	6,3	M _{DE}
9	0	0	3,0	3	8,37	3,5	M _{DE}
10	3	4	4,0	6	8,66	4,8	M _{DE}
a	1	3	3,1	9	5,68	6,3	M _{DE}
c	2	13	1,3	8	2,93	7,0	M _{DE}
f	4	10	2,6	7	6,35	6,2	M _{DE}
g	1	5	1,7	8	3,61	6,3	M _{DE}
h	6	10	6,1	10	16,09	9,8	M _{DE}
i	0	0	1,9	7	4,88	7,1	M _{DE}
j	9	38	8,1	34	21,44	35,2	LA
l	7	26	5,0	18	12,7	17,8	LA

Pela Figura 86 conclui-se que a variação da massa e do volume digital se relacionam por uma reta com declive unitário.

Previam-se que a variação do volume real e digital se relacionassem igualmente por uma reta com um coeficiente de correlação elevado, porém não é o que se verifica (Figura 87), existem desvios dos valores relativamente à reta. Este resultado pode ser explicado pela falta de precisão na determinação dos volumes com o uso da proveta originando erros de medição de volume, uma vez por excesso e outras por defeito. Verifica-se no entanto que quando o volume é maior, o erro reduz-se. Mesmo assim, estes valores permitiram comprovar que os resultados da modelação estavam coerentes com a realidade.

Uma vez que a variação da massa e do volume digital se têm um fator de correlação (R^2) quase igual a 1, não é de estranhar que a relação da variação do volume real com a variação da massa (Figura 88) tenha um coeficiente de correlação semelhante ao da Figura 87.

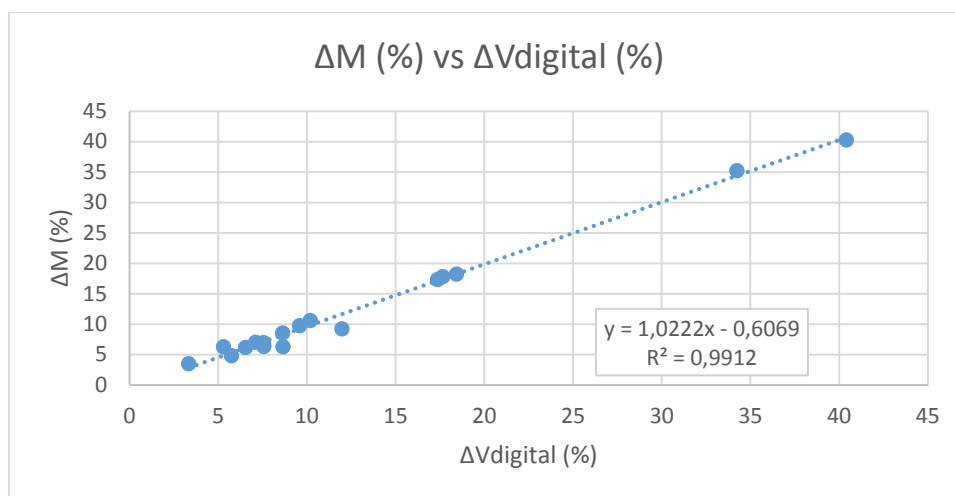


Figura 86 - Relação entre a variação da massa e a variação do volume digital.

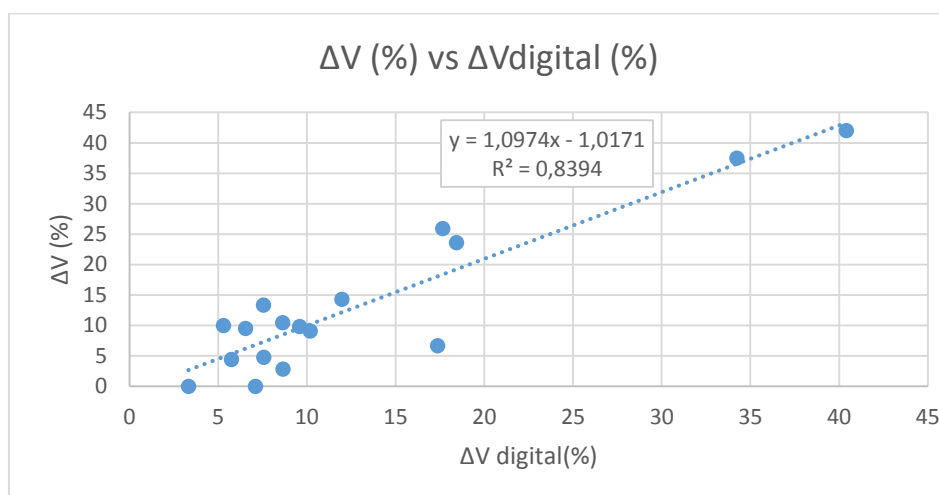


Figura 87 - Relação entre a variação do volume real e a variação do volume digital.

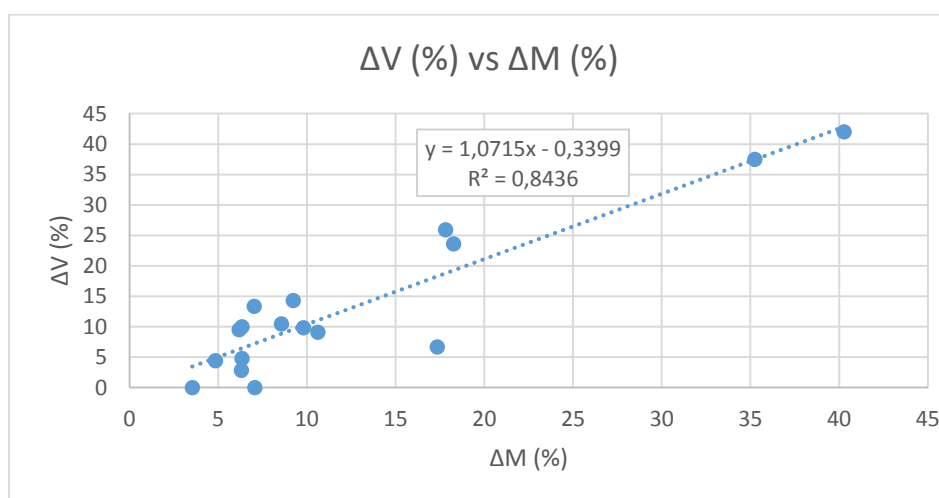


Figura 88 - Relação entre a variação do volume real e a variação da massa.

Relativamente à forma das partículas e às grandezas estudadas acima, pela Figura 89 não se verifica que exista um padrão entre a perda de massa e volume, e a sua cubicidade. O mesmo se conclui para o caso das partículas não achatadas. Apesar da variação de volume e massa das partículas achatadas ser semelhante, o número reduzido de partículas em análise impede que se tirem ilações rigorosas.

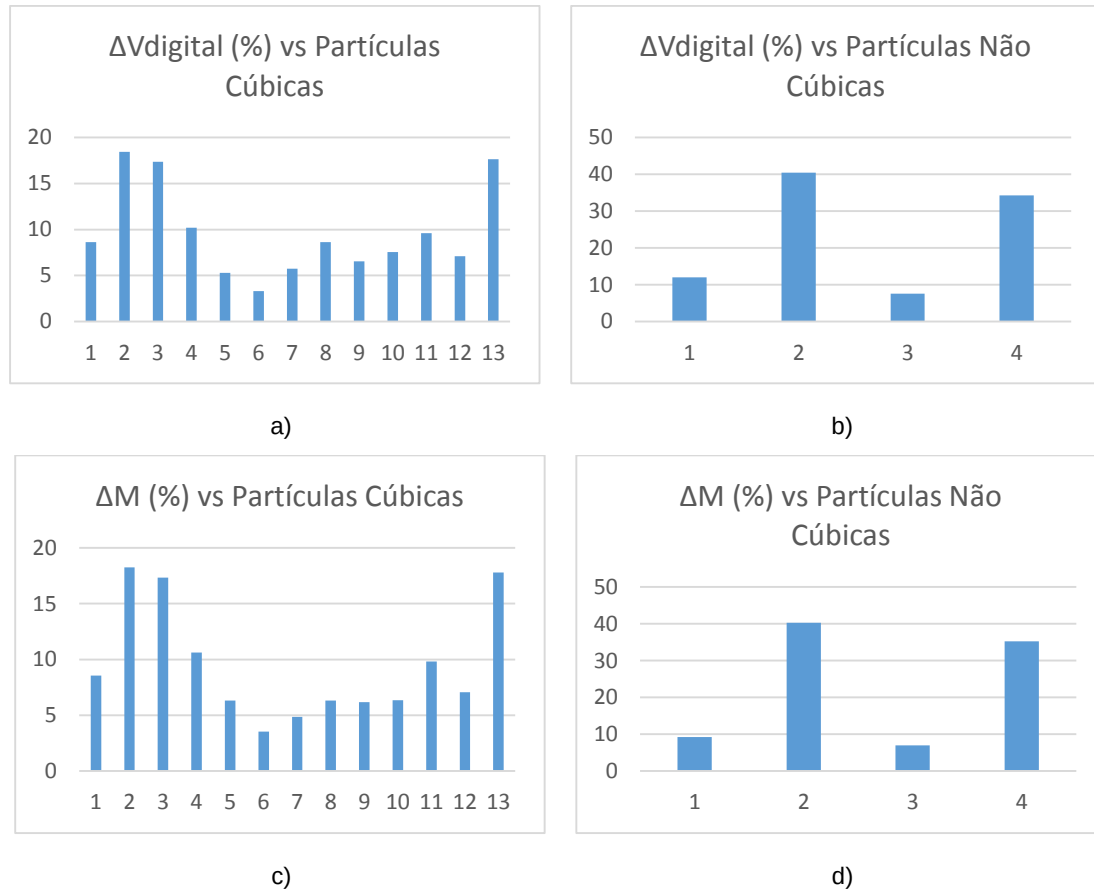


Figura 89 - Relação entre as grandezas e a forma das partículas: a) $\Delta V_{\text{digital}}$ e partículas cúbicas; b) $\Delta V_{\text{digital}}$ e partículas não cúbicas; c) ΔM e partículas cúbicas; d) ΔM e partículas não cúbicas.

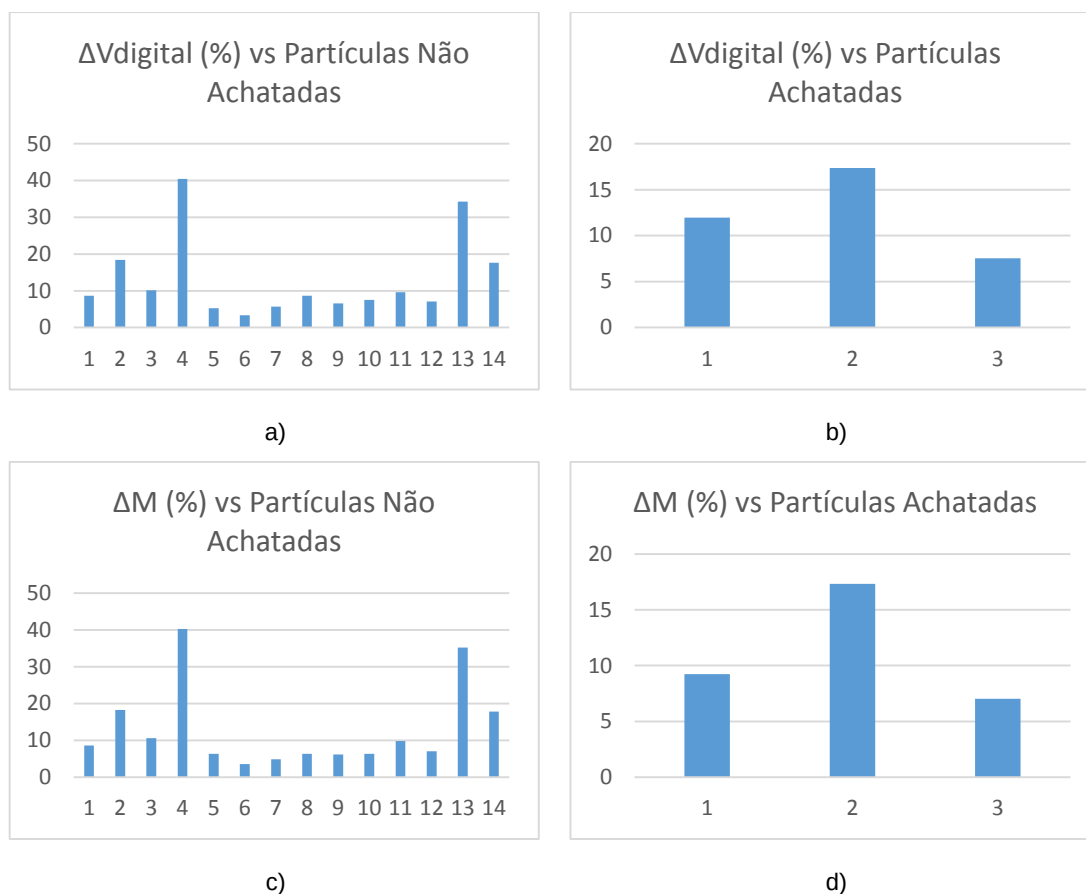


Figura 90 - Relação entre as grandezas e o achatamento das partículas: a) $\Delta V_{\text{digital}}$ e partículas não achatadas; b) $\Delta V_{\text{digital}}$ e partículas achatadas; c) ΔM e partículas não achatadas; d) ΔM e partículas achatadas.

Pela Figura 91 pode-se verificar novamente que o ensaio de *Los Angeles* provocou uma erosão muito maior que o de *Micro-Deval*. Enquanto a perda de massa neste último não ultrapassa os 10%, no *LA* varia entre 10% e 40%.

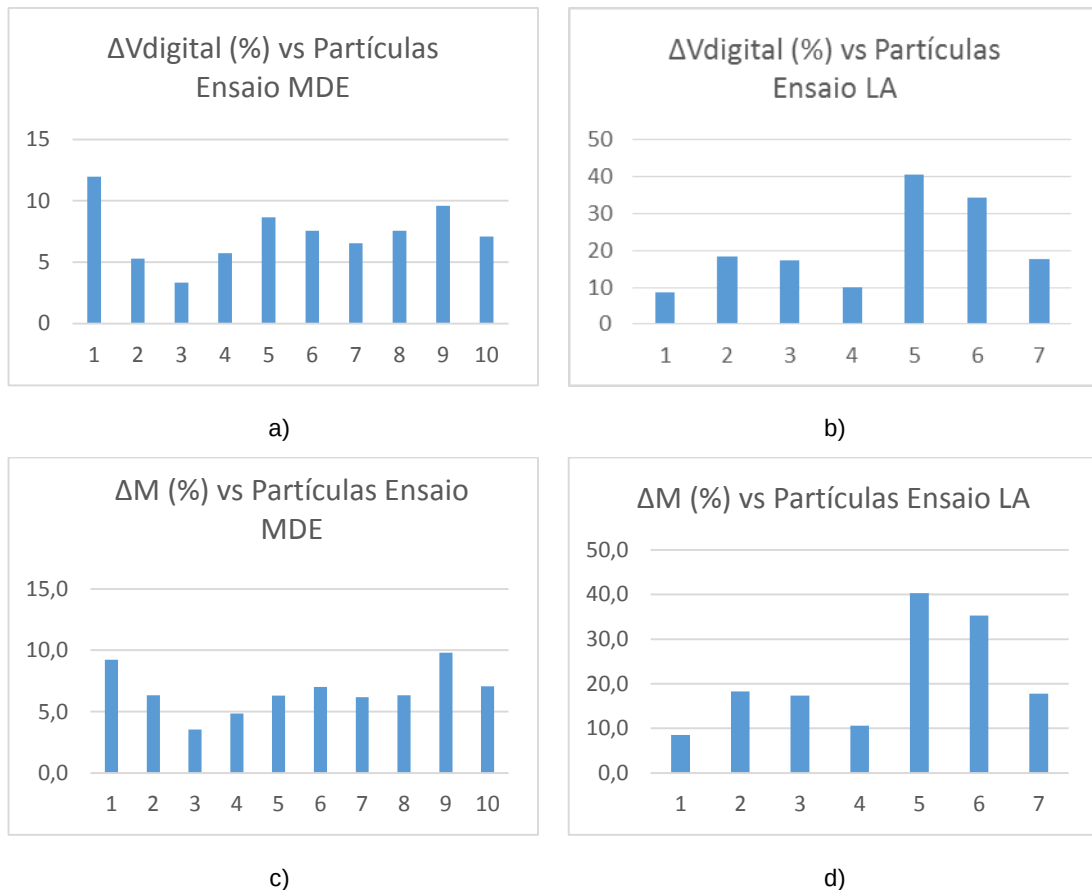


Figura 91 - Relação entre as grandezas e os ensaios de resistência mecânica: a) $\Delta V_{\text{digital}}$ e M_{DE} ; b) $\Delta V_{\text{digital}}$ e LA; c) ΔM e M_{DE} ; d) ΔM e LA.

4.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DAS PARTÍCULAS

À semelhança do que foi feito no capítulo 3, foram criados mapas de cores para comparação das malhas das partículas antes e depois da erosão. Na Figura 92 podem-se observar os modelos das partículas iniciais a transparente, onde se encaixam os modelos das partículas finais a cor opaca. Este procedimento foi realizado, como já foi referido, com o algoritmo “Best Fit” do 3DReshaper. No entanto, como algumas partículas sofreram uma grande alteração da sua forma, o algoritmo tem dificuldades em ajustar as duas malhas e faz com que nalgumas zonas a partícula final “trespasse” a inicial. Porém, foi sempre garantido que os resíduos fossem inferiores à resolução de digitalização. As iterações do algoritmo para as diferentes partículas apresentam-se em anexo.

Os mapas de cores foram realizados com o *software GOM Inspect* e estão representados na Figura 93, na Figura 94 e na Figura 95. Com base no que foi observado elaboraram-se o Quadro 8 e o Quadro 9, onde se descrevem as zonas das pedras onde ocorreu erosão. Verifica-se que no caso do ensaio Micro-Deval a maior parte das partículas sofreu erosão nos cantos e nas arestas, o que confirma o que já foi quantificado acerca das partículas adquirirem uma forma mais arredondada. Já no ensaio Los Angeles, apesar de também existirem partículas com erosão nos cantos e nas arestas, grande parte das partículas perderam pedaços nos cantos. Deste modo compreende-se que no ensaio LA os desvios máximos entre as malhas sejam maiores que no ensaio M_{DE} .

Conclui-se assim que não há uma relação entre a forma e achatamento das partículas e a localização da erosão.

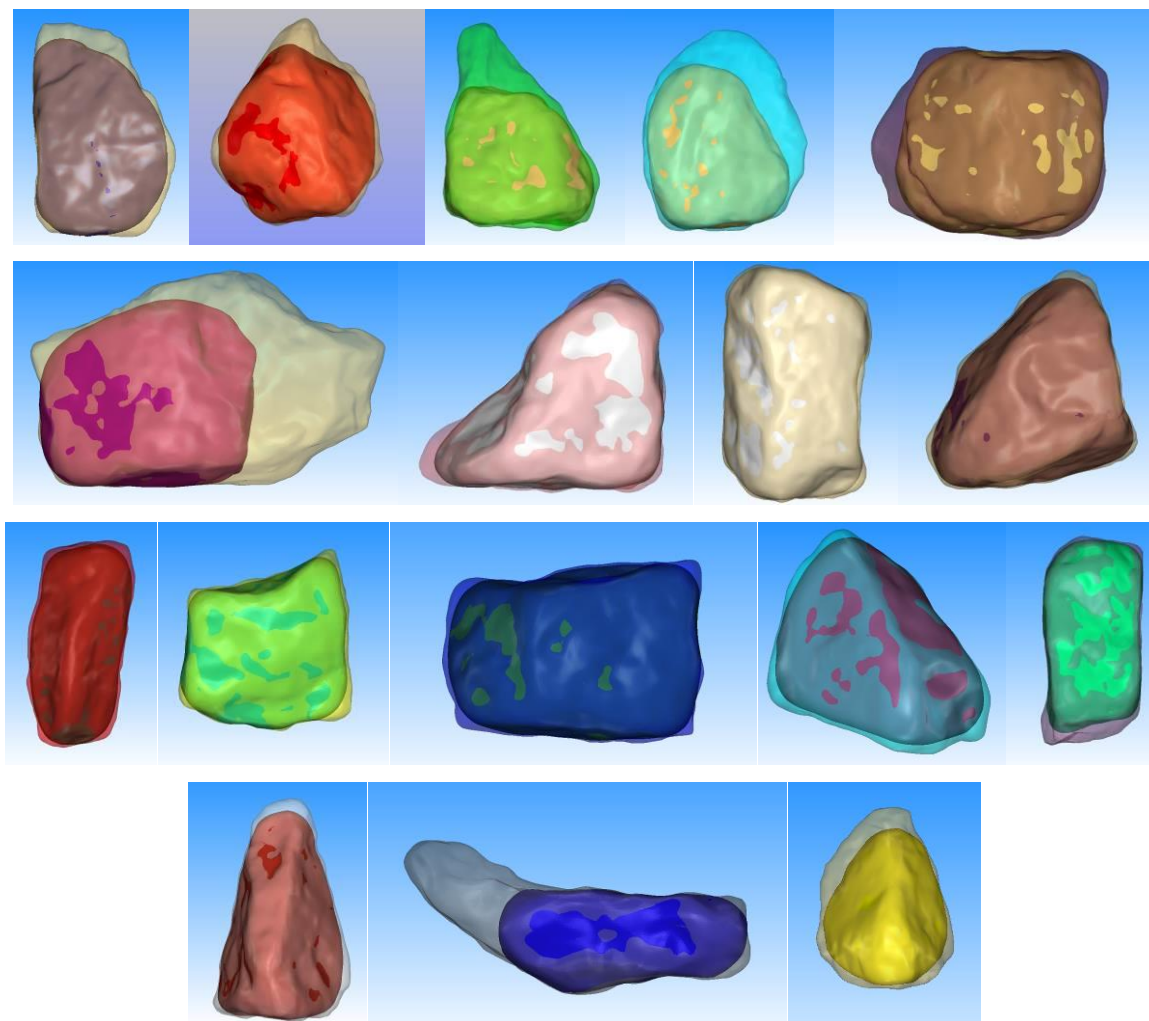


Figura 92 - Diferença entre a partícula antes e depois dos ensaios de resistência mecânica – Imagem obtida no 3DReshaper.

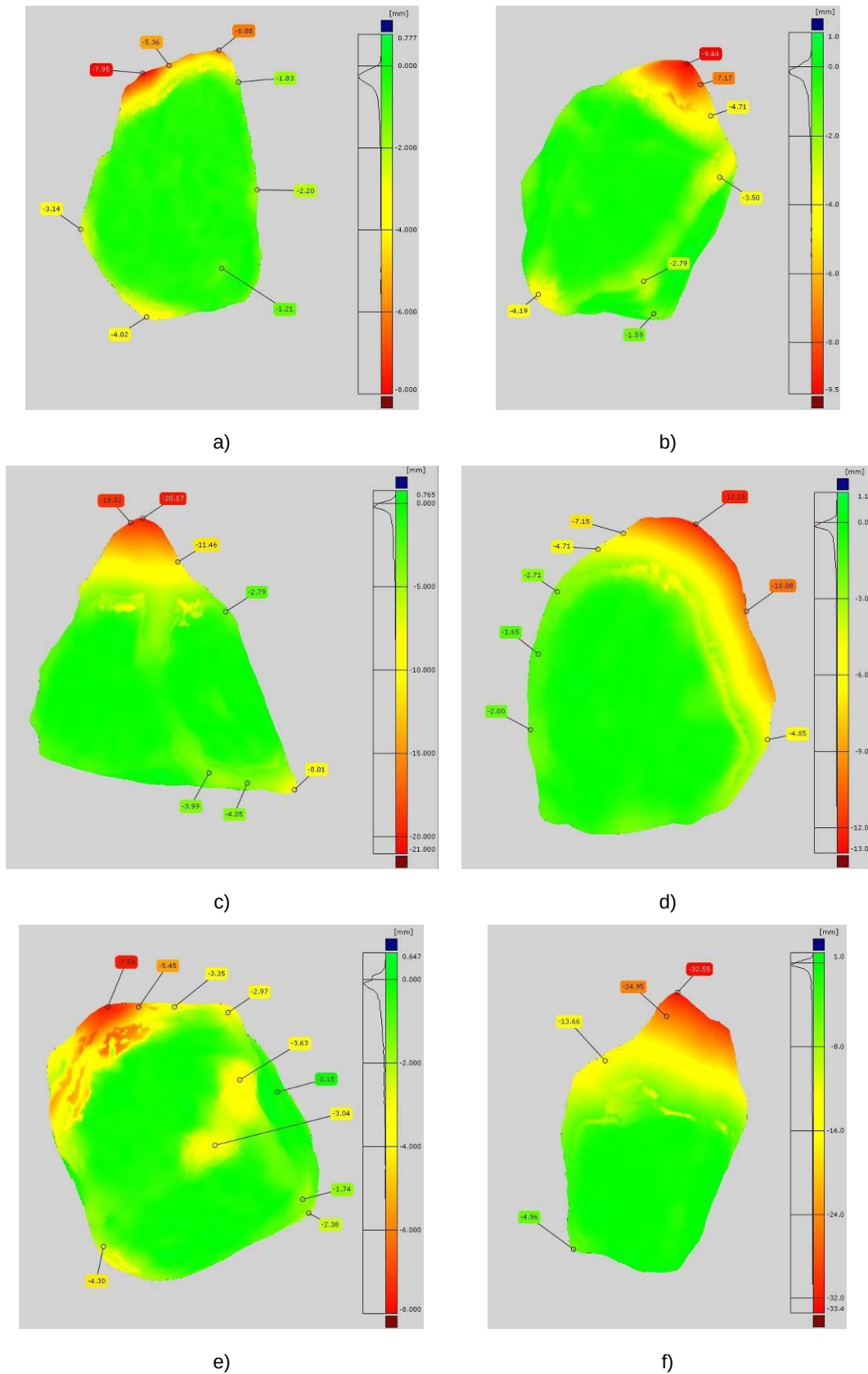


Figura 93 – Comparação das malhas antes e depois dos ensaios de desgaste – Imagens obtidas no software *GOM Inspect*: a) pedra "1"; b) pedra "2"; c) pedra "3"; d) pedra "4"; e) pedra "6"; f) pedra "7".

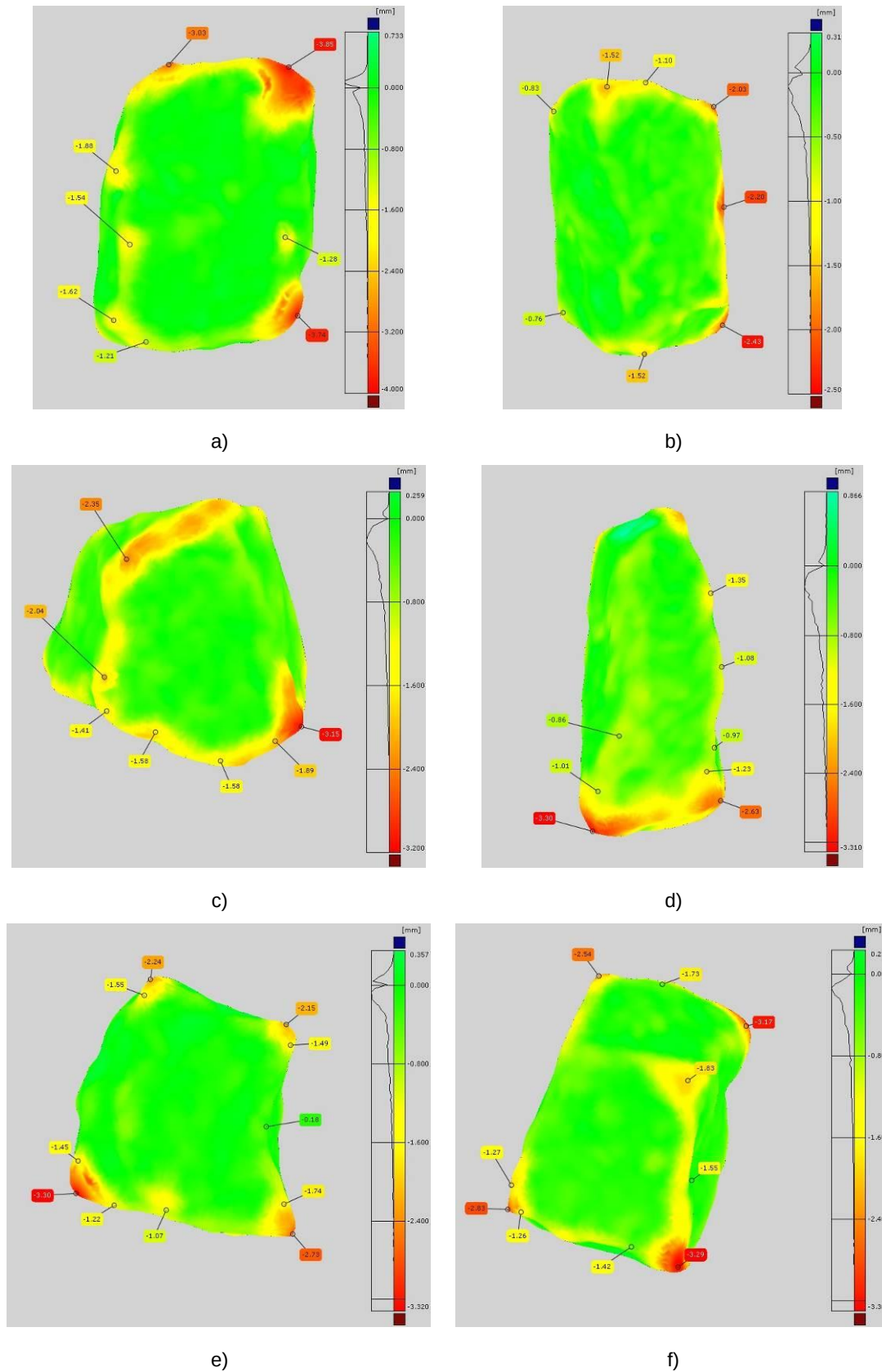


Figura 94 - Comparação das malhas antes e depois dos ensaios de desgaste – Imagens obtidas no *software GOM Inspect*: a) pedra "8"; b) pedra "9"; c) pedra "10"; d) pedra "a"; e) pedra "c"; f) pedra "f".

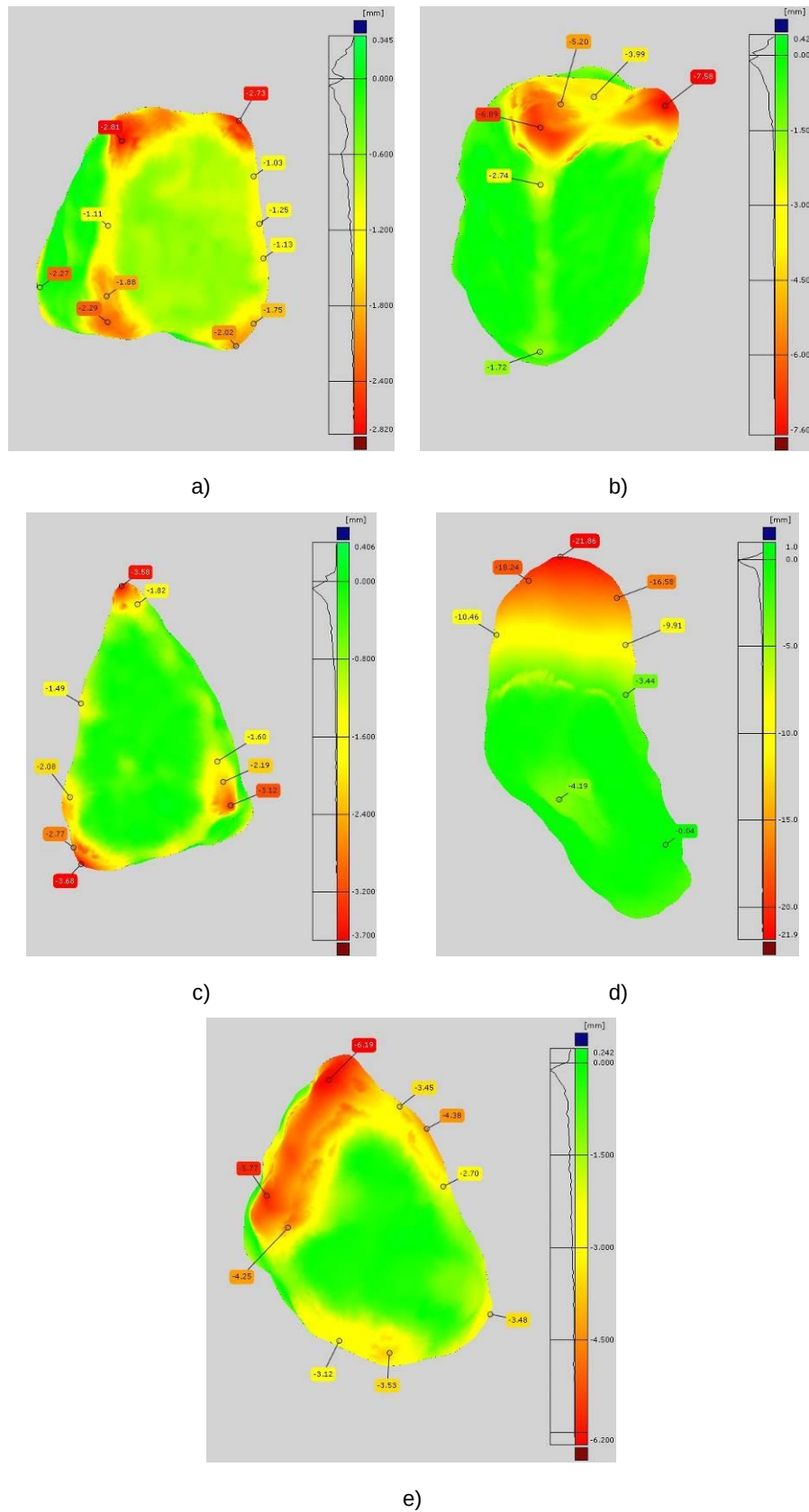


Figura 95 - Comparação das malhas antes e depois dos ensaios de desgaste – Imagens obtidas no software GOM Inspect: a) pedra "g"; b) pedra "h"; c) pedra "i"; d) pedra "j"; e) pedra "l".

Quadro 8 - Erosão provocada pelo ensaio de *Los Angeles*.

Pedra	Forma	Achatamento	Desvio máximo (mm)	Localização do desgaste
2	Cúbica	Não Achatada	-9,44	Cantos e arestas
3	Cúbica	Não Achatada	-20,16	Cantos e arestas
4	Cúbica	Achatada	-12,15	Cantos (um)
6	Cúbica	Não Achatada	-7,58	Cantos
7	Não cúbica	Não Achatada	-32,55	Cantos (um)
j	Não cúbica	Não Achatada	-21,86	Cantos
l	Cúbica	Não Achatada	-6,19	Cantos e arestas

Quadro 9 - Erosão provocada pelo ensaio de *Micro-Deval*.

Pedra	Forma	Achatamento	Desvio máximo (mm)	Localização do desgaste
1	Não cúbica	Achatada	-7,95	Cantos e arestas
8	Cúbica	Não Achatada	-3,85	Cantos e arestas
9	Cúbica	Não Achatada	-2,43	Cantos e arestas
10	Cúbica	Não Achatada	-3,15	Cantos e arestas
a	Cúbica	Não Achatada	-3,3	Cantos e arestas
c	Não cúbica	Achatada	-3,3	Cantos
f	Cúbica	Não Achatada	-3,29	Cantos e arestas
g	Cúbica	Não Achatada	-2,81	Cantos e arestas
h	Cúbica	Não Achatada	-7,58	Cantos e arestas
i	Cúbica	Não Achatada	-3,68	Cantos

Como conclusão, pode referir-se que foi possível identificar o desgaste das pedras com recurso aos modelos digitais. Embora o número de pedras analisadas tenha sido relativamente reduzido, não foi possível encontrar uma relação entre as suas características geométricas e o tipo de desgaste que sofreram.

4.6. CARACTERIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS PARTÍCULAS

Como foi referido no subcapítulo 2.2.5, têm vindo a ser desenvolvidos vários parâmetros para classificar geometricamente as partículas de balastro. Em seguida é feita a análise de alguns destes parâmetros, também com o propósito de averiguar se estes se alteram com os ensaios de resistência mecânica.

Com recurso ao *software GOM Inspect* foi possível medir o eixo maior, intermédio e menor de cada partícula. Este procedimento passou por identificar visualmente as zonas e a orientação da partícula que podiam levar ao maior eixo, sendo depois comprovados (ou não) através da medição com a função “*Outer Disc Caliper*”. Tratou-se de um processo iterativo onde as medições foram refinadas até se encontrar o maior eixo. Encontrado o eixo *L*, fez-se coincidir este com um dos eixos do referencial *Oxyz*

e rodou-se a partícula em torno do mesmo para obter a posição da pedra que levava ao maior eixo intermédio possível (Figura 96). Após um novo processo iterativo, obteve-se o eixo I e procedeu-se de seguida ao cálculo do menor eixo, S . Uma vez que os eixos têm de ser perpendiculares entre si, na determinação do menor eixo a partícula não se pode mover. Este encontra-se na superfície que define a “espessura” da partícula, correspondendo à maior dimensão encontrada segundo o eixo do referencial que sobrou (Figura 97).

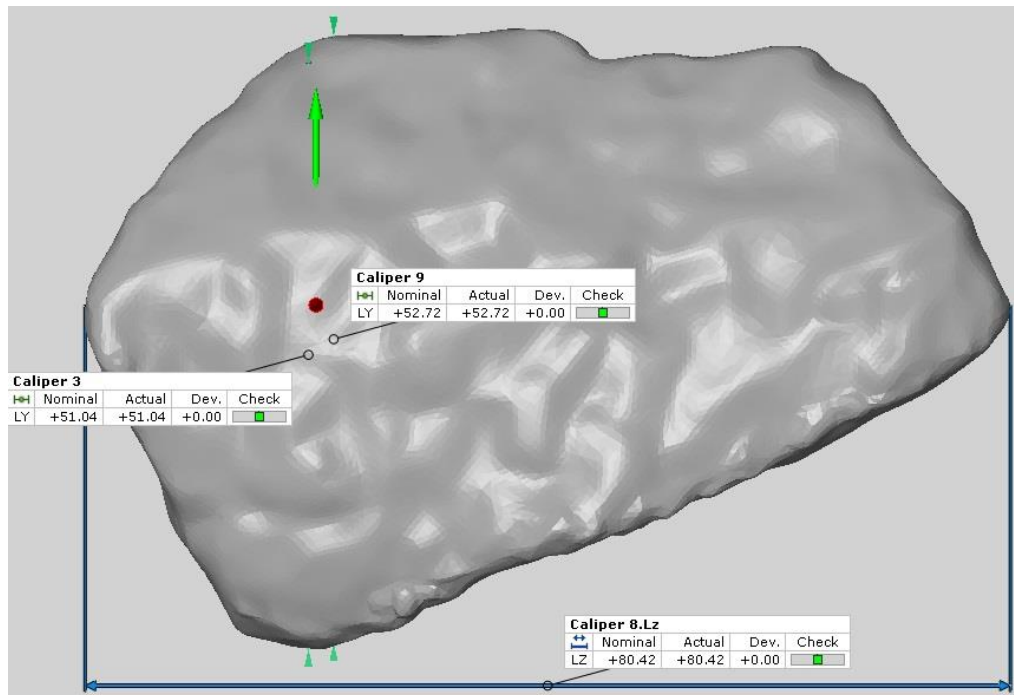


Figura 96 - Determinação de I , correspondente à maior dimensão segundo y (neste caso).

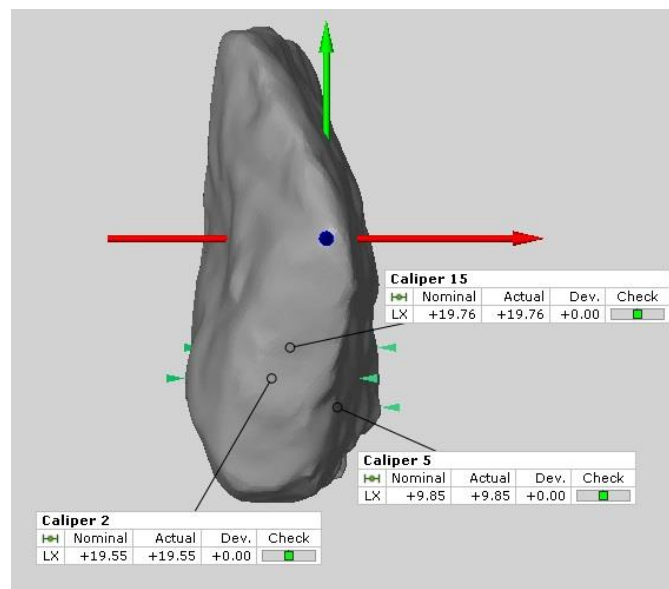


Figura 97 - Determinação de S , correspondente à maior dimensão segundo x (neste caso).

As figuras com as dimensões de cada partícula em estudo encontram-se nos anexos e os respetivos valores no Quadro 10. Com os valores de L , I e S foi possível determinar a razão de achatamento (p), a razão de alongamento (q) e o fator de forma (F). Do mesmo modo, foi determinada a esfericidade (ψ) através da equação (7) (Quadro 11). Nota-se que os valores de p e q não variaram significativamente após os ensaios. O mesmo acontece no caso da esfericidade, onde muitas partículas mantiveram o mesmo valor, principalmente as que foram submetidas ao ensaio de *Micro-Deval*.

Quadro 10 - Dimensões das partículas (mm).

Pedra	Antes dos ensaios			Após ensaios		
	L	I	S	L	I	S
1	80	53	20	71	48	19
2	70	56	47	61	51	45
3	74	55	44	58	45	40
4	62	48	30	51	40	29
6	62	54	42	57	51	39
7	90	58	29	60	50	28
8	65	52	44	61	43	35
9	80	51	48	79	48	43
10	67	54	49	64	52	47
a	75	33	28	72	31	27
c	52	45	17	49	43	16
f	63	43	32	58	40	30
g	48	39	36	45	36	34
h	75	49	41	68	47	38
i	59	38	33	55	38	30
j	71	31	21	49	29	20
l	56	35	33	49	34	34

Quadro 11 - Razão de achatamento, razão de alongamento, fator de forma e esfericidade.

Pedra	Antes dos ensaios				Após ensaios				$\Delta\psi$	Ensaio
	p	q	F	ψ	p	q	F	ψ		
1	0,37	0,66	0,57	0,70	0,38	0,68	0,56	0,72	0,02	MDE
2	0,85	0,79	1,07	0,93	0,88	0,85	1,04	0,94	0,01	LA
3	0,80	0,74	1,08	0,92	0,89	0,78	1,13	0,94	0,02	LA
4	0,62	0,78	0,79	0,88	0,73	0,77	0,95	0,91	0,03	LA
6	0,78	0,87	0,89	0,93	0,77	0,90	0,85	0,93	0,00	LA
7	0,50	0,65	0,78	0,79	0,57	0,84	0,68	0,87	0,08	LA
8	0,84	0,79	1,06	0,93	0,82	0,71	1,16	0,92	-0,02	MDE
9	0,95	0,63	1,51	0,92	0,89	0,61	1,46	0,91	-0,01	MDE
10	0,90	0,81	1,12	0,94	0,91	0,81	1,13	0,94	0,00	MDE
a	0,85	0,44	1,93	0,84	0,88	0,43	2,06	0,84	0,00	MDE
c	0,38	0,86	0,44	0,75	0,37	0,89	0,42	0,76	0,00	MDE
f	0,73	0,69	1,05	0,89	0,74	0,69	1,08	0,90	0,00	MDE
g	0,92	0,83	1,11	0,95	0,93	0,82	1,14	0,94	0,00	MDE
h	0,85	0,65	1,31	0,91	0,80	0,68	1,18	0,91	0,00	MDE
i	0,85	0,65	1,30	0,91	0,78	0,69	1,12	0,91	0,00	MDE
j	0,67	0,43	1,55	0,79	0,69	0,58	1,18	0,85	0,06	LA
l	0,94	0,63	1,49	0,92	0,98	0,70	1,40	0,93	0,02	LA

Pelo que se concluiu no subcapítulo 4.4, a análise de dados segundo a massa ou o volume traduzem-se em resultados semelhantes, permitindo tirar as mesmas ilações. Assim, procedeu-se a análise da razão de achatamento, alongamento e esfericidade, relativamente ao volume das partículas. As partículas foram ainda divididas segundo a sua fração granulométrica. Pela análise dos gráficos das figuras seguintes, conclui-se que não há uma relação bem definida entre o volume e estes parâmetros.

Pode-se aferir pela análise da Figura 98, que partículas duma fração menor, e portanto à partida de menor volume, têm uma razão de achatamento tão elevada como partículas de frações maiores. Este facto aliado à distribuição das partículas num intervalo amplo (0,3-1,0), permite comprovar a existência de diversidade morfológica em cada fração.

Verifica-se pela Figura 99 que os valores da razão de alongamento se distribuem predominantemente entre 0,6 e 0,9, valores que remetem para partículas menos alongadas, como é o caso das cúbicas e discoides. O mesmo já havia sido verificado pelo Quadro 4.

Os valores da esfericidade (Figura 100) variam entre 0,7 e 1,0. Uma vez que quanto mais aproximado à unidade for este valor, mais cúbicas são as partículas, comprova-se mais uma vez a cubicidade das mesmas.

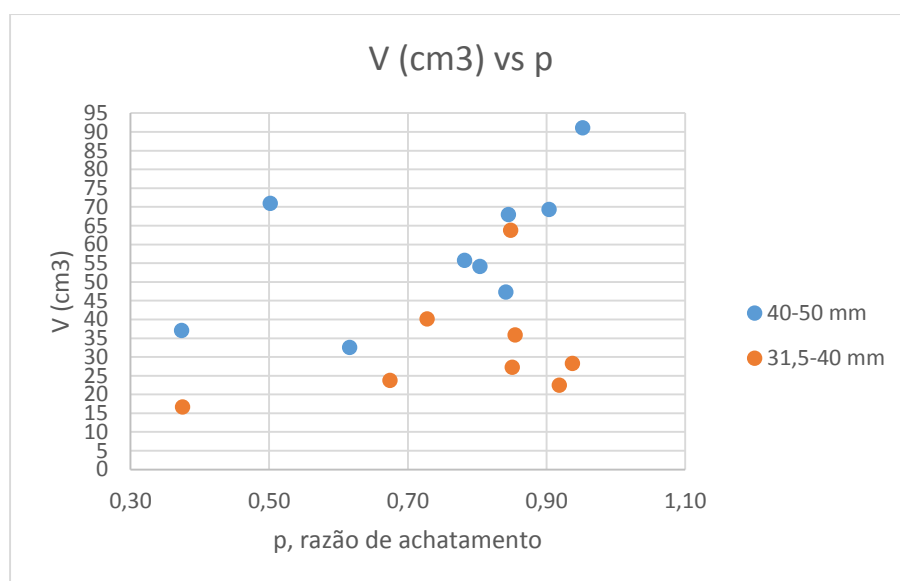


Figura 98 - Relação entre o volume das partículas e a razão de achatamento.

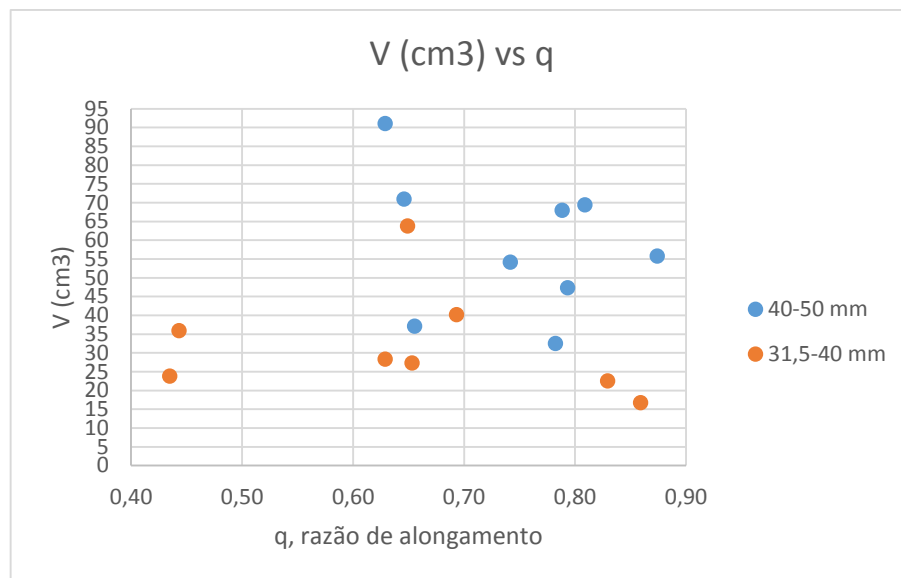


Figura 99 - Relação entre o volume das partículas e a razão de alongamento.

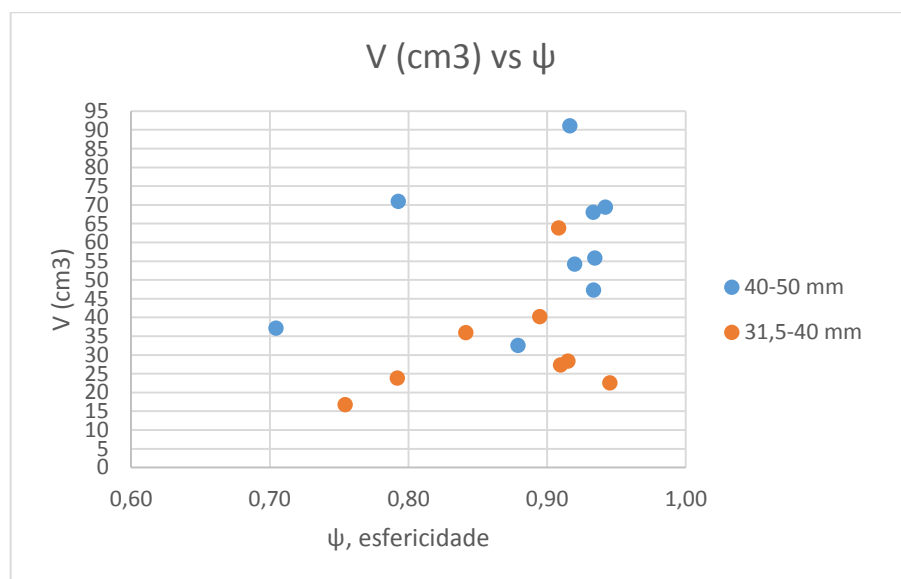


Figura 100 - Relação entre o volume das partículas e a esfericidade.

Com os valores da razão de achatamento e alongamento, e segundo o ábaco da Figura 18 (no subcapítulo 2.2.5), pode-se categorizar as diferentes partículas (Quadro 12). As partículas que se encontram a **negrito** alteraram a sua classificação após os ensaios. Aparentemente não existe um padrão entre as partículas que alteraram a sua classificação e os ensaios a que foram submetidas. O mesmo acontece com a variação do parâmetro designado por fator de forma. A verdade é que muitas partículas já se encontravam próximas dos limites entre cúbica e vareta, ou lâmina e discoide, antes dos ensaios. No entanto, importa realçar que mais de metade das partículas mantiveram a sua classificação. Através de inspeção visual das pedras, pode-se concluir que esta classificação é coerente com a realidade.

Quadro 12 - Classificação das partículas.

Pedra	Antes dos ensaios		Após ensaios		ΔF	Ensaio
	F	Classificação	F	Classificação		
1	0,57	Lâmina	0,56	Discoide	-0,01	MDE
2	1,07	Cúbica	1,04	Cúbica	-0,04	LA
3	1,08	Cúbica	1,13	Cúbica	0,05	LA
4	0,79	Discoide	0,95	Cúbica	0,16	LA
6	0,89	Cúbica	0,85	Cúbica	-0,04	LA
7	0,78	Lâmina	0,68	Discoide	-0,10	LA
8	1,06	Cúbica	1,16	Cúbica	0,10	MDE
9	1,51	Vareta	1,46	Vareta	-0,06	MDE
10	1,12	Cúbica	1,13	Cúbica	0,01	MDE
a	1,93	Vareta	2,06	Vareta	0,13	MDE
c	0,44	Discoide	0,42	Discoide	-0,02	MDE
f	1,05	Cúbica	1,08	Cúbica	0,03	MDE
g	1,11	Cúbica	1,14	Cúbica	0,03	MDE
h	1,31	Vareta	1,18	Cúbica	-0,13	MDE
i	1,30	Vareta	1,12	Cúbica	-0,18	MDE
j	1,55	Laminar	1,18	Vareta	-0,37	LA
l	1,49	Vareta	1,40	Cúbica	-0,09	LA

No subcapítulo 2.2.5 mencionou-se ainda o parâmetro designado por forma elipsoidal, sugerido por Sun *et al.* (2014). Este foi analisado, no entanto os resultados obtidos não foram viáveis uma vez que os valores da forma elipsoidal se mostraram superiores à unidade. A razão pela qual isto aconteceu não foi identificada, podendo tratar-se de um erro associado à diferente resolução das partículas.

Importa também salientar que todo o processo de medição das partículas foi manual. Portanto, apesar de se crer que os valores das dimensões determinadas são próximos da realidade, estes podem conter erros. Os eixos *L*, *I* e *S* podem também não estar bem identificados. Este problema pode, no entanto, ser resolvido através de um algoritmo, nomeadamente em ambiente *Matlab*, que programe as iterações a fazer até se obterem as dimensões desejadas.

É de notar que a dimensão da amostra pode não ter sido suficiente para retirar conclusões acerca da alteração da geometria das partículas em função dos ensaios mecânicos. No entanto, o tempo e os meios disponíveis não permitiram analisar uma amostra maior.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Como foi referido no início deste estudo, a via-férrea balastrada é constituída por uma camada de balastro cujo comportamento, pelas funções que lhe estão incumbidas, condiciona de forma importante o desempenho de toda a infraestrutura ferroviária. As suas características intrínsecas, como o tamanho, a forma, a textura e a dureza das partículas, aliadas às que a camada adquire no local, nomeadamente através da compactação, influenciam o funcionamento da estrutura. Para além do comportamento não-linear característico dos agregados quando submetidos a um determinado estado de tensão, os esforços introduzidos pelas solicitações cíclicas do tráfego ferroviário provocam o desgaste e a fragmentação das partículas, resultando em deformações plásticas da camada.

A utilização cada vez mais exigente das vias-férreas obriga a que se realizem estudos sobre os seus elementos, para que se possa prever o comportamento de toda a estrutura. Salienta-se, neste caso, a camada de balastro, onde importa investigar quais as características que mais influenciam o seu desempenho, para que se possa aumentar a sua durabilidade e reduzir as operações de manutenção na via.

A nível nacional, as normas europeias e a norma IT.GEO.001 da REFER definem limites para as características físicas e mecânicas consideradas relevantes no comportamento da camada de balastro. Tendo em conta estas características, foram estudadas vinte e uma partículas numa amostra de balastro que cumpre os requisitos estabelecidos na norma da REFER, em particular os que se referem às dimensões e geometria das partículas. O objetivo principal deste estudo prendeu-se com a digitalização de diferentes partículas de balastro, para que posteriormente integrem uma biblioteca digital de pedras, que possa ser utilizada na geração de elementos discretos. Estes elementos podem vir a ser utilizados em programas que permitem a modelação da via-férrea.

Para a digitalização das partículas foram utilizados dois equipamentos, o *Roland Modela MDX-20* e o *EXAscan HandyScan 3D* da *Creaform*. Para proceder à captação com o *Roland Modela* criaram-se dois moldes por cada pedra, os quais foram digitalizados em simultâneo com uma resolução de 0,75 mm. As malhas digitais resultantes foram tratadas de modo a constituir a geometria das partículas que lhes deram origem. Com o *EXAscan* procederam-se a digitalizações com três resoluções; 0,2; 0,5; e 1,0 mm. Uma vez que para a modelação dos elementos discretos importa captar apenas as arestas vivas das partículas, optou-se por utilizar a resolução de 1,0 mm, diminuindo o tempo do processo de digitalização. Para reduzir o tratamento das malhas, optou-se por digitalizar as pedras de uma só vez com o recurso a um pedestal. Para fixar as pedras ao pedestal fizeram-se pequenos furos em áreas da partícula onde não existia muito pormenor. Como o tempo do processo com o *EXAscan* é substancialmente mais baixo e capta melhor a geometria das partículas, acabou por ser o equipamento adotado na modelação das partículas que foram selecionadas, o que é a primeira conclusão do estudo.

Depois de se determinar os índices de forma e achatamento, o volume e a massa, as partículas foram submetidas a ensaios de resistência mecânica, *Los Angeles* e *Micro-Deval*. As partículas submetidas a este último ensaio adquiriram uma forma mais arredondada, causada pelo desgaste. As pedras submetidas ao ensaio de *Los Angeles* retiveram a forma angular, devido à fragmentação que sofreram. Quatro exemplares das partículas selecionadas submetidas ao *LA* foram destruídas, sendo que uma fragmentou pelo furo, concluindo-se que este introduz em alguns casos uma zona de fragilidade. As dezassete partículas que permaneceram intactas foram novamente modeladas. Os ficheiros resultantes das duas digitalizações permitem deste modo criar elementos que integrem a modelação de vias recentes, ou com um determinado tempo de serviço.

Para além disso, pretendeu-se avaliar se os modelos digitais permitem aferir a forma como ocorre a degradação das partículas, em função das suas características geométricas, quando sujeitas a ensaios de desgaste e de fragmentação. Assim, as malhas de cada partícula foram comparadas através do *software GOM Inspect*. No entanto, não foi encontrada uma relação clara entre a geometria e a perda de massa ou volume. Constatou-se, no entanto, que a erosão provocada pelo ensaio *LA* é maior e traduz-se na perda dos cantos das partículas, enquanto que o M_{DE} “lima” os cantos e arestas das partículas. Foram também estudados outros parâmetros de avaliação geométrica das partículas como a razão de achatamento, razão de alongamento, fator de forma e esfericidade. Concluiu-se que uma percentagem significativa das pedras utilizadas apresentam uma forma tendencialmente cúbica e que o grau de esfericidade das mesmas variou muito pouco com os ensaios mecânicos.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No final deste trabalho importa sumariar algumas ideias que foram surgindo ao longo da investigação e que não foram concretizadas por limitação de tempo, mas que se consideram importantes para o desenvolvimento do tema.

Uma vez que a furação das pedras criou uma zona de fragilidade em algumas delas, importa explorar outro método de digitalização ou construir uma estrutura de suporte onde este furo não seja necessário.

Como as partículas de balastro têm uma geometria variada, importa aumentar o número de modelos para a biblioteca digital de pedras. Com mais pedras de diferentes formas e achatamentos, talvez seja também possível determinar um padrão para as perdas de volume e massa das partículas.

Pode-se também proceder a digitalizações com uma resolução maior para que se possa aferir acerca da alteração da textura das faces das partículas e o modo como esta ocorre para os diferentes ensaios de resistência mecânica.

A massificação dos *scanners* tridimensionais, e consequente concorrência e descida de preço dos aparelhos, fará com que seja possível o acesso, no futuro, a equipamentos com algoritmos de reconstrução mais refinados, captando ainda melhor a geometria das partículas.

Seria vantajoso elaborar um algoritmo, nomeadamente em *Matlab* que permitisse identificar os eixos L, I e S de cada partícula, colmatando os erros que uma medição manual introduz e viabilizando o procedimento a uma amostragem maior. Importa também detetar e corrigir o erro verificado no cálculo da forma elipsoidal, dado tratar-se de um parâmetro recente na avaliação das características geométricas das partículas.

Por fim, importa continuar o trabalho através da utilização de algoritmos que gerem elementos discretos, permitindo transformar os ficheiros obtidos em *clumps* ou partículas poliédricas que possam ser diretamente utilizadas nos programas de modelação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Rousan, T.; Masad, E.; Myers, L.; Spiegelman, C. (2005). *A New Methodology for Shape Classification of Aggregates*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1913, 11-23.
- Anochie-Boateng, J.; Komba, J.; Tutumluer, E. (2011). *3D Laser Based Measurement of Mineral Aggregate Surface Area for South African Hot-Mix Asphalt Mixtures*. Transportation Research Board 90th Annual Meeting, 23 a 27 de janeiro, 2011, Washington DC.
- Azéma, É. (2007). *Étude numérique des matériaux granulaires à grains polyédriques : rhéologie quasi-statique, dynamique vibratoire, application au procédé de bourrage du ballast*. Tese de Doutorado, Université Montpellier 2 - Sciences et Techniques du Languedoc.
- Baghsorkhi, M. S.; Laryea, S.; Ferrellec, J.-F.; Chen, C.; McDowell, G. R. (2014). *Sleeper Geometry Investigations using Discrete Element Modelling and the Box Test Apparatus*. Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (Pombo, J.), 8 a 11 de abril, 2014, Ajaccio, Corsica, França, Paper 91, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Inglaterra.
- Belytschko, T. (1983). An overview of semidiscretization and time integration procedures. *In Computational Methods for Transient Analysis*, 1–65, North Holland.
- BS EN 933-3 (1997). "Tests for geometrical properties of aggregates - Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index".
- BS EN 933-4 (2008). "Tests for geometrical properties of aggregates - Part 4: Determination of particle shape - Shape index".
- BS EN 1097-1 (1996). "Tests for mechanical and physical properties of aggregate - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)".
- Coutinho, J. (2013). *Materiais de Construção 1 - Agregados Práticas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Disciplina de Materiais de Construção 1– Mestrado em Engenharia Civil 2013/14.
- Creaform. (2014). <http://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/portable-3d-scanner-handyscan-3d>. 12 de maio de 2014.
- FabLab Lisboa. (2014). www.fablablisboa.pt. 15 de junho de 2014.
- Ferreira, A. (2012). *Utilização de Modelos Discretos na Modelação Numérica do Comportamento Estrutural das Camadas de Apoio da Via Férrea*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fortunato, E. (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias : Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fortunato, E.; Fontul, S.; Paixão, A.; Asseiceiro, F. (2013). *Case study on the rehabilitation of old railway lines: experimental field works*. 9th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields 25 a 27 de junho, 2013, Trondheim, Noruega.
- Fortunato, E.; Resende, R. (2006). *Mechanical behaviour of railway track structure and foundation - Three-dimensional numerical modelling*. RailFound' 06 (Gurmel Ghataora, M. P. N. B.), 11 a 13 de setembro, 2006, University of Birmingham.

- Hay, W. W. (1982). *Railroad Engineering, 2nd Edition*. John Wiley & Sons.
- Huang, H. (2010). *Discrete Element Modeling of Railroad Ballast Using Imaging Based Aggregate Morphology Characterization*. Tese de Doutorado, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Huang, H.; Tutumluer, E.; Hashash, Y. M. A.; Ghaboussi, J. (2007). *Imaging aided discrete element modeling of railroad ballast*. Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering (Loizos, A., Scarpas, T. & Al-Qadi, I. L.), 20 a 22 de junho, 2007, Atenas, Grécia, 1837-1845, Taylor & Francis Group.
- Indraratna, B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track*. Taylor & Francis Group, Londres, Inglaterra.
- IT.GEO.001 (2008). "Fornecimento de Balastro e Gravelha". REFER.
- Le-Pen, L. M.; Powrie, W.; Zervos, A.; Ahmed, S.; Aingaran, S. (2013). Dependence of shape on particle size for a crushed rock railway ballast. *In Granular Matter*, 849-861.
- Lobo-Guerrero, S.; Vallejo, L. E. (2005). *Crushing a weak granular material: experimental numerical analyses*. Géotechnique, 55, 245–249,
- Lobo-Guerrero, S.; Vallejo, L. E. (2006). Discrete element method analysis of railtrack ballast degradation during cyclic loading. *In Granular Matter*, 195-204, Springer.
- Lu, M.; McDowell, G. R. (2007). The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method. *In Granular Matter*, 9, 69-80, Springer.
- MakerBot. (2014). <http://www.makerbot.com/support/guides/pla/>. 4 de julho de 2014.
- Moaveni, M.; Qian, Y.; Boler, H.; Mishra, D.; Tutumluer, E. (2014). *Investigation of Ballast Degradation and Fouling Trends using Image Analysis*. Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (Pombo, J.), 8 a 11 de abril, 2014, Ajaccio, Corsica, França, Paper 123, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Inglaterra.
- NP EN 933-1 (2000). "Ensaio das Propriedades Geométricas dos Agregados. Parte 1: Análise Granulométrica. Método de Peneiração".
- NP EN 1097-2 (2011). "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação".
- NP EN 13450 (2005). "Agregados para balastro de via férrea".
- Qian, Y.; Boler, H.; Moaveni, M.; Tutumluer, E.; Hashash, Y. M. A.; Ghaboussi, J. (2014). *Characterizing Ballast Degradation Through Los Angeles Abrasion Test and Image Analysis*. 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board 12 a 16 de janeiro, 2014, Washington, DC.
- Quality Digest. (2014). <http://www.qualitydigest.com/inside/cmsc-news/creaform-introduces-exascan>. 15 de maio de 2014.
- Rodriguez, J. M.; Edeskär, T.; Knutsson, S. - Particle Shape Quantities and Measurement Techniques—A Review 2013. Consult. em 27 de junho, 2014. Disponível em WWW: <<http://www.ejge.com/2013/Ppr2013.016alr.pdf>>.
- Selig, E. T.; Waters, J. M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*. T. Telford.
- STL (file format). (2014). [http://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](http://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)). 3 de julho de 2014.

Sun, Y.; Indraratna, B.; Nimbalkar, S. - Three-dimensional characterisation of particle size and shape for ballast 2014. Consult. em 28 de agosto, 2014. Disponível em WWW: <<http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/geolett.14.00036>>.

Teixeira, P. F. (2003). *Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de las vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical*. Tese de Doutoramento, Universitat Politècnica de Catalunya.

Tutumluer, E.; Qian, Y.; Hashash, Y. M. A.; Ghaboussi, J.; Davis, D. D. (2013). *Discrete element modelling of ballasted track deformation behaviour*. International Journal of Rail Transportation, 1: 1-2, 57-73.

Uthus, L.; Hoff, I.; Horvli, I. (2005). *Evaluation of grain shape characterization methods for unbound aggregates* Proceedings of the 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields 27 a 29 de julho, 2005, Trondheim, Noruega.

Vale, C. M. N. A. S. d. (2010). *Influência da qualidade dos sistemas ferroviários no comportamento dinâmico e no planeamento da manutenção preventiva de vias de alta velocidade*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Winkler, E. (1867). *Die Lehre Von Elasticitaet Und Festigkeit*. 1ª Edição. H. Dominicus, Prague.

ANEXOS

ANEXO I

Especificações dos *scanners*

Quadro I – Especificações (em inglês) do scanner Roland Modela MDX – 20.

Specifications – Rolan Modela MDX - 20	
XY table size	8-5/8 in. (X) x 6-1/4 in. (Y) (220 mm x 160 mm)
Max. operation area	8 in. (X) x 6 in. (Y) x 2-3/8 in. (Z) (203.2 mm (X) x 152.4 mm (Y) x 60.5 mm (Z))
Max. table load weight	2.2 lb. (1000 g)
Interface	Serial (RS-232C)
Control keys	STANDBY key, VIEW key, TOOL-UP key, TOOL-DOWN key
LED	SCANNING MODE LED, MODELING MODE LED, VIEW LED
Power Pack	Exclusive AC adapter (DC+19V 2.1 A)
Acoustic noise level	Standby mode : under 35 dB (A) Operation mode (not cutting) : under 70 dB (A) (According to ISO 7779)
External dimensions	18-13-16 in. (W) x 15-1/16 in. (D) x 12-1/16 in. (H) (476.8 mm (W) x 381.6 mm (D) x 305 mm (H))
Weight (unit only)	30.2 lb. (13.7 kg)
Operation temperature	41 to 104°F (5 to 40°C)
Operation humidity	35 to 80 % (no condensation)
Accessories	AC adapter: 1, power cord: 1, Roland Software Package CD-ROM: 1, spindle unit: 1, sensor unit: 1, cap screw M4x15 : 4, tool:1, set screw M3x3 : 2, double-sided tape: 1, front cover: 1, hexagonal wrench (size : 3 mm) :1, hexagonal wrench (size : 1.5 mm): 1, positioning pins: 3, clay: 1, MDX-15/20 user's manual: 1

Quadro II – Funções de digitalização (em inglês) do scanner Roland Modela MDX-20.

<i>Scanning Functions – Roland Modela MDX - 20</i>	
<i>Sensor</i>	<i>Roland Active Piezo Sensor (R.A.P.S.) Probe length 2-5/16 in. (60 mm), tip bulb diameter 0.00315 in. (0.08 mm)</i>
<i>Scanning method</i>	<i>Contacting, mesh-point height-sensing</i>
<i>Scanning pitch (Dr. PICZA)</i>	<i>X/Y-axis directions -- 0.002 to 0.20 in. (0.05 to 5.00 mm) (settable in steps of 0.002 in. (0.05 mm)) Z-axis direction -- 0.000984 in. (0.025 mm)</i>
<i>Scanning speed</i>	<i>1/8—9/16 in./sec. (4—15mm/sec.)</i>
<i>Exportable file formats</i>	<i>DXF, VRML, STL, 3DMF, IGES, Grayscale, Point Group and BMP</i>

Quadro III – Especificações (em inglês) do scanner EXAscan Handyscan 3D da Creaform

<i>Technical Specifications - EXAscan Handyscan 3D</i>	
<i>Weight</i>	<i>1.25 kg (2.75 lbs.)</i>
<i>Dimensions</i>	<i>172 x 260 x 216 mm (6.75 x 10.2 x 8.5 in.)</i>
<i>Measurement Rate</i>	<i>25,000 measures/s</i>
<i>Laser Class</i>	<i>II (eye-safe)</i>
<i>Resolution</i>	<i>0.050 mm (0.002 in.)</i>
<i>Accuracy</i>	<i>Up to 0.040 mm (0.0016 in.)</i>
<i>Volumetric Accuracy ⁽¹⁾</i>	<i>0.020 mm + 0.100 mm/m (0.0008 in. + 0.0012 in./ft)</i>
<i>Volumetric Accuracy ⁽¹⁾ (with MaxSHOT 3D)</i>	<i>0.020 mm + 0.025 mm/m (0.0008 in. 0.0003 in./ft)</i>
<i>Stand-Off Distance</i>	<i>300 mm (12 in.)</i>
<i>Depth of Field</i>	<i>± 150 mm (±6 in.)</i>
<i>Laser Cross Area</i>	<i>210 mm x 210 mm (8.2 x 8.2 in.)</i>
	<i>Hi-res: 60 mm x 60 mm (2.4 in. x 2.4 in.)</i>
<i>Software</i>	<i>VXelements</i>

⁽¹⁾Based on the ISO 10360 standard, volumetric accuracy is defined as a size-dependent value.

ANEXO II

Formulários dos Ensaios

 MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES NÚCLEO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIARIAS E AEROPORTUARIAS		
LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO (LNEC/PAVMAT)		
NP EN 1097-2 de 2002 - Determinação da resistência à fragmentação (Los Angeles)		
DATA 19-05-2014	NP EN 13450 - Anexo C BALASTRO	PROCESSO Nº
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: Patrícia		
Massa total da amostra compreendida entre 31,5 e 50mm (kg)		
Número total de rotações		1000
Número total das esferas a utilizar no ensaio		12
Massa total das esferas a utilizar no ensaio (g)		5255,3
Massa constante da amostra a ensaiar (31,5 / 40mm) (g)		5002,1
Massa constante da amostra a ensaiar (40 / 50mm) (g)		5018,8
Massa constante da amostra a ensaiar (g)		10020,9
Massa constante da amostra após a realização do ensaio (m) (g)		8387,2
Coeficiente de Los Angeles $LA_{90} = \frac{10000 - m}{100}$		16
Equipamentos utilizados:		
Observações:		
OPERADOR: VISTO:		

Figura I – Ensaio de Los Angeles.

 MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES NÚCLEO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIÁRIAS E AEROPORTUÁRIAS		
LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO (LNEC/PAVMAT)		
NP EN 1097-2 de 2002 - Determinação da resistência ao desgaste (Micro Deval)		
DATA 19-05-2014	NP EN 13450 - Anexo E BALASTRO	PROCESSO Nº
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: Patrícia		
Massa total da amostra compreendida entre 31,5 e 50mm	(kg)	
Numero total de rotações		14000
Quantidade de água a utilizar no ensaio	(l)	2
PROVETE		1
Massa constante da amostra a ensaiar (50 / 40mm)	(g)	4998,5
Massa constante da amostra a ensaiar (40 / 31,5mm)	(g)	5022,2
Massa constante da amostra a ensaiar	(g)	10020,7
Massa constante da amostra após a realização do ensaio (m)	(g)	9347,6
Coefficiente de Micro Deval $M_{DE,RB} = \frac{10000 - m}{100}$		6,5
Valor médio do Coeficiente Micro-Deval		
Equipamentos utilizados:		
Observações:		
OPERADOR:		VISTO:

Figura II – Ensaio de *Micro-Deval*.

 MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES NÚCLEO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIARIAS E AEROPORTUARIAS				
LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO (LNEC/PAVMAT)				
Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento				
DATA	NP EN 933 - 3: 2002			PROCESSO Nº
16-05-2014				
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: Patricia				
Massa do Provete $M_0 =$ 60629,7 g		Massa retida no peneiro de 80mm 0,0 g Massa que passa no peneiro de 4mm 13,8 g Soma de massas rejeitadas 13,8 g		
Peneiração em peneiros de barras				
Fracção granulométrica d_i/D_i mm	Massa(R_i) da fracção granulométrica d_i/D_i g	Largura nominal da ranhura no peneiro de barras mm	Massa que passa pelo peneiro de barras (m_i) g	FI_i $= (m_i/R_i) \times 100$
63/80	0,0	40	0,0	#DIV/0!
50/63	6627,3	31,5	0,0	0,00
40/50	30985,3	25	1866,2	6,03
31,5/40	18408,1	20	954,7	5,19
25/31,5	4284,6	16	212,6	4,96
20/25	327,4	12,5	14,6	4,46
16/20	0,0	10	0,0	#DIV/0!
12,5/16	0,0	8	0,0	#DIV/0!
10/12,5	0,0	6,3	0,0	#DIV/0!
8/10	0,0	5	0,0	#DIV/0!
6,3/8	0,0	4	0,0	#DIV/0!
5/6,3	0,0	3,15	0,0	#DIV/0!
4/5	0,0	2,5	0,0	#DIV/0!
$M_1 = \sum R_i =$ 60612,7		$M_2 = \sum m_i =$ 3048,1		
$FI = (M_2/M_1) \times 100 = 5$				
$100 \times \frac{M_0 - \{\sum R_i + \sum (massas \text{ rejeitadas})\}}{M_0} =$				0,01
				< 1%
Equipamentos utilizados:				
OPERADOR:			VISTO:	

Figura III – Índice de achatamento da amostra.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES NÚCLEO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIARIAS E AEROPORTUARIAS							
LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO (LNEC/PAVMAT)							
EN 933-4:2008 - DETERMINAÇÃO DA FORMA DAS PARTÍCULAS - ÍNDICE DE FORMA							
DATA 16-05-2014						PROCESSO Nº	
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: Patrícia							
TIPO DE PROVETE A ENSAIAR: ☐ Amostra com $D \leq 2d$ ☒ Amostra não reduzida e $D > 2d$							
Massa total da amostra a ensalar, M_0 (g): 55983,8							
Fracção granulométrica (d_i/D_i) (mm)	Fracções granulométricas (d_i/D_i) com $D_i \leq 2d_i$		Fracções granulométricas ensaladas (fracções d_i/D_i com $V_i \geq 10\%$)		Partículas não cúbicas ($L/E > 3$) das fracções granulométricas ensaladas		Índice de forma SI (%)
	M_i (g)	V_i (%)	M_{Hi} (g)	V_{Hi} (%)	M_{Ni} (g)	SI_i (%)	Fracções não reduzidas
45/63	20856,4	37,3	20856,4	37,3	809,9	3,9	6
31,5/45	35127,4	62,7	35127,4	62,7	2605,9	7,4	
		0,0	0,0 Não ensalar	0,0	Não ensalar	0,0	
		0,0	0,0 Não ensalar	0,0	Não ensalar	0,0	
			ΣM_{Hi} (g) 55983,8			ΣM_{Ni} (g) 3415,8	
Nota: Apenas se ensalam as fracções que contenham pelo menos 10% de M_0							
Equipamento utilizado: _____							
Observações: _____							
OPERADOR: _____				VISTO: _____			

Figura IV - Índice de forma da amostra.

 MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES NÚCLEO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIARIAS E AEROPORTUARIAS				
LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO (LNEC/PAVMAT)				
Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento				
DATA	NP EN 933 - 3: 2002			PROCESSO Nº
16-05-2014				
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: Patrícia				
Massa do Provete $M_0 =$ 2394,4 g		Massa retida no peneiro de 80mm 0,0 g Massa que passa no peneiro de 4mm 0,0 g Soma de massas rejeitadas 0,0 g		
Peneiração em peneiros de barras				
Fracção granulométrica d_i/D_i mm	Massa(R_i) da fracção granulométrica d_i/D_i g	Largura nominal da ranhura no peneiro de barras mm	Massa que passa pelo peneiro de barras (π_i) g	FI_i $= (\pi_i / R_i) \times 100$
63/80	0,0	40	0,0	#DIV/0!
50/63	0,0	31,5	0,0	#DIV/0!
40/50	1359,0	25	93,9	6,91
31,5/40	1035,0	20	104,7	10,12
25/31,5	0,0	16	0,0	#DIV/0!
20/25	0,0	12,5	0,0	#DIV/0!
16/20	0,0	10	5,0	#DIV/0!
12,5/16	0,0	8	0,0	#DIV/0!
10/12,5	0,0	6,3	1,5	#DIV/0!
8/10	0,0	5	0,0	#DIV/0!
6,3/8	0,0	4	0,0	#DIV/0!
5/6,3	0,0	3,15	0,4	#DIV/0!
4/5	0,0	2,5	0,4	#DIV/0!
$M_1 = \sum R_i =$ 2394,0		$M_2 = \sum \pi_i =$ 205,9		
$FI = (M_2 / M_1) \times 100 = 9$				
$100 \times \frac{M_0 - \left\{ \sum R_i + \sum (massas \text{ rejeitadas}) \right\}}{M_0} =$				0,02
< 1%				
Equipamentos utilizados:				
OPERADOR:			VISTO:	

Figura V – Índice de achatamento das 21 partículas.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES NÚCLEO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIARIAS E AEROPORTUARIAS							
LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO (LNEC/PAVMAT)							
EN 933-4:2008 - DETERMINAÇÃO DA FORMA DAS PARTÍCULAS - ÍNDICE DE FORMA							
DATA 16-05-2014						PROCESSO Nº	
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: Patricia							
TIPO DE PROVETE A ENSAIAR: ☐ Amostra com $D \leq 2d$ ☒ Amostra não reduzida e $D > 2d$							
Massa total da amostra a ensaiar, M_0 (g): 2394,5							
Fracção granulométrica (d_i/D_i) (mm)	Fracções granulométricas (d_i/D_i) com $D_i \leq 2d_i$		Fracções granulométricas ensaiadas (fracções d_i/D_i com $V_i \geq 10\%$)		Partículas não cúbicas ($L/E > 3$) das fracções granulométricas ensaiadas		Índice de forma SI (%)
	M_i (g)	V_i (%)	M_{2i} (g)	V_{2i} (%)	M_{2i} (g)	SI_i (%)	Fracções não reduzidas
45/63	913,9	38,2	913,9	38,2	182,2	19,9	18
31,5/45	1480,6	61,8	1480,6	61,8	259,2	17,5	
		0,0	0,0 Não ensaiar	0,0	Não ensaiar	0,0	
		0,0	0,0 Não ensaiar	0,0	Não ensaiar	0,0	
			ΣM_{2i} (g) 2394,5		ΣM_{2i} (g) 441,4		
Nota: Apenas se ensaiam as fracções que contenham pelo menos 10% de M_0							
Equipamento utilizado: _____							
Observações: _____							
OPERADOR: _____ VISTO: _____							

Figura VI – Índice de forma das 21 partículas.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES NÚCLEO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIARIAS E AEROPORTUARIAS				
LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO (LNEC/PAVMAT)				
Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento				
DATA	NP EN 933 - 3: 2002			PROCESSO Nº
16-07-2014				
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: Patrícia				
Massa do Provete $M_0 =$		1765,6 g		
		Massa retida no peneiro de 80mm	0,0 g	
		Massa que passa no peneiro de 4mm	0,0 g	
		Soma de massas rejeitadas	0,0 g	
Peneiração em peneiros de barras				
Fracção granulométrica d_i/D_i mm	Massa(R_i) da fracção granulométrica d_i/D_i g	Largura nominal da ranhura no peneiro de barras mm	Massa que passa pelo peneiro de barras (m_i) g	F_i $= (m_i/R_i) \times 100$
63/80	0,0	40	0,0	#DIV/0!
50/63	0,0	31,5	0,0	#DIV/0!
40/50	1028,0	25	0,0	0,00
31,5/40	516,4	20	85,1	16,48
25/31,5	221,2	16	38,8	17,54
20/25	0,0	12,5	0,0	#DIV/0!
16/20	0,0	10	0,0	#DIV/0!
12,5/16	0,0	8	0,0	#DIV/0!
10/12,5	0,0	6,3	0,0	#DIV/0!
8/10	0,0	5	0,0	#DIV/0!
6,3/8	0,0	4	0,0	#DIV/0!
5/6,3	0,0	3,15	0,0	#DIV/0!
4/5	0,0	2,5	0,0	#DIV/0!
$M_1 = \sum R_i =$		$M_2 = \sum m_i =$		
1765,6		123,9		
$FI = (M_2/M_1) \times 100 = 7$				
$100 \times \frac{M_0 - \left\{ \sum R_i + \sum (massas \text{ rejeitadas}) \right\}}{M_0} =$				0,00
				< 1%
Equipamentos utilizados:				
OPERADOR:			VISTO:	

Figura VII – Índice de achatamento das 17 partículas.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES NÚCLEO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIARIAS E AEROPORTUARIAS							
LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO (LNEC/PAVMAT)							
EN 933-4:2008 - DETERMINAÇÃO DA FORMA DAS PARTÍCULAS - ÍNDICE DE FORMA							
DATA 16-07-2014						PROCESSO Nº	
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: Patrícia							
TIPO DE PROVETE A ENSAIAR: ☐ Amostra com $D \leq 2d$ ☒ Amostra não reduzida e $D > 2d$							
Massa total da amostra a ensaiar, M_0 (g): 1765,6							
Fracção granulométrica (d_i/D_i) (mm)	Fracções granulométricas (d_i/D_i) com $D_i \leq 2d_i$		Fracções granulométricas ensaiadas (fracções d_i/D_i com $V_i \geq 10\%$)		Partículas não cúbicas ($L/E > 3$) das fracções granulométricas ensaiadas		Índice de forma SI (%)
	M_i (g)	V_i (%)	M_{2i} (g)	V_{2i} (%)	M_N (g)	SI_i (%)	Fracções não reduzidas
45/63	398,5	22,6	398,5	22,6	0,0	0,0	7
31,5/45	1145,8	64,9	1145,8	64,9	85,1	7,4	
22,4/31,5	221,2	12,5	221,2	12,5	38,8	17,5	
		0,0	0,0 Não ensaiar	0,0	Não ensaiar	0,0	
		ΣM_{2i} (g) 1765,5		ΣM_{2i} (g) 123,9			
Nota: Apenas se ensaiam as fracções que contenham pelo menos 10% de M_0							
Equipamento utilizado: _____							
Observações: _____							
OPERADOR: _____ VISTO: _____							

Figura VIII – índice de forma das 17 partículas.

ANEXO III

Algoritmo de Aproximação “*Best Fit*” do 3DReshaper

PEDRA 1:

1º Best Fit

Transformation of element nº1

(A1):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(B1):

=====

> Roll (around X): 4.75692 degrees

> Pitch (around Y): 4.57969 degrees

> Yaw (around Z): -0.720083 degrees.

> Translation:

DX-15.44,DY14.79,DZ-5.502

> Best fit mean error: 0.294668

> Best fit standard deviation: 0.338462

> Object nº2 has moved less

than: 25.397351

2º Best Fit

Transformation of element nº1

(A1):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(B1):

=====

> Roll (around X): 0.00937016 degrees

> Pitch (around Y): 0.0299251 degrees

> Yaw (around Z): 0.0228773 degrees.

> Translation:

DX-0.136,DY0.07983,DZ-0.05017

> Best fit mean error: 0.296179

> Best fit standard deviation: 0.340351

> Object nº2 has moved less

than: 0.161779

3º Best Fit

Transformation of element nº1

(A1):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(B1):

=====

> Roll (around X): -0.0264977 degrees

> Pitch (around Y): -0.0141844 degrees

> Yaw (around Z): -0.00638195 degrees.

> Translation:

DX0.06132,DY-0.09836,DZ-0.005692

> Best fit mean error: 0.295544

> Best fit standard deviation: 0.339285

> Object nº2 has moved less

than: 0.125161

PEDRA 2:

1º Best Fit

Transformation of element nº1

(A2):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element n°2

(B2):

=====

> Roll (around X): -2.17797 degrees

> Pitch (around Y): -0.106699 degrees

> Yaw (around Z): 3.17014 degrees.

> Translation:

DX-0.1516,DY0.9244,DZ-0.3137

> Best fit mean error: 0.219289

> Best fit standard deviation: 0.278094

> Object n°2 has moved less

than: 2.239713

2° Best Fit

Transformation of element n°1

(A2):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element n°2

(B2):

=====

> Roll (around X): -0.0600727 degrees

> Pitch (around Y): -0.0654929 degrees

> Yaw (around Z): 0.0903962 degrees.

> Translation:

DX0.182,DY0.02422,DZ0.1302

> Best fit mean error: 0.218519

> Best fit standard deviation: 0.277202

> Object n°2 has moved less

than: 0.292580

3° Best Fit

Transformation of element n°1

(A2):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element n°2

(B2):

=====

> Roll (around X): 0.00693848 degrees

> Pitch (around Y): -0.0294569 degrees

> Yaw (around Z): 0.0047243 degrees.

> Translation:

DX0.08155,DY0.02586,DZ0.07701

> Best fit mean error: 0.2198

> Best fit standard deviation: 0.278426

> Object n°2 has moved less

than: 0.116704

PEDRA 3:

BestFit_Iteracao_1

Transformation of element n°1

(A3):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element n°2

(B3):

=====

> Roll (around X): -5.18657 degrees

> Pitch (around Y): -0.27606 degrees
 > Yaw (around Z): -0.875685 degrees.
 > Translation:
 DX-0.274,DY2.046,DZ-1.404
 > Best fit mean error: 0.172663
 > Best fit standard deviation: 0.230303
 > Object nº2 has moved less
 than: 15.817189

BestFit_Iteracao_2

Transformation of element nº1

(A3):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(B3):

=====

> Roll (around X): 0.00694291 degrees
 > Pitch (around Y): -0.085651 degrees
 > Yaw (around Z): 0.024752 degrees.
 > Translation:
 DX-0.02805,DY-0.01567,DZ0.003169
 > Best fit mean error: 0.173469
 > Best fit standard deviation: 0.231568
 > Object nº2 has moved less
 than: 0.257645

PEDRA 4:

BestFit_Iteracao_1

Transformation of element nº1

(A4):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(B4):

=====

> Roll (around X): -0.0465902 degrees
 > Pitch (around Y): -4.10555 degrees
 > Yaw (around Z): 0.0581222 degrees.
 > Translation:

DX-17.53,DY1.346,DZ-5.807

> Best fit mean error: 0.154529
 > Best fit standard deviation: 0.203133
 > Object nº2 has moved less
 than: 2.966830

BestFit_Iteracao_2

Transformation of element nº1

(A4):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0
 Transformation of element nº2
 (B4):
 =====
 > Roll (around X): 0.0166639 degrees
 > Pitch (around Y): 0.0159212 degrees
 > Yaw (around Z): -0.0316235 degrees.
 > Translation:
 DX0.06249,DY-0.01742,DZ0.01152
 > Best fit mean error: 0.154677
 > Best fit standard deviation: 0.203701
 > Object nº2 has moved less

than: 0.034939

PEDRA 6:

BestFit_Iteração_1

Transformation of element n°1

(A6):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element n°2

(B6):

=====

> Roll (around X): -2.21798 degrees

> Pitch (around Y): 2.72942 degrees

> Yaw (around Z): 4.57748 degrees.

> Translation:

DX11.54,DY7.453,DZ0.7764

> Best fit mean error: 0.168703

> Best fit standard deviation: 0.225311

> Object n°2 has moved less

than: 3.580290

BestFit_Iteração_2

Transformation of element n°1

(A6):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element n°2

(B6):

=====

> Roll (around X): 0.0782572 degrees

> Pitch (around Y): -0.0159697 degrees

> Yaw (around Z): 0.106387 degrees.

> Translation:

DX-0.06381,DY-0.3156,DZ-0.006226

> Best fit mean error: 0.169919

> Best fit standard deviation: 0.226769

> Object n°2 has moved less

than: 0.058321

BestFit_Iteração_3

Transformation of element n°1

(A6):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element n°2

(B6):

=====

> Roll (around X): -0.0830526 degrees

> Pitch (around Y): -0.00713555 degrees

> Yaw (around Z): -0.0091773 degrees.

> Translation:

DX-0.03379,DY0.3274,DZ0.00415

> Best fit mean error: 0.170715

> Best fit standard deviation: 0.227351

> Object n°2 has moved less

than: 0.041505

PEDRA 7:

BestFit_Iteração_1

Transformation of element n°1

(A7):

=====

> No movement	than: 0.036373
> Best fit mean error: 0	
> Best fit standard deviation: 0	PEDRA 8:
Transformation of element nº2	BestFit_Iteracao_1
(B7):	Transformation of element nº1
=====	(A8):
> Roll (around X): 0.624271 degrees	=====
> Pitch (around Y): -1.85754 degrees	> No movement
> Yaw (around Z): 1.94298 degrees.	> Best fit mean error: 0
> Translation:	> Best fit standard deviation: 0
DX-11.84,DY-1.694,DZ-0.1921	Transformation of element nº2
> Best fit mean error: 0.216838	(B8):
> Best fit standard deviation: 0.284526	=====
> Object nº2 has moved less	> Roll (around X): -2.54983 degrees
than: 1.936535	> Pitch (around Y): -5.02165 degrees
BestFit_Iteracao_2	> Yaw (around Z): -4.15303 degrees.
Transformation of element nº1	> Translation:
(A7):	DX-20.52,DY5.555,DZ5.798
=====	> Best fit mean error: 0.14869
> No movement	> Best fit standard deviation: 0.204228
> Best fit mean error: 0	> Object nº2 has moved less
> Best fit standard deviation: 0	than: 0.474368
Transformation of element nº2	BestFit_Iteracao_2
(B7):	Transformation of element nº1
=====	(A8):
> Roll (around X): -0.0620036 degrees	=====
> Pitch (around Y): 0.0176251 degrees	> No movement
> Yaw (around Z): -0.00648847 degrees.	> Best fit mean error: 0
> Translation:	> Best fit standard deviation: 0
DX0.09071,DY0.2807,DZ-0.09132	Transformation of element nº2
> Best fit mean error: 0.215846	(B8):
> Best fit standard deviation: 0.282385	=====
> Object nº2 has moved less	> Roll (around X): -0.000851999 degrees

> Pitch (around Y): -0.0309555 degrees
 > Yaw (around Z): -0.0433125 degrees.
 > Translation:
 DX-0.1148,DY-0.03004,DZ0.02401
 > Best fit mean error: 0.145557
 > Best fit standard deviation: 0.199897
 > Object nº2 has moved less
 than: 0.017285

PEDRA 9:

BestFit_Iteração_1

Transformation of element nº1

(A9):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0
 Transformation of element nº2
 (B9):
 =====
 > Roll (around X): -0.306789 degrees
 > Pitch (around Y): -2.60486 degrees
 > Yaw (around Z): -0.356344 degrees.
 > Translation:
 DX-9.153,DY2.104,DZ-8.797
 > Best fit mean error: 0.208357
 > Best fit standard deviation: 0.279708
 > Object nº2 has moved less
 than: 1.885117

BestFit_Iteração_2

Transformation of element nº1

(A9):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0
 Transformation of element nº2
 (B9):
 =====
 > Roll (around X): -0.00376072 degrees
 > Pitch (around Y): -0.00639004 degrees
 > Yaw (around Z): 0.0190108 degrees.
 > Translation:
 DX-0.056,DY-0.04368,DZ-0.0255
 > Best fit mean error: 0.210616
 > Best fit standard deviation: 0.282774
 > Object nº2 has moved less
 than: 0.015723

PEDRA 10:

BestFit_Iteração_1

Transformation of element nº1

(A10):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0
 Transformation of element nº2
 (B10):
 =====
 > Roll (around X): -0.273696 degrees
 > Pitch (around Y): 1.48484 degrees
 > Yaw (around Z): -2.43036 degrees.
 > Translation:
 DX3.149,DY3.747,DZ2.433
 > Best fit mean error: 0.236555

> Best fit standard deviation: 0.282426

> Object nº2 has moved less
than: 2.201504

BestFit_Iteração_2

Transformation of element nº1

(A10):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(B10):

=====

> Roll (around X): -0.0935425 degrees

> Pitch (around Y): -0.00596779 degrees

> Yaw (around Z): -0.0898405 degrees.

> Translation:

DX-0.02333,DY0.3743,DZ0.0006547

> Best fit mean error: 0.234559

> Best fit standard deviation: 0.281947

> Object nº2 has moved less
than: 0.037879

PEDRA A:

BestFit_Iteração_1

Transformation of element nº1

(Aa):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Ba):

=====

> Roll (around X): 3.54246 degrees

> Pitch (around Y): 0.280081 degrees

> Yaw (around Z): 6.81371 degrees.

> Translation:

DX-0.247,DY-0.095,DZ-1.11

> Best fit mean error: 0.261922

> Best fit standard deviation: 0.313684

> Object nº2 has moved less
than: 3.068309

BestFit_Iteração_2

Transformation of element nº1

(Aa):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Ba):

=====

> Roll (around X): 0.00871751 degrees

> Pitch (around Y): 0.0747387 degrees

> Yaw (around Z): -0.14621 degrees.

> Translation:

DX-0.1031,DY-0.02634,DZ-0.132

> Best fit mean error: 0.254094

> Best fit standard deviation: 0.309974

> Object nº2 has moved less
than: 0.223452

BestFit_Iteração_3

Transformation of element nº1

(Aa):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0
 Transformation of element n°2
 (Ba):
 =====
 > Roll (around X): -0.0243087 degrees
 > Pitch (around Y): -0.0761166 degrees
 > Yaw (around Z): 0.004195 degrees.
 > Translation:
 DX0.02595,DY0.006691,DZ0.02853
 > Best fit mean error: 0.257382
 > Best fit standard deviation: 0.312814
 > Object n°2 has moved less
 than: 0.071066

PEDRA C:

BestFit_Iteração_1

Transformation of element n°1

(Ac):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0
 Transformation of element n°2
 (Bc):
 =====
 > Roll (around X): 5.39228 degrees
 > Pitch (around Y): 3.03983 degrees
 > Yaw (around Z): 5.59191 degrees.
 > Translation:
 DX-0.6427,DY-0.05327,DZ-0.04483
 > Best fit mean error: 0.125242

> Best fit standard deviation: 0.163304
 > Object n°2 has moved less
 than: 1.283998

BestFit_Iteração_2

Transformation of element n°1

(Ac):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0
 Transformation of element n°2
 (Bc):
 =====
 > Roll (around X): -0.0111578 degrees
 > Pitch (around Y): -0.0328592 degrees
 > Yaw (around Z): -0.00838555 degrees.
 > Translation:
 DX-0.01092,DY-0.002382,DZ-0.01206
 > Best fit mean error: 0.125495
 > Best fit standard deviation: 0.164139
 > Object n°2 has moved less
 than: 0.019294

PEDRA F:

BestFit_Iteração_1

Transformation of element n°1

(Af):

=====

> No movement
 > Best fit mean error: 0
 > Best fit standard deviation: 0
 Transformation of element n°2
 (Bf):

=====

> Roll (around X): -0.741437 degrees

> Pitch (around Y): -4.44676 degrees

> Yaw (around Z): 4.51788 degrees.

> Translation:

DX-0.1714,DY-1.047,DZ-0.3925

> Best fit mean error: 0.207765

> Best fit standard deviation: 0.256734

> Object nº2 has moved less

than: 4.991408

BestFit_Iteracao_2

Transformation of element nº1

(Af):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bf):

=====

> Roll (around X): 0.0514592 degrees

> Pitch (around Y): 0.0159205 degrees

> Yaw (around Z): 0.00242355 degrees.

> Translation:

DX0.01447,DY-0.004091,DZ0.004388

> Best fit mean error: 0.20711

> Best fit standard deviation: 0.255069

> Object nº2 has moved less

than: 0.023628

PEDRA G:

BestFit_Iteracao_1

Transformation of element nº1

(Ag):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bg):

=====

> Roll (around X): -8.19638 degrees

> Pitch (around Y): -6.10092 degrees

> Yaw (around Z): -2.64028 degrees.

> Translation:

DX-1.293,DY0.4045,DZ0.4998

> Best fit mean error: 0.122299

> Best fit standard deviation: 0.154817

> Object nº2 has moved less

than: 1.990352

BestFit_Iteracao_2

Transformation of element nº1

(Ag):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bg):

=====

> Roll (around X): 0.0264361 degrees

> Pitch (around Y): -0.0298023 degrees

> Yaw (around Z): -0.00205101 degrees.

> Translation:

DX-0.006086,DY-0.003833,DZ0.003197

> Best fit mean error: 0.124343

> Best fit standard deviation: 0.15739
> Object nº2 has moved less
than: 0.015805

PEDRA H:

BestFit_Iteração_1

Transformation of element nº1

(Ah):

=====

> No movement
> Best fit mean error: 0
> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bh):

=====

> Roll (around X): 1.52226 degrees
> Pitch (around Y): 1.56952 degrees
> Yaw (around Z): 1.2283 degrees.
> Translation:
DX-0.3091,DY-2.781,DZ1.285
> Best fit mean error: 0.196213
> Best fit standard deviation: 0.259711
> Object nº2 has moved less
than: 2.807539

BestFit_Iteração_2

Transformation of element nº1

(Ah):

=====

> No movement
> Best fit mean error: 0
> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bh):

=====

> Roll (around X): 0.026147 degrees
> Pitch (around Y): 0.00134676 degrees
> Yaw (around Z): -0.0214505 degrees.
> Translation:
DX-0.009753,DY-0.0372,DZ0.01296
> Best fit mean error: 0.196871
> Best fit standard deviation: 0.259839
> Object nº2 has moved less
than: 0.027402

PEDRA I:

BestFit_Iteração_1

Transformation of element nº1

(Ai):

=====

> No movement
> Best fit mean error: 0
> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bi):

=====

> Roll (around X): -0.102272 degrees
> Pitch (around Y): -1.27328 degrees
> Yaw (around Z): 0.274387 degrees.
> Translation:
DX3.503,DY0.556,DZ2.16
> Best fit mean error: 0.155765
> Best fit standard deviation: 0.212515
> Object nº2 has moved less
than: 1.047298

BestFit_Iteração_2

Transformation of element nº1

(Ai):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bi):

=====

> Roll (around X): -0.037677 degrees

> Pitch (around Y): 0.0367967 degrees

> Yaw (around Z): -0.0094149 degrees.

> Translation:

DX-0.1016,DY-0.1283,DZ-0.1002

> Best fit mean error: 0.155126

> Best fit standard deviation: 0.211781

> Object nº2 has moved less

than: 0.039457

PEDRA J:

Transformation of element nº1

(Aj):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bj):

=====

> Roll (around X): -1.25232 degrees

> Pitch (around Y): -4.01732 degrees

> Yaw (around Z): 8.24153 degrees.

> Translation:

DX0.9304,DY0.453,DZ-0.1649

> Best fit mean error: 0.178263

> Best fit standard deviation: 0.24057

> Object nº2 has moved less

than: 5.894047

BestFit_Iteração_2

Transformation of element nº1

(Aj):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bj):

=====

> Roll (around X): -0.0601069 degrees

> Pitch (around Y): 0.154926 degrees

> Yaw (around Z): -0.089673 degrees.

> Translation:

DX-0.03359,DY-0.07033,DZ-0.008812

> Best fit mean error: 0.187495

> Best fit standard deviation: 0.251632

> Object nº2 has moved less

than: 0.137541

BestFit_Iteração_3

Transformation of element nº1

(Aj):

=====

> No movement

> Best fit mean error: 0

> Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(Bj):

=====

- > Roll (around X): 0.05158 degrees
- > Pitch (around Y): -0.0509293 degrees
- > Yaw (around Z): 0.050447 degrees.
- > Translation:
DX0.00874,DY0.04631,DZ0.01251
- > Best fit mean error: 0.183428
- > Best fit standard deviation: 0.247226
- > Object nº2 has moved less
than: 0.065429

PEDRA I:

1º Best Fit

Transformation of element nº1

(A_I):

=====

- > No movement
- > Best fit mean error: 0
- > Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(B_I):

=====

- > Roll (around X): -5.36172 degrees
- > Pitch (around Y): 0.946697 degrees
- > Yaw (around Z): 3.47738 degrees.
- > Translation:
DX-3.471,DY-6.767,DZ-3.832
- > Best fit mean error: 0.166145
- > Best fit standard deviation: 0.202984
- > Object nº2 has moved less
than: 10.459994

2º Best Fit

Transformation of element nº1

(A_I):

=====

- > No movement
- > Best fit mean error: 0
- > Best fit standard deviation: 0

Transformation of element nº2

(B_I):

=====

- > Roll (around X): 0.0648986 degrees
- > Pitch (around Y): 0.031421 degrees
- > Yaw (around Z): -0.0523053 degrees.
- > Translation:
DX-0.1096,DY0.05646,DZ-0.07616
- > Best fit mean error: 0.165188
- > Best fit standard deviation: 0.201209
- > Object nº2 has moved less
than: 0.188819

ANEXO IV

Medição Digital das Partículas

PEDRA 1:

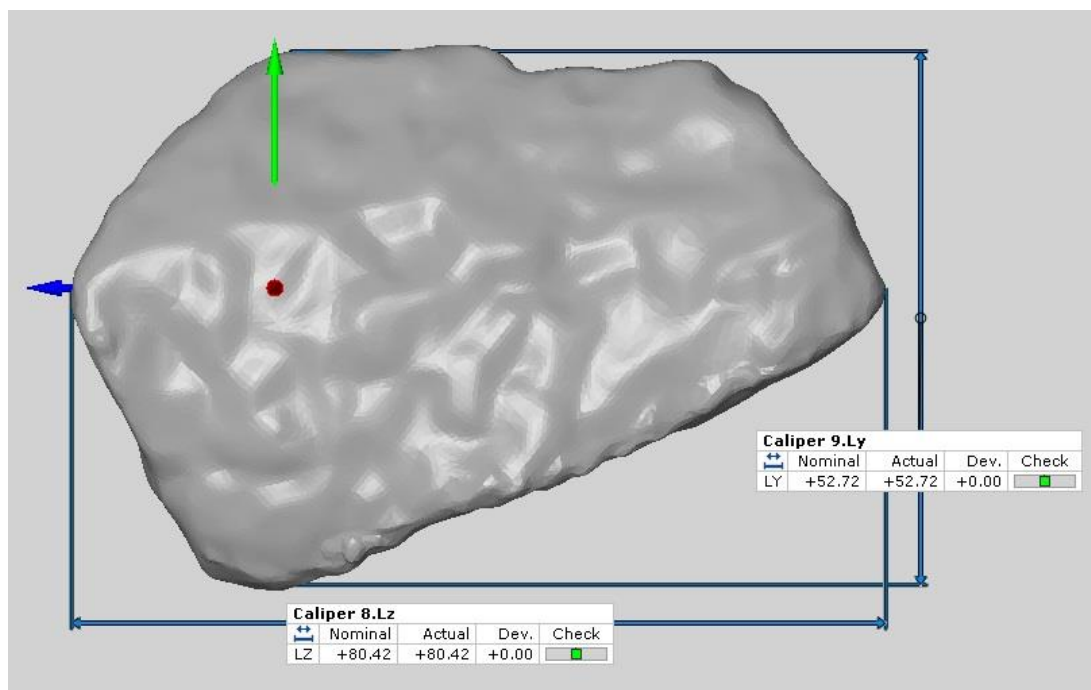


Figura IX – Pedra 1 antes do ensaio – vista 1.

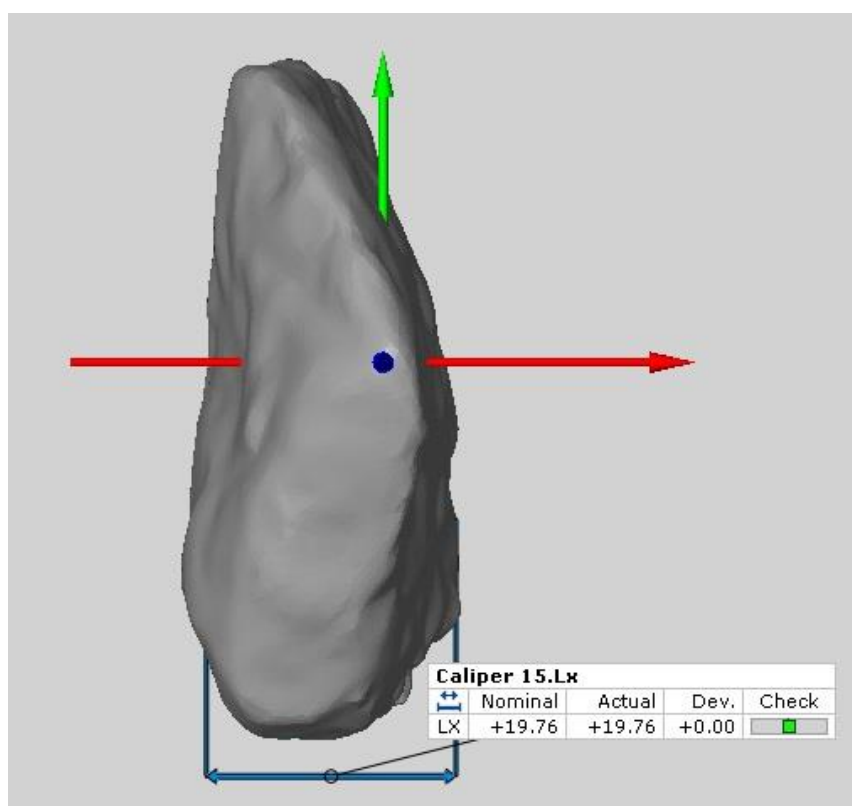


Figura X – Pedra 1 antes do ensaio – vista 2.

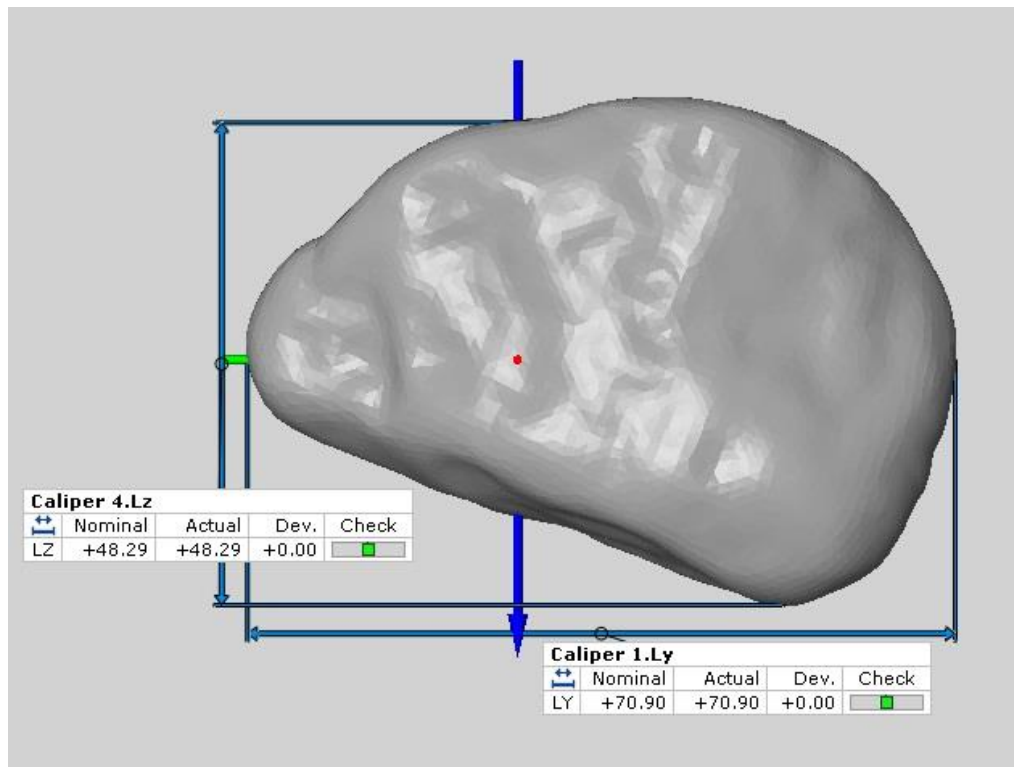


Figura XI – Pedra 1 após ensaio – vista 1.

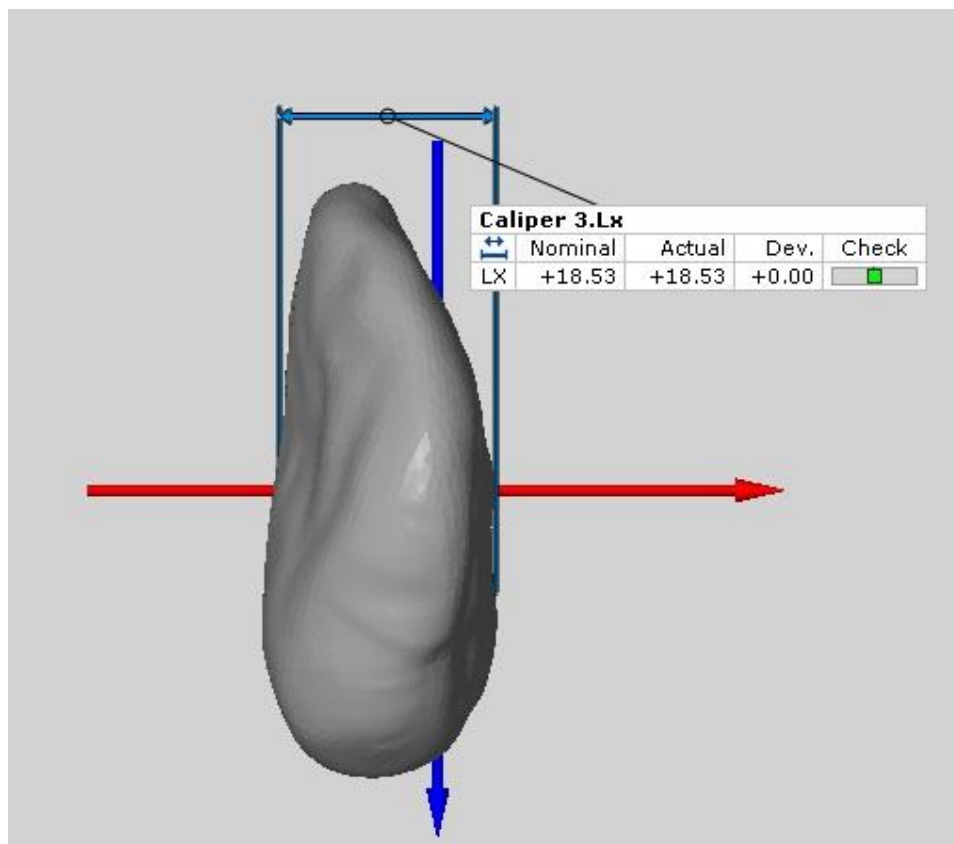


Figura XII – Pedra 1 após ensaio – vista 2.

PEDRA 2:

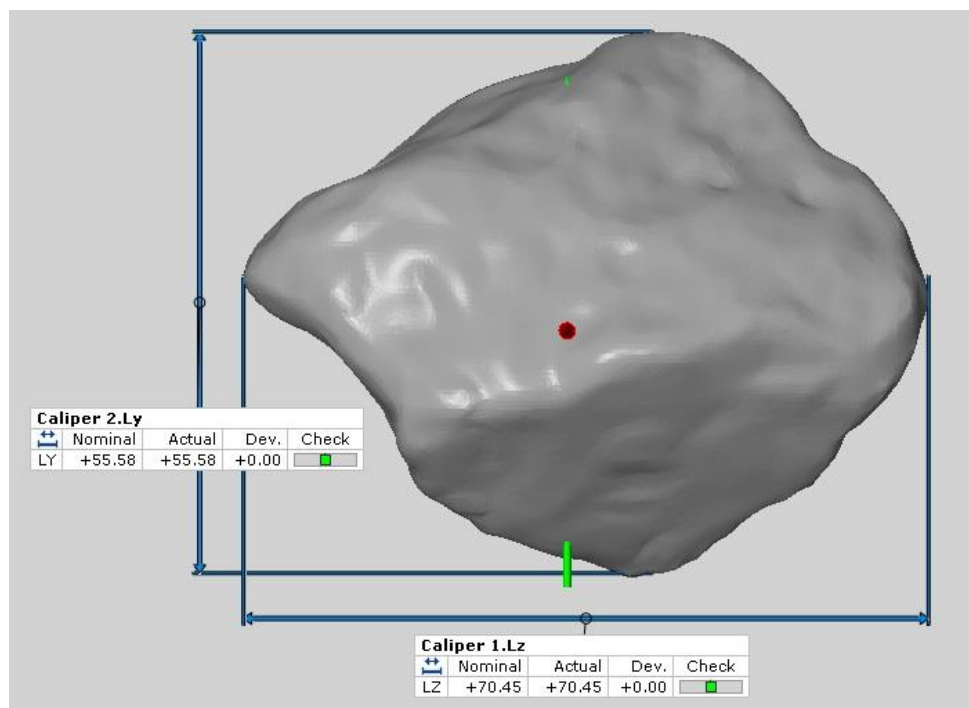


Figura XIII – Pedra 2 antes do ensaio – vista 1.

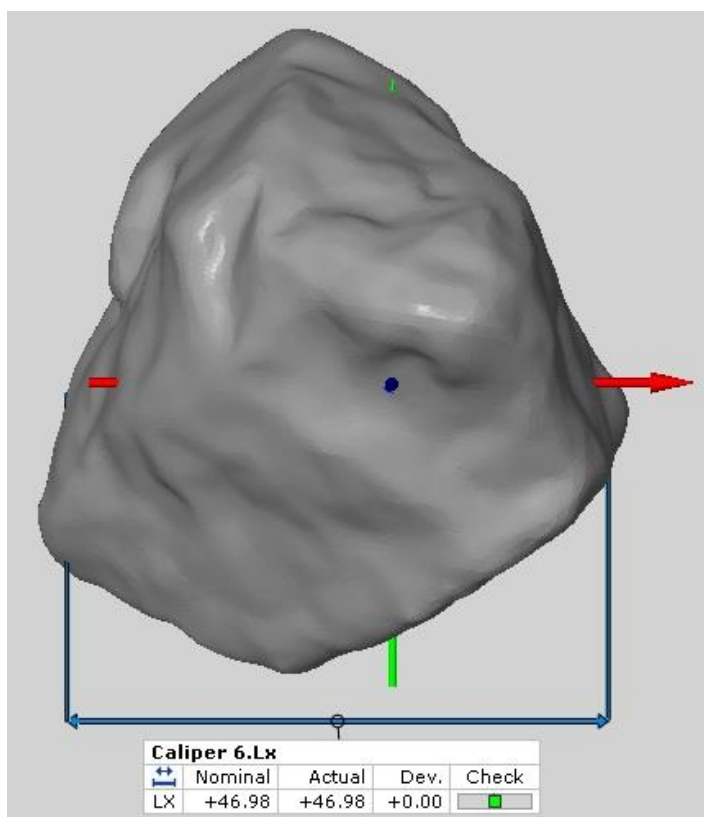


Figura XIV – Pedra 2 antes do ensaio – vista 2.

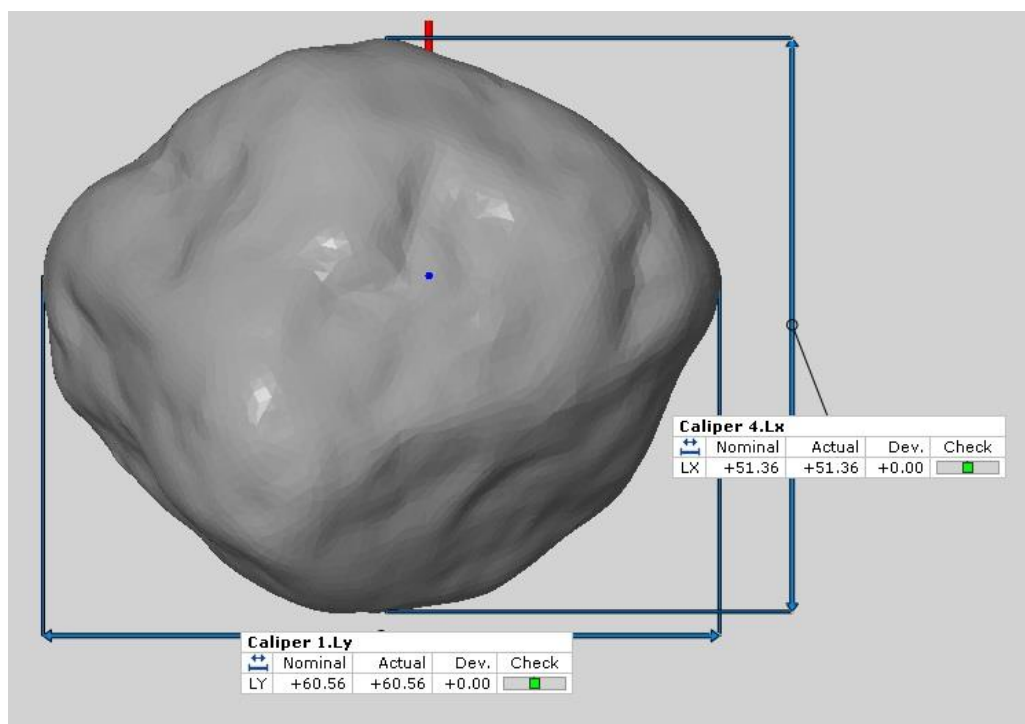


Figura XV – Pedra 2 após ensaio – vista 1.

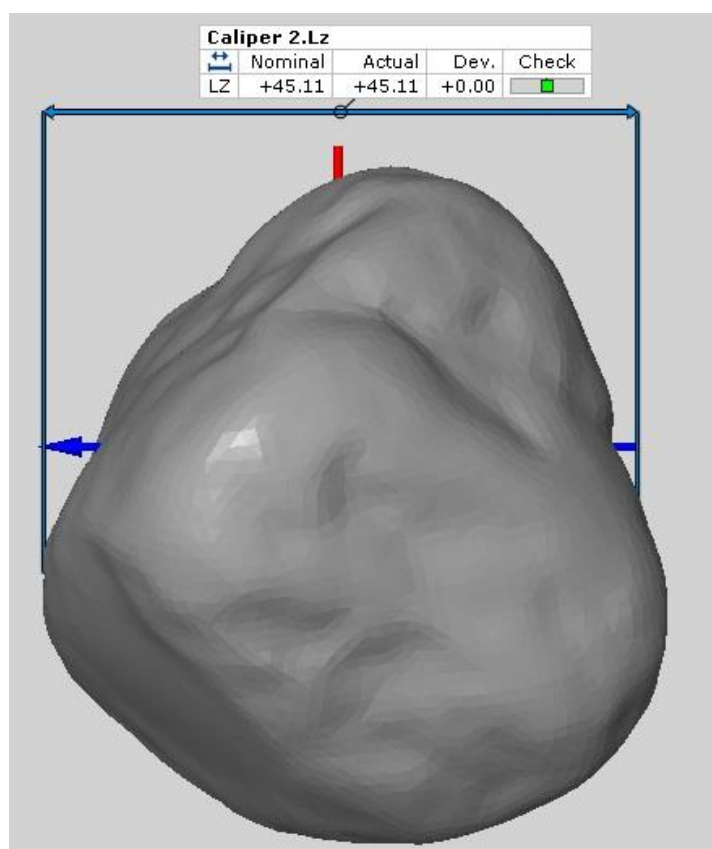


Figura XVI – Pedra 2 após ensaio – vista 2.

PEDRA 3:

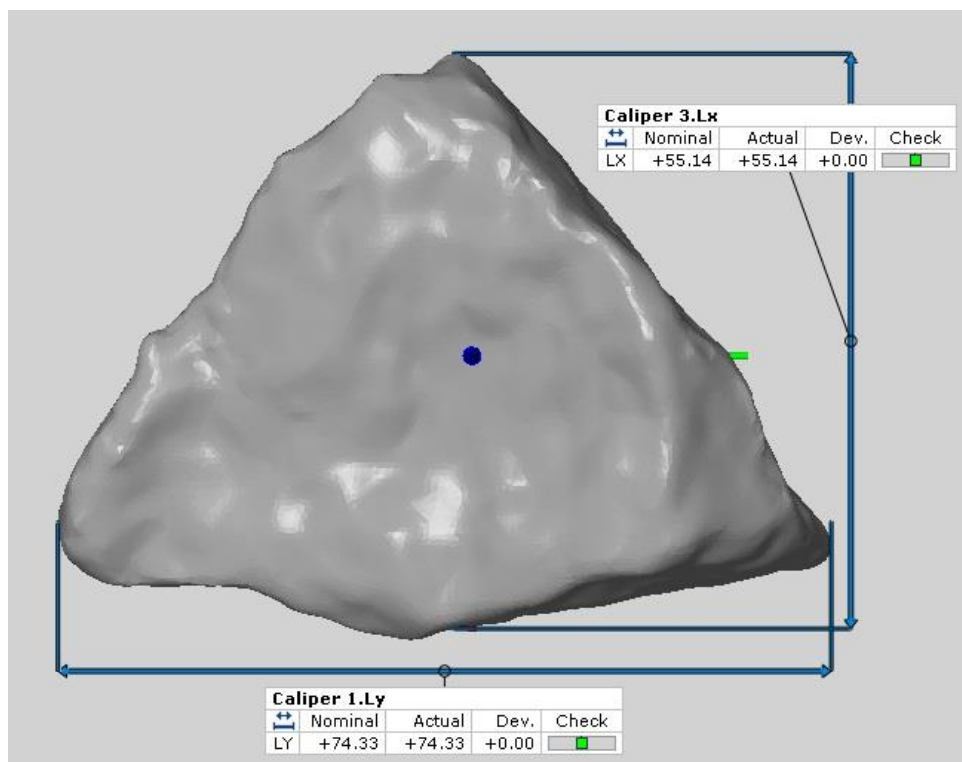


Figura XVII – Pedra 3 antes do ensaio – vista 1.

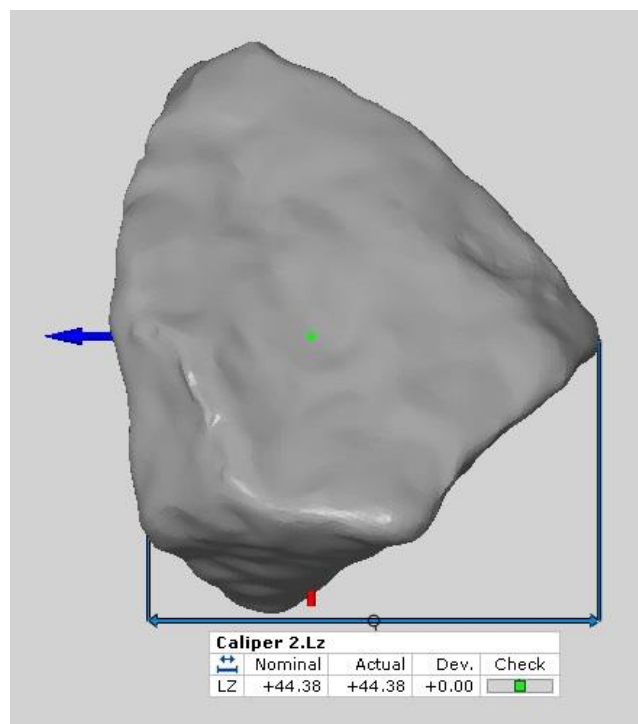


Figura XVIII – Pedra 3 antes do ensaio – vista 2.

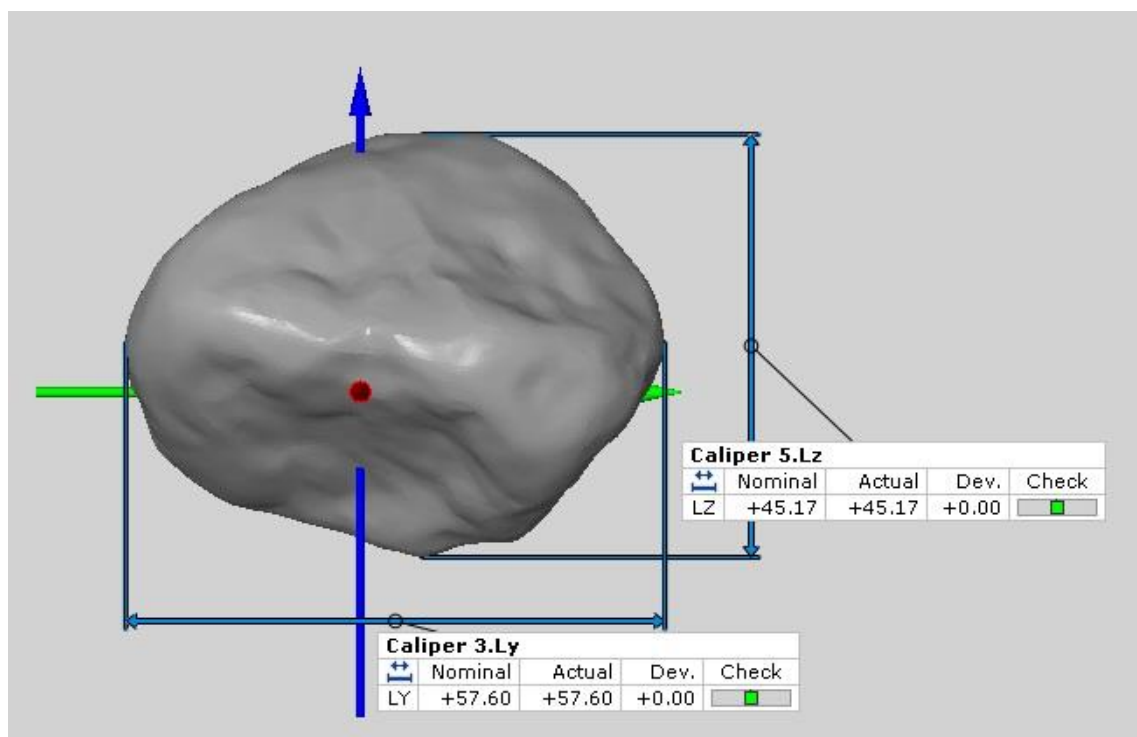


Figura XIX – Pedra 3 após ensaio – vista 1.

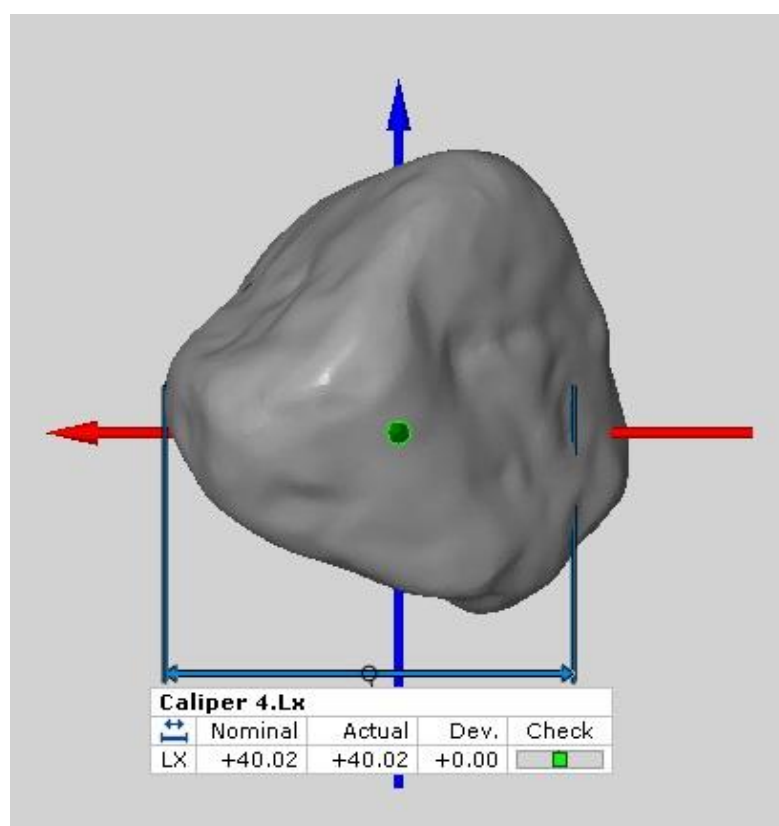


Figura XX – Pedra 3 após ensaio – vista 2.

PEDRA 4:

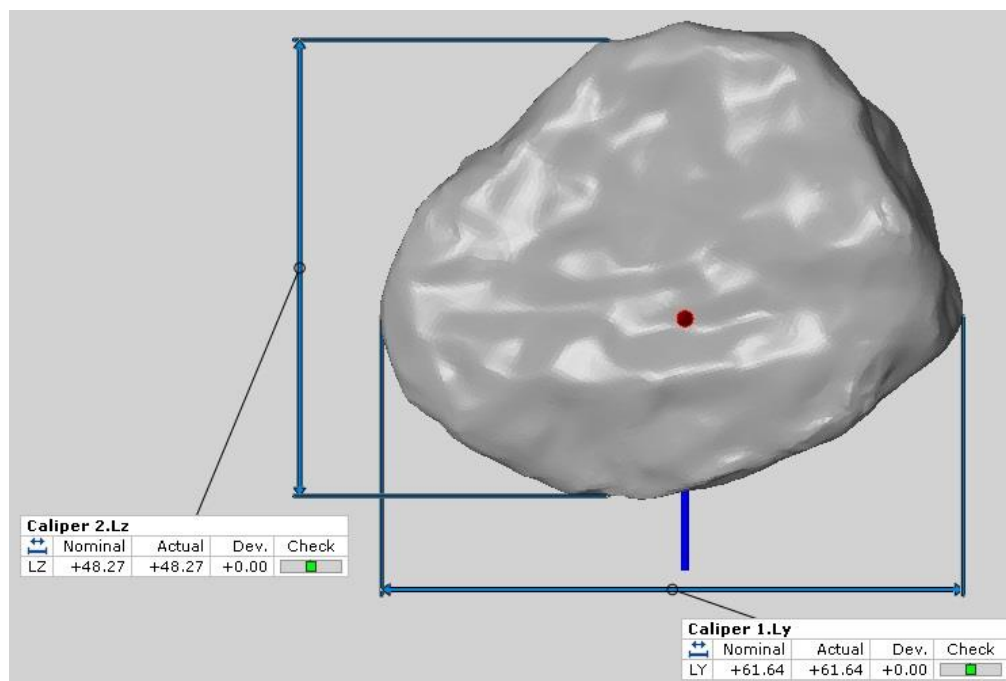


Figura XXI – Pedra 4 antes do ensaio – vista 1.

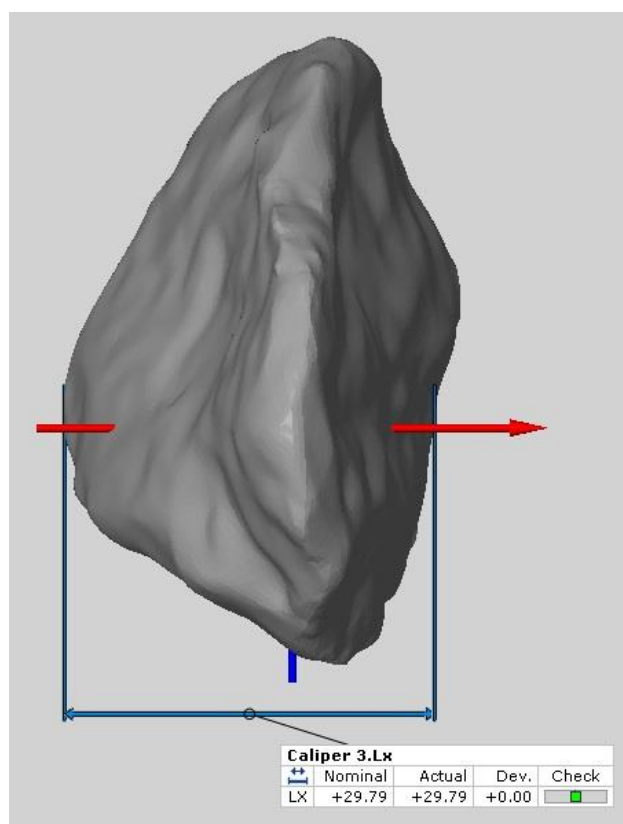


Figura XXII – Pedra 4 antes do ensaio – vista 2.

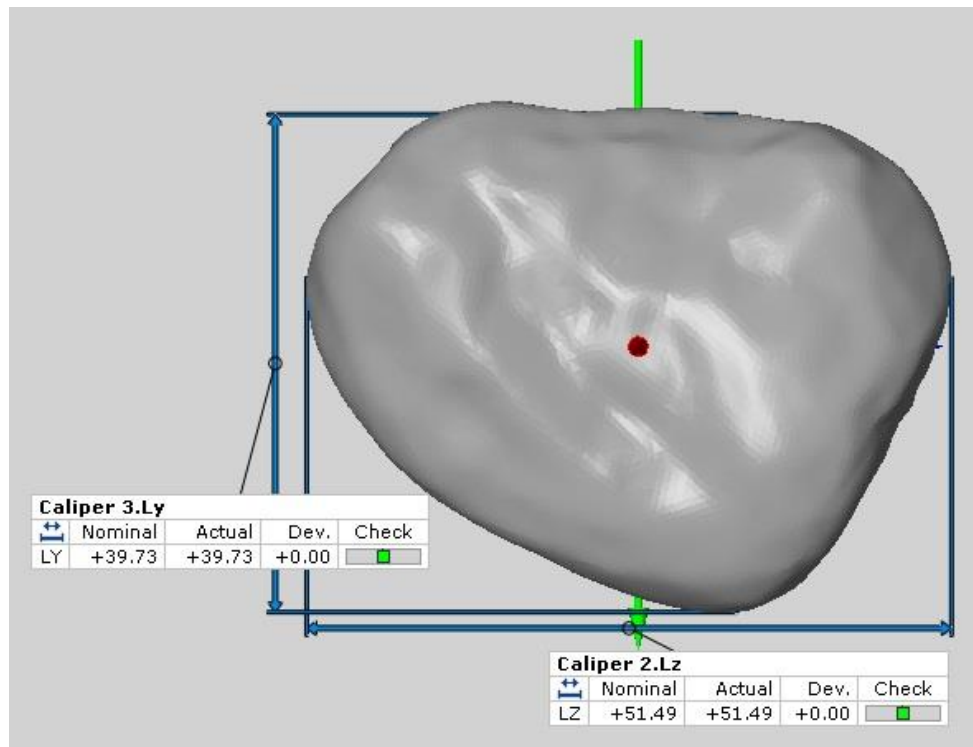


Figura XXIII – Pedra 4 após ensaio – vista 1.

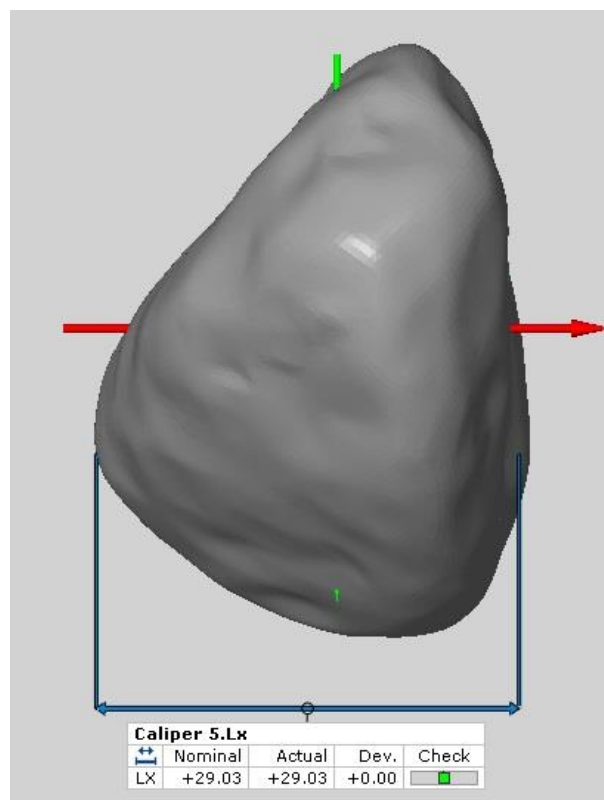


Figura XXIV – Pedra 4 após ensaio – vista 2.

PEDRA 6:

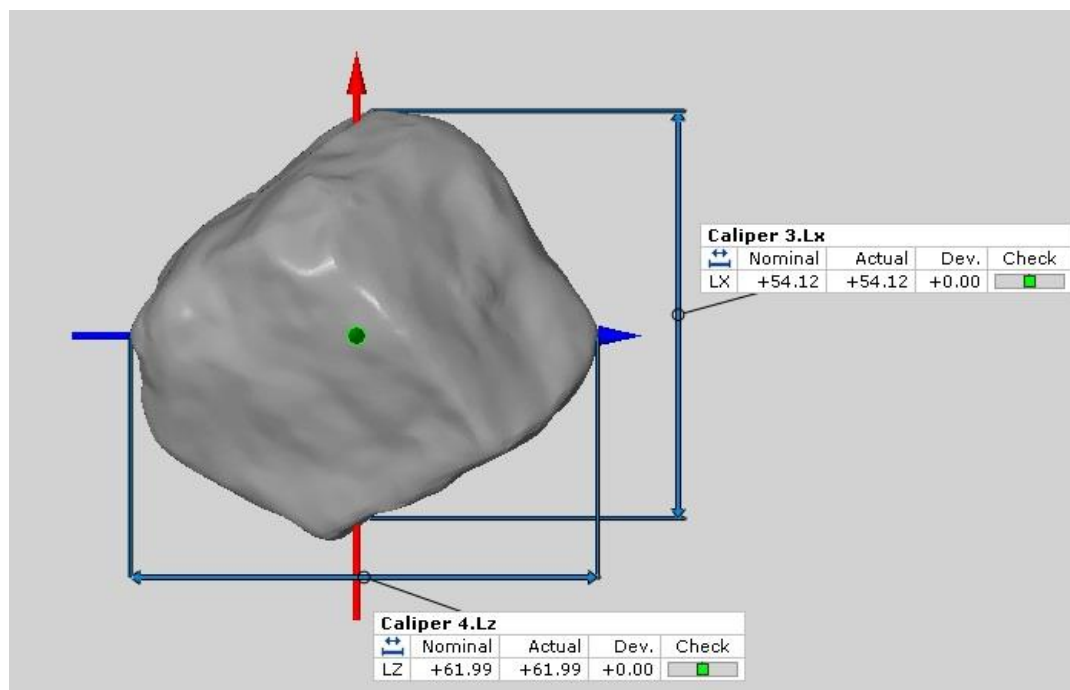


Figura XXV – Pedra 6 antes do ensaio – vista 1.

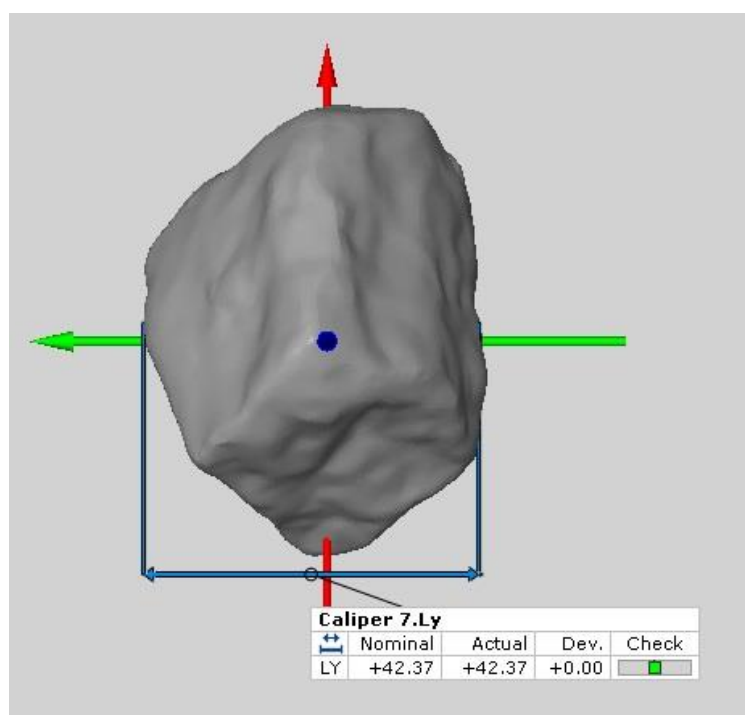


Figura XXVI – Pedra 6 antes do ensaio – vista 2.

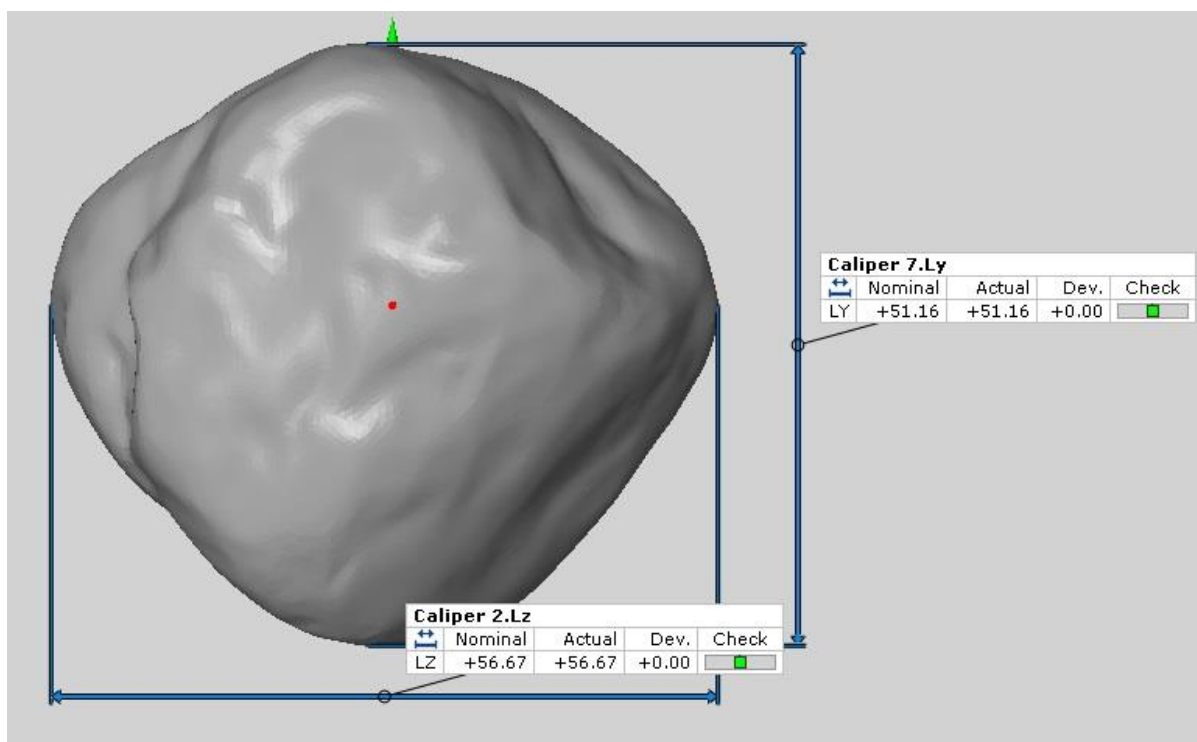


Figura XXVII – Pedra 6 após ensaio – vista 1.

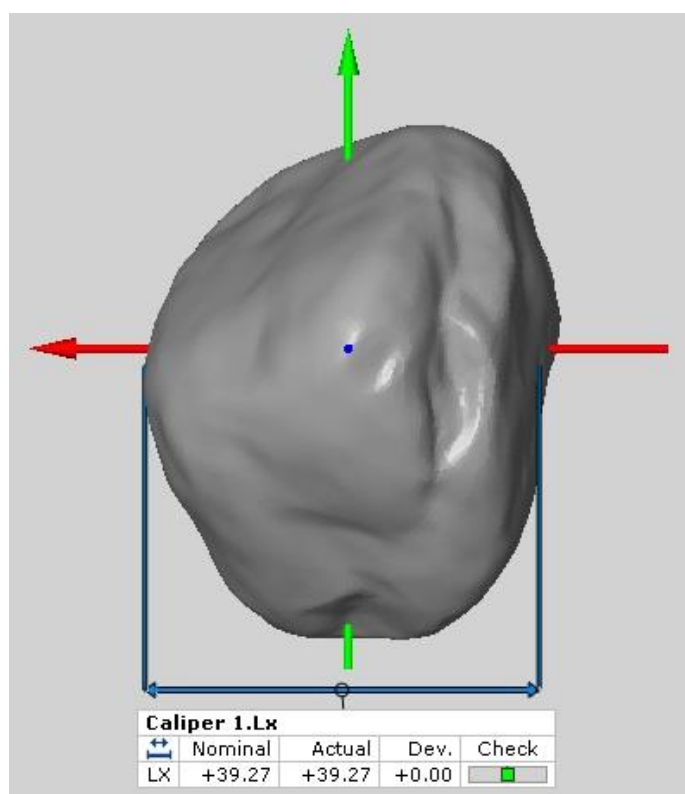


Figura XXVIII – Pedra 6 após ensaio – vista 2.

PEDRA 7:

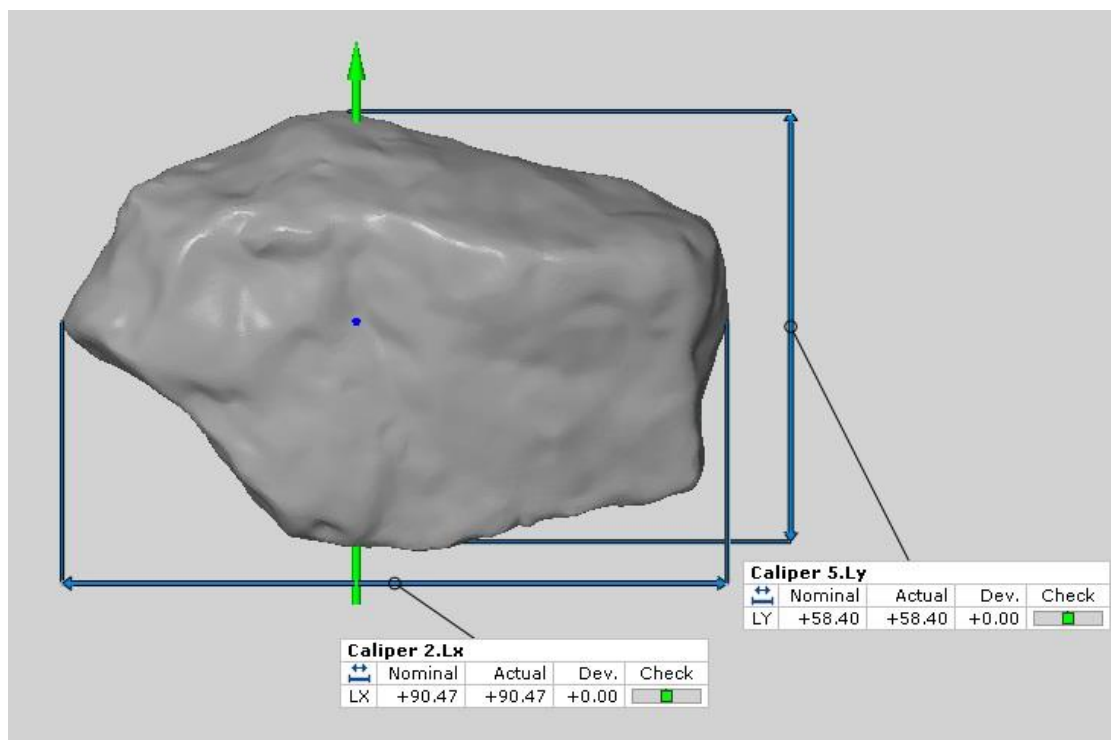


Figura XXIX – Pedra 7 antes do ensaio – vista 1.

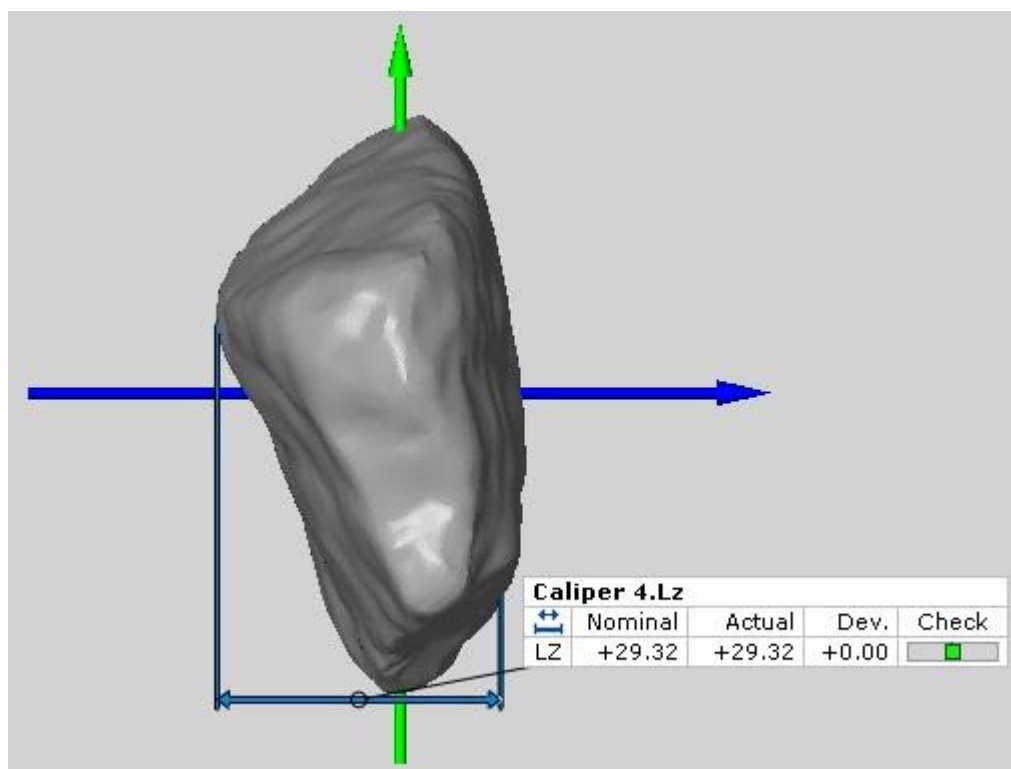


Figura XXX – Pedra 7 antes do ensaio – vista 2.

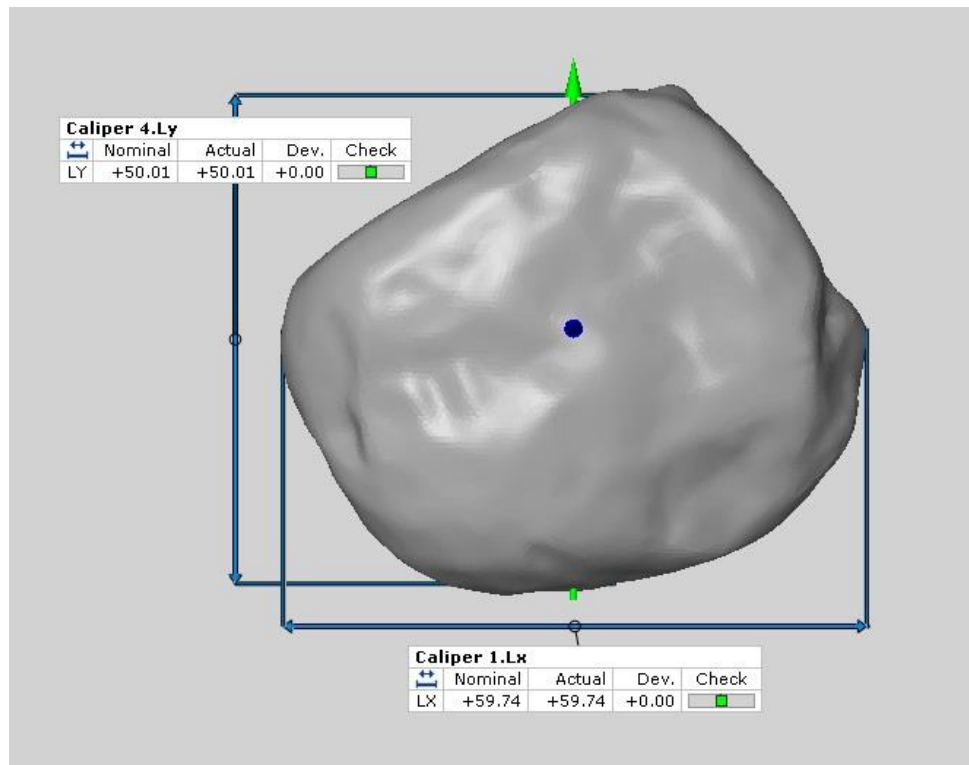


Figura XXXI – Pedra 7 após ensaio – vista 1.

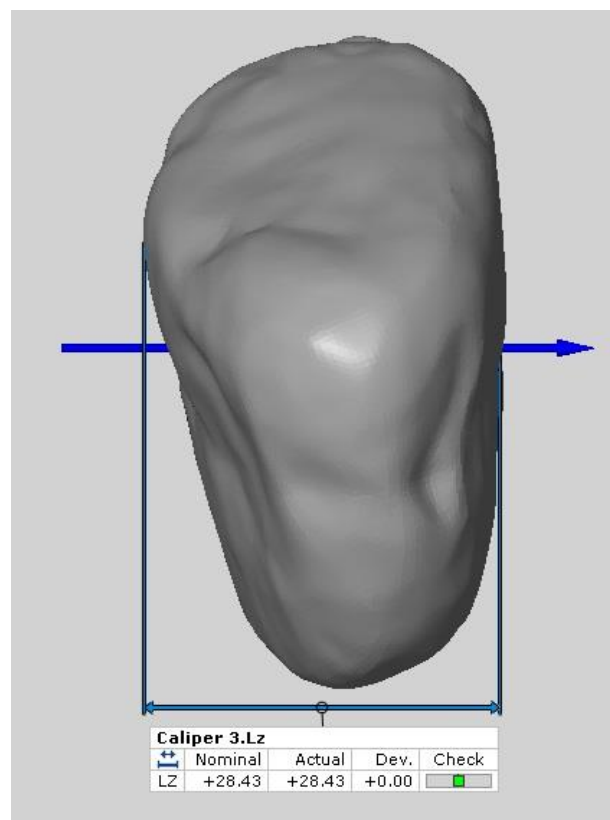


Figura XXXII – Pedra 7 após ensaio – vista 2.

PEDRA 8:

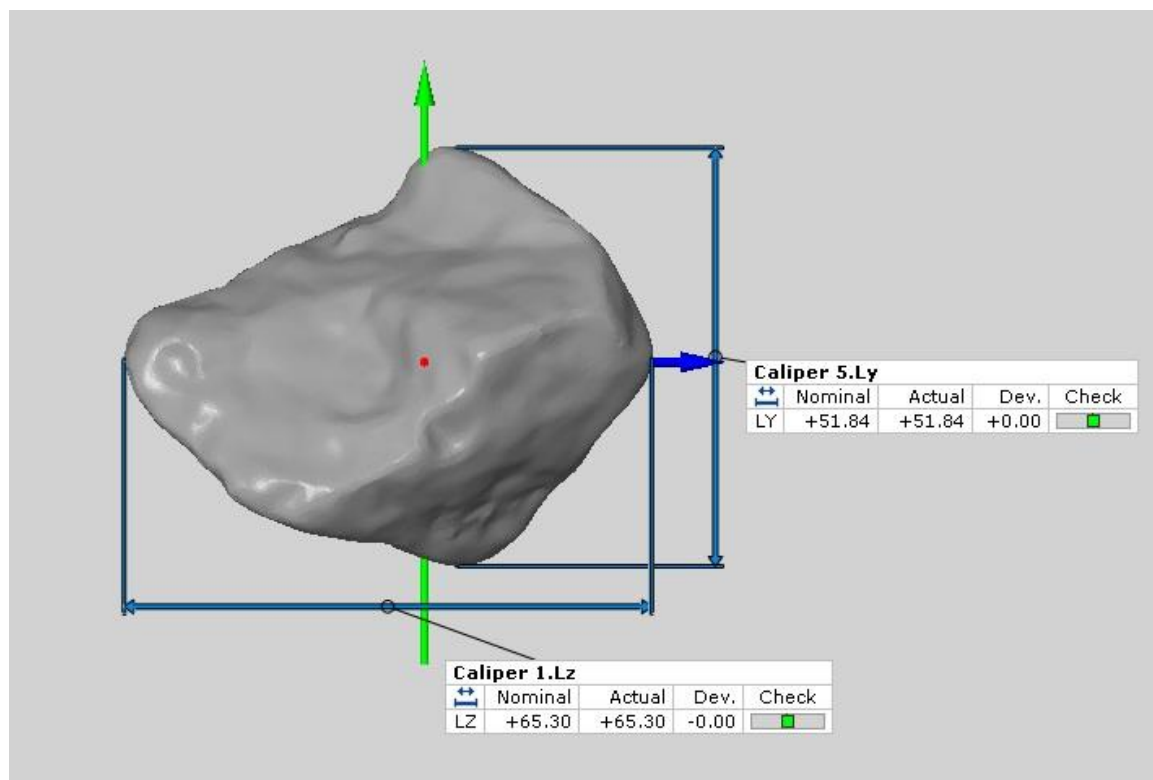


Figura XXXIII – Pedra 8 antes do ensaio – vista 1.

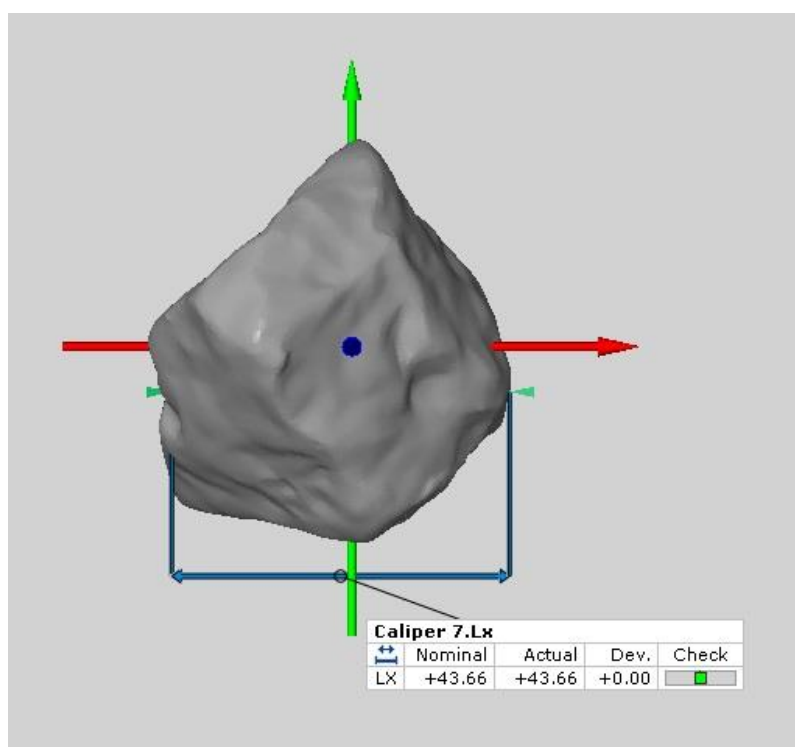


Figura XXXIV – Pedra 8 antes do ensaio – vista 2.

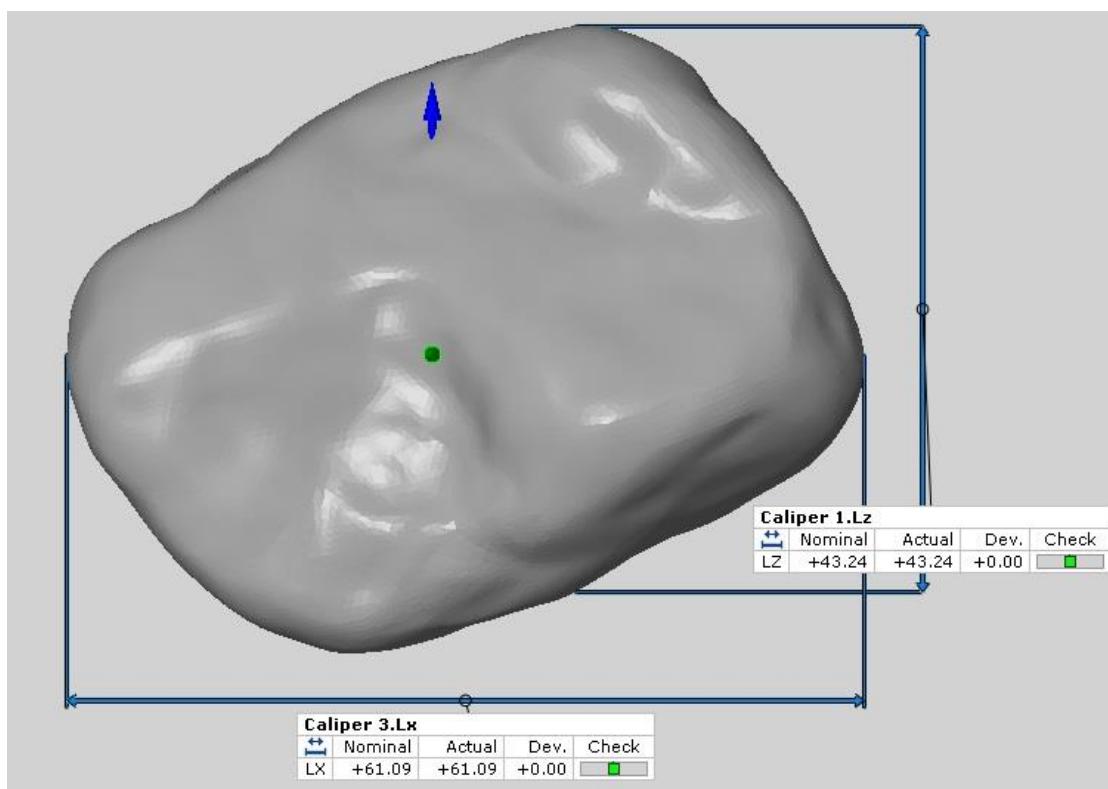


Figura XXXV – Pedra 8 após ensaio – vista 1.

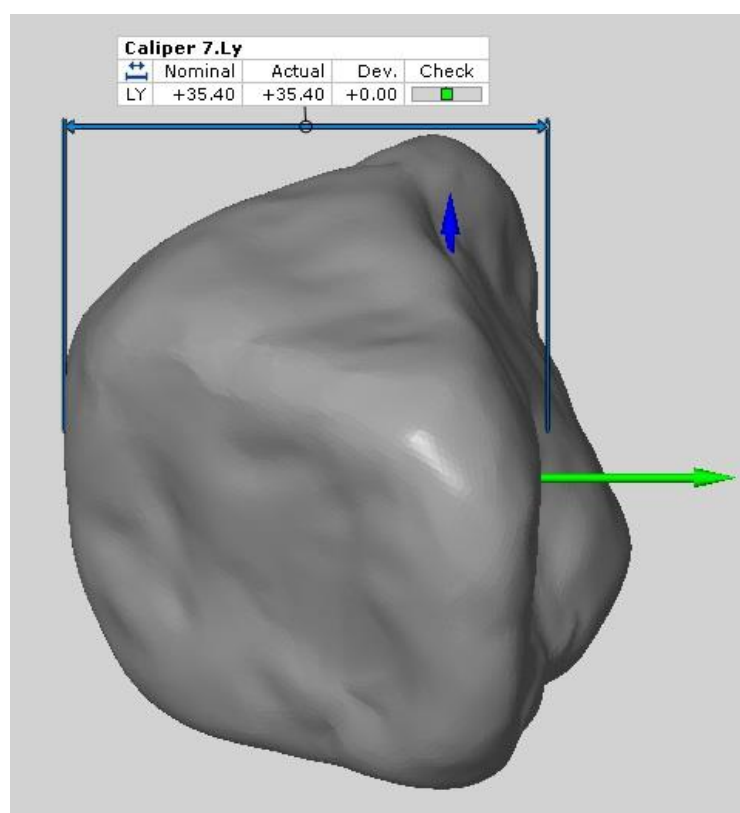


Figura XXXVI – Pedra 8 após ensaio – vista 2.

PEDRA 9:

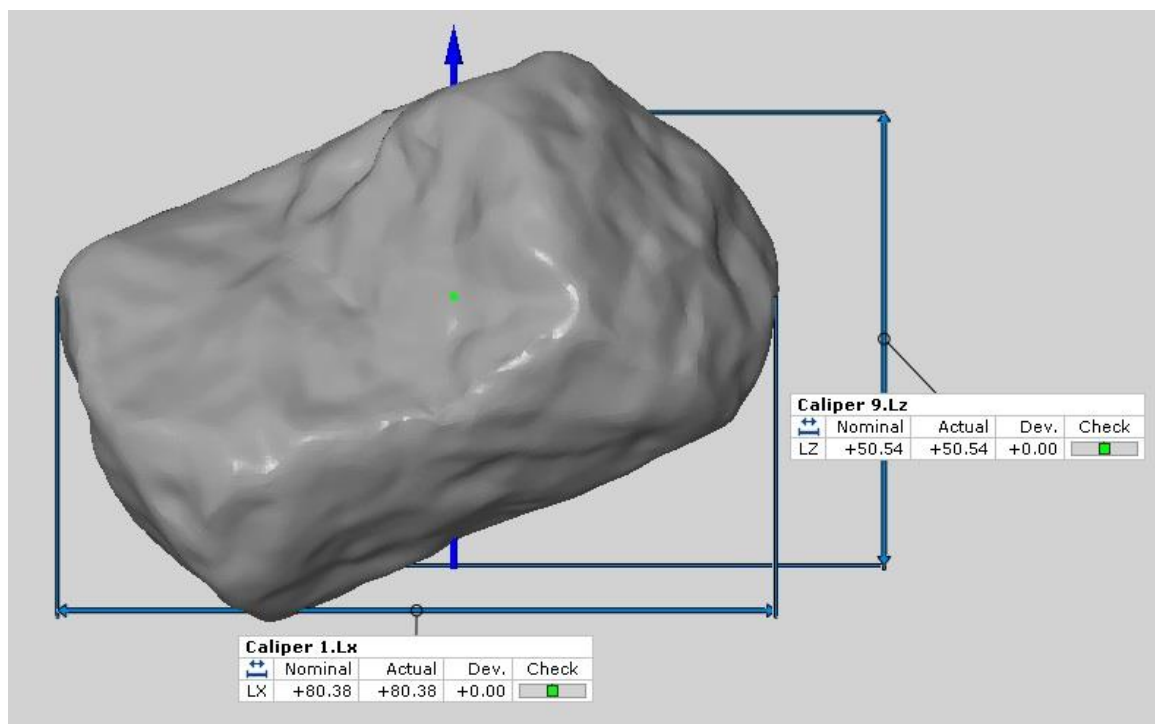


Figura XXXVII – Pedra 9 antes do ensaio – vista 1.

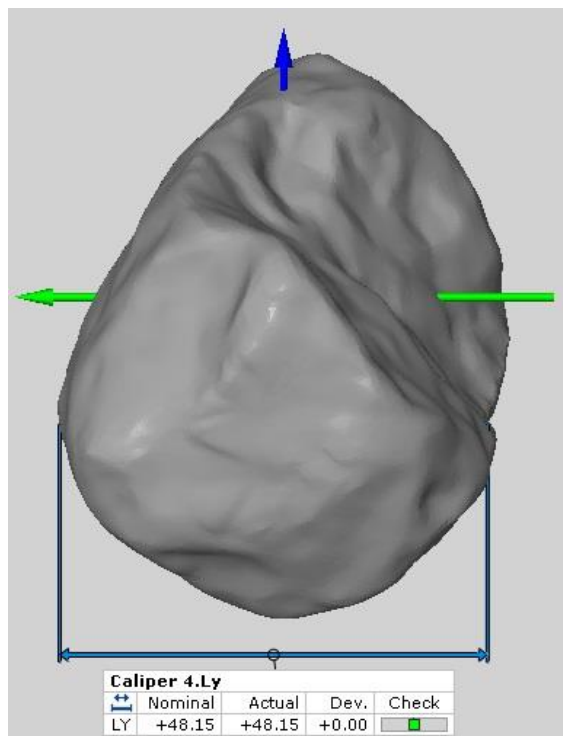


Figura XXXVIII – Pedra 9 antes do ensaio – vista 2.

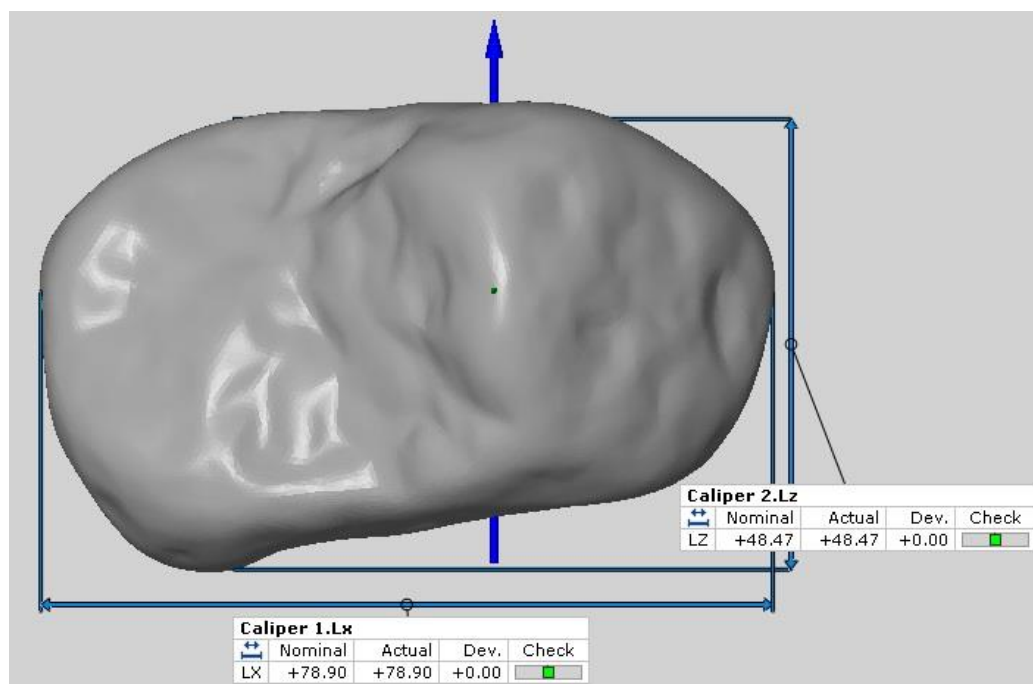


Figura XXXIX – Pedra 9 após ensaio – vista 1.

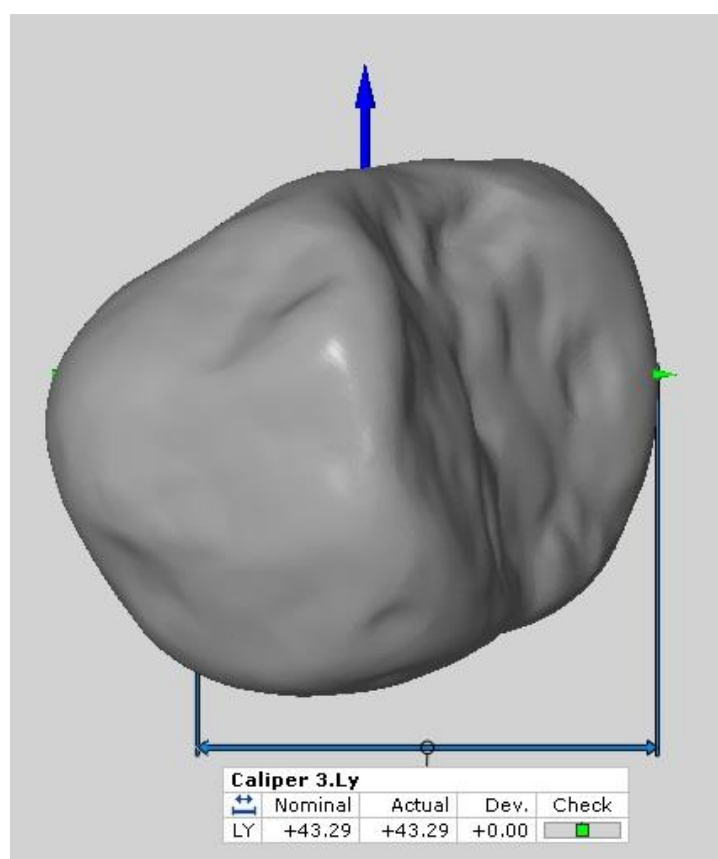


Figura XL – Pedra 9 após ensaio – vista 2.

PEDRA 10:

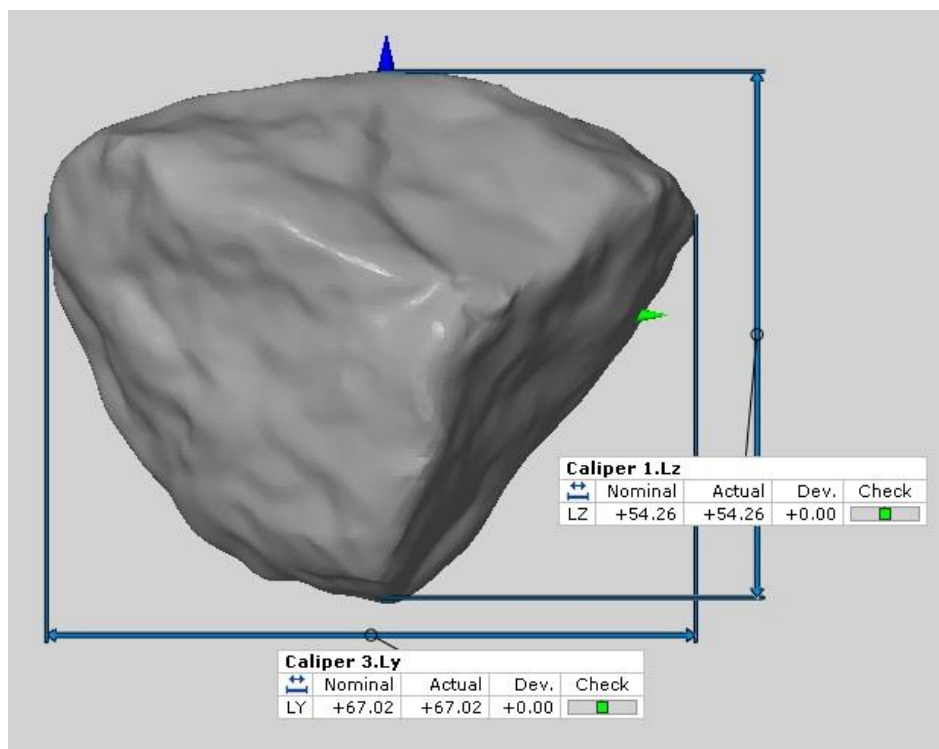


Figura XLI – Pedra 10 antes do ensaio – vista 1.

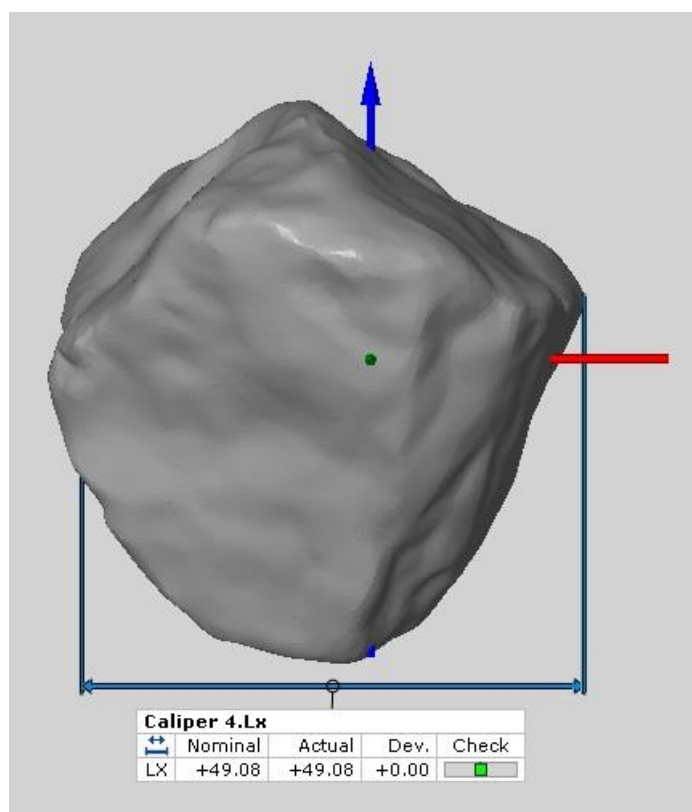


Figura XLII – Pedra 10 antes do ensaio – vista 2.

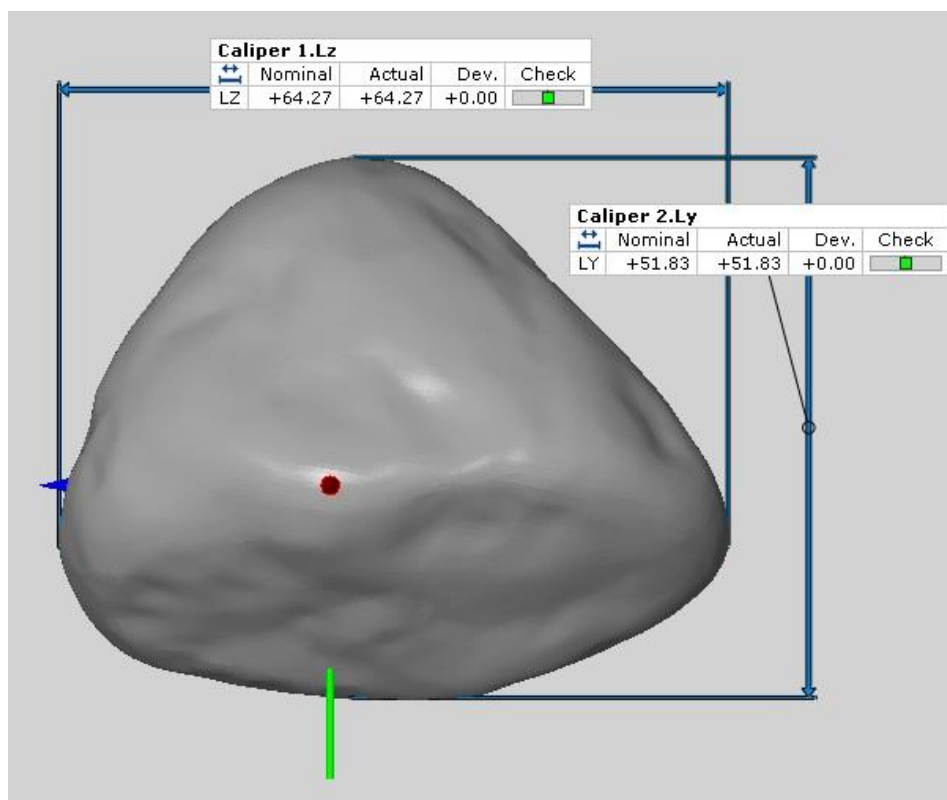


Figura XLIII – Pedra 10 após ensaio – vista 1.

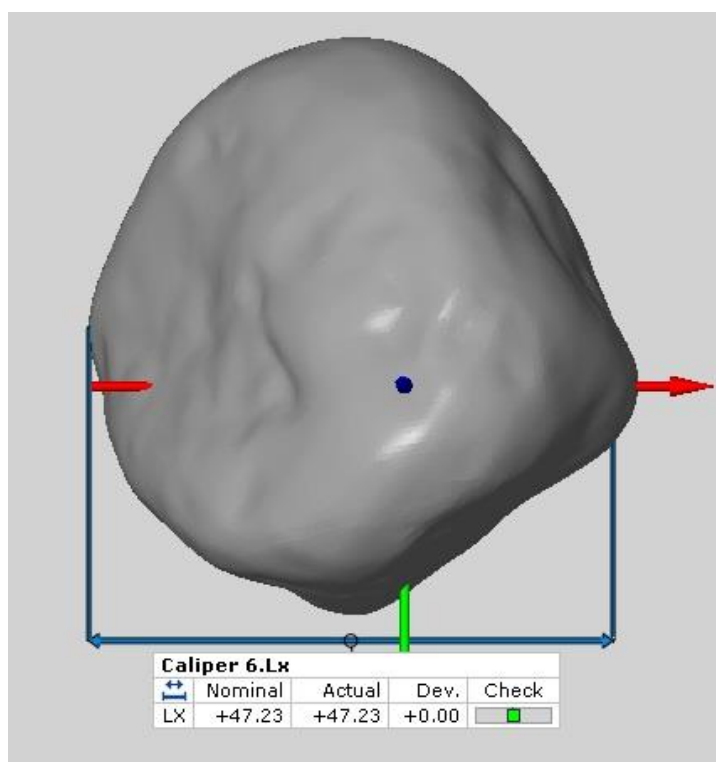


Figura XLIV – Pedra 10 após ensaio – vista 2.

PEDRA A:

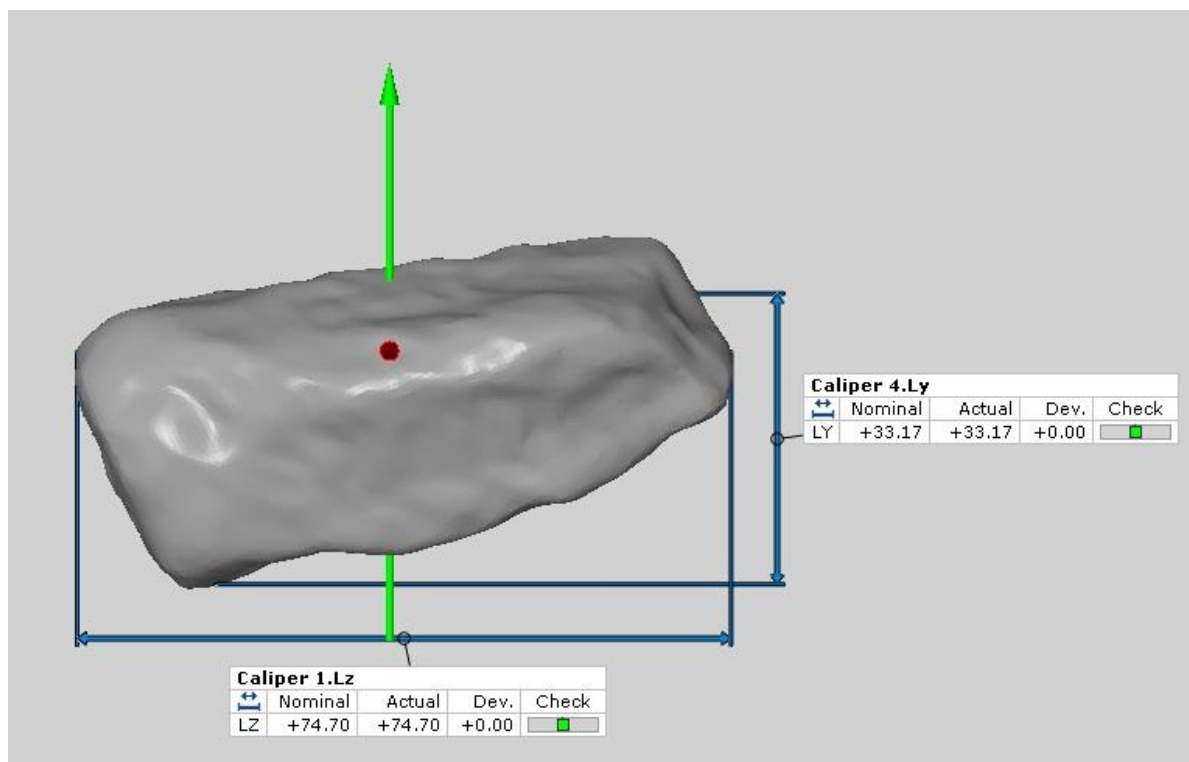


Figura XLV – Pedra a antes do ensaio – vista 1.

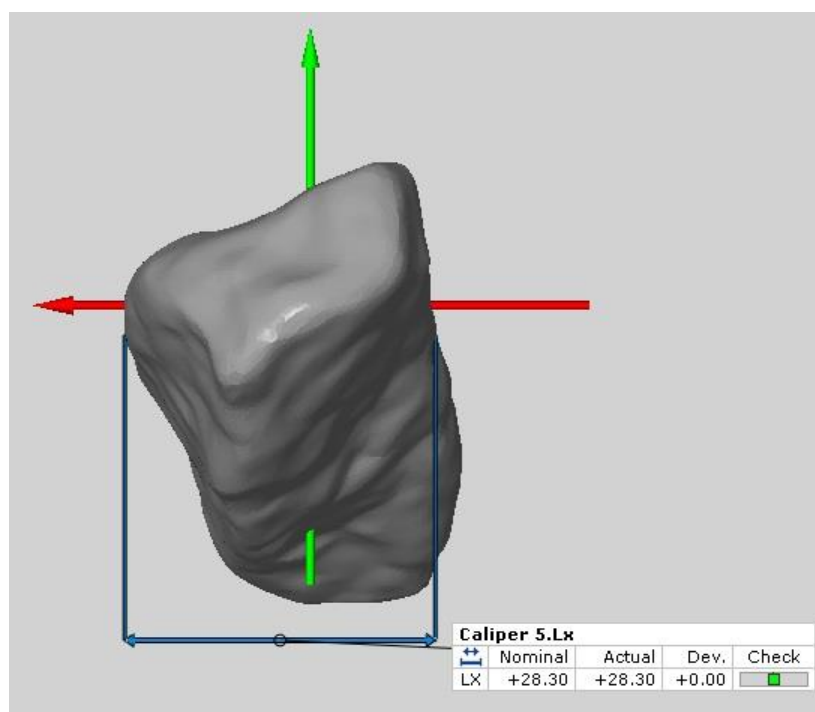


Figura XLVI – Pedra a antes do ensaio – vista 2.

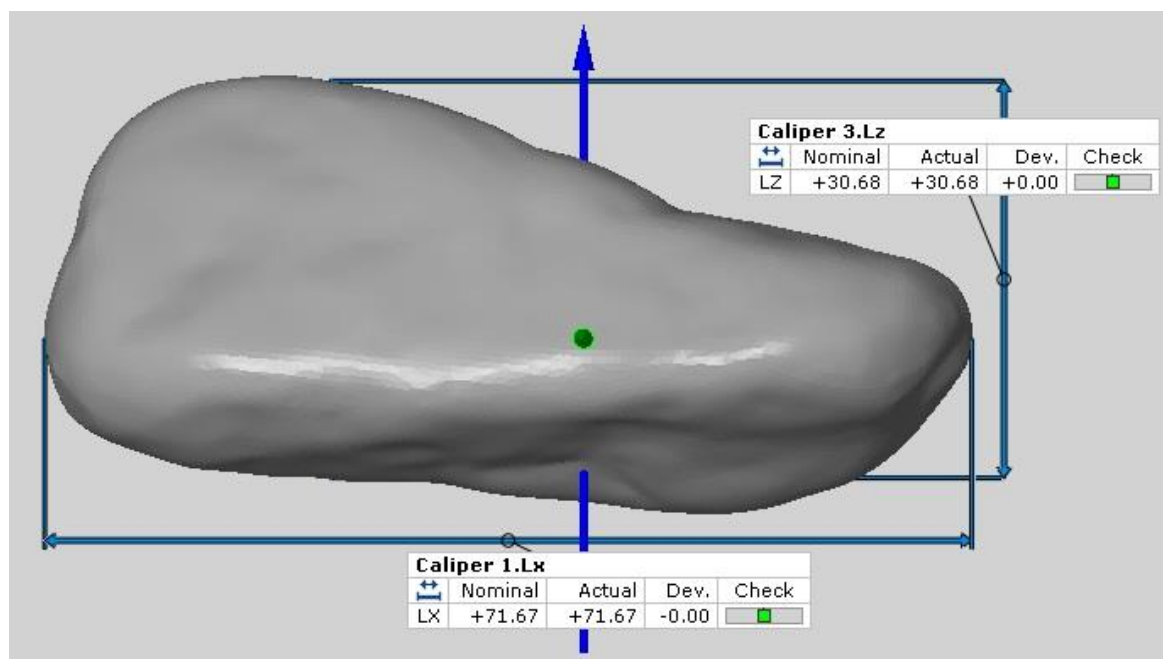


Figura XLVII – Pedra a após ensaio – vista 1.

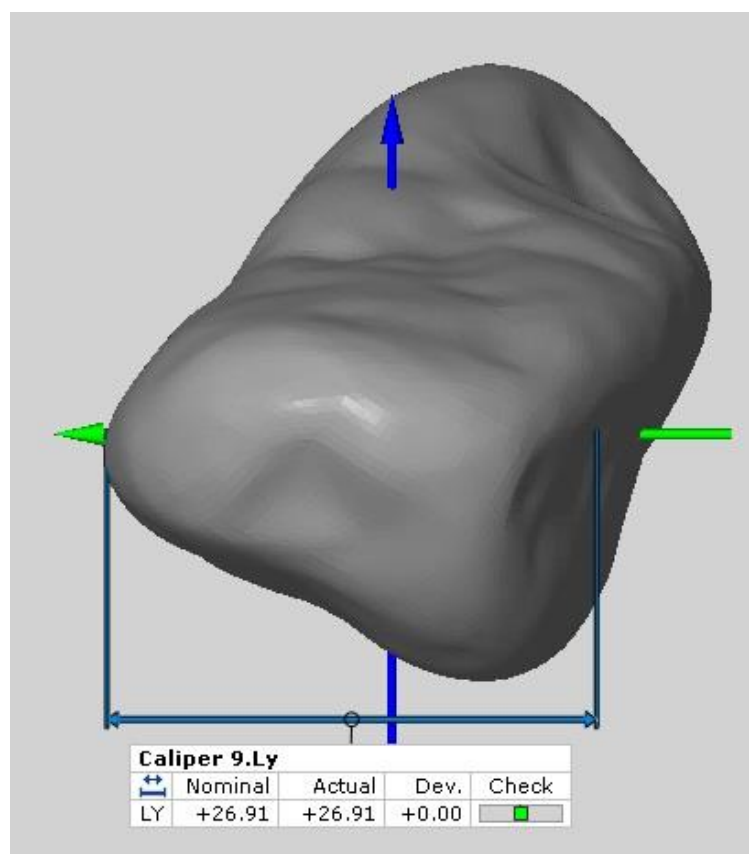


Figura XLVIII – Pedra a após ensaio – vista 2.

PEDRA C:

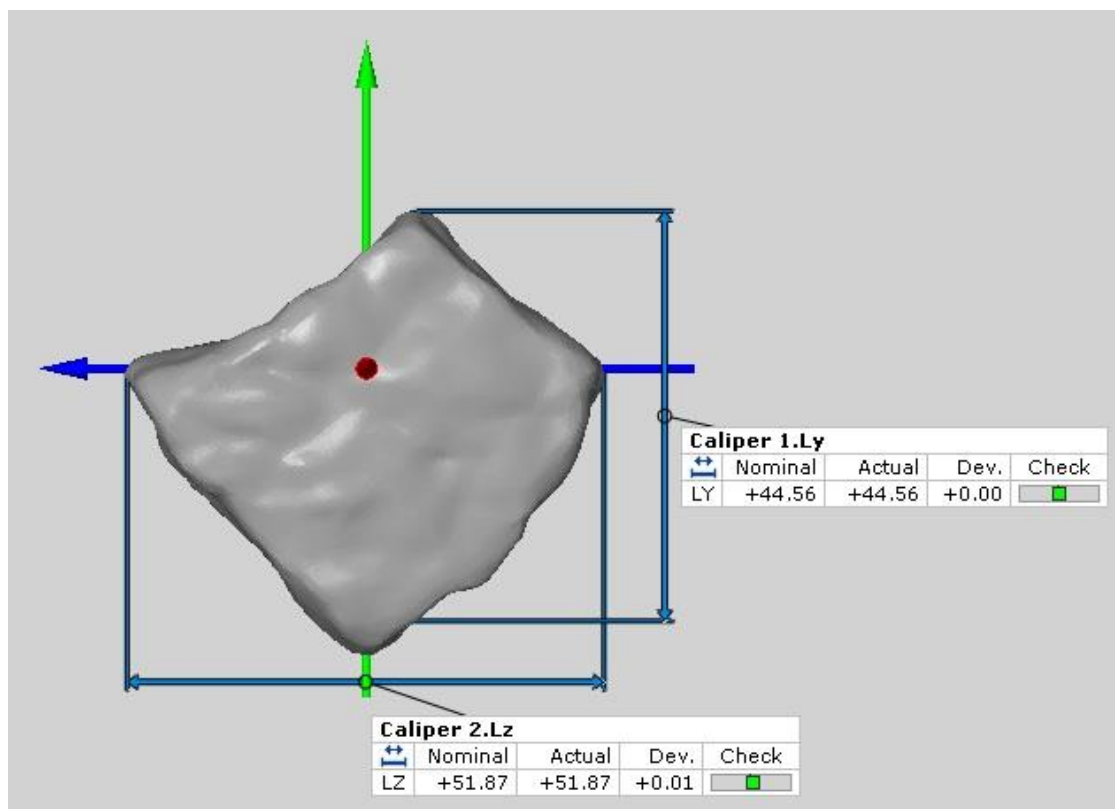


Figura XLIX – Pedra c antes do ensaio – vista 1.

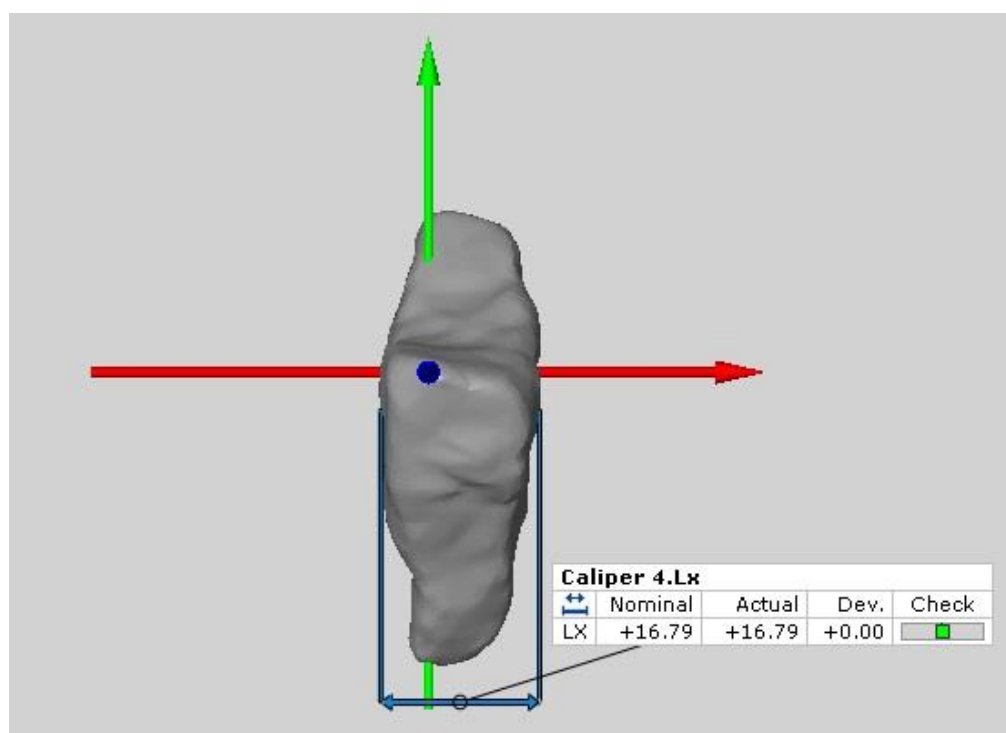


Figura L – Pedra c antes do ensaio – vista 2.

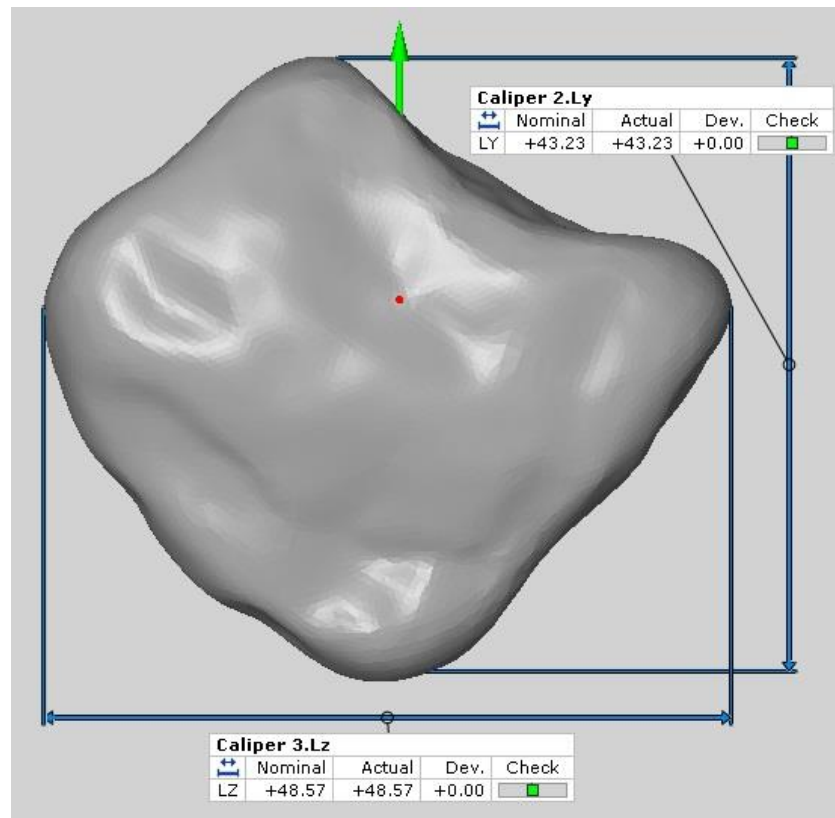


Figura LI – Pedra c após ensaio – vista 1.

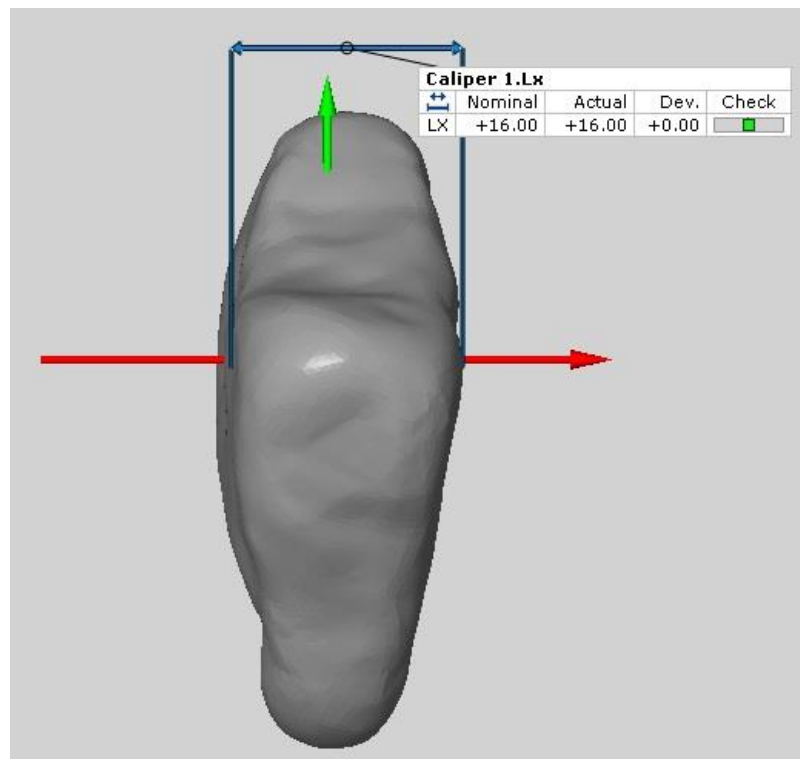


Figura LII – Pedra c após ensaio – vista 2.

PEDRA F:

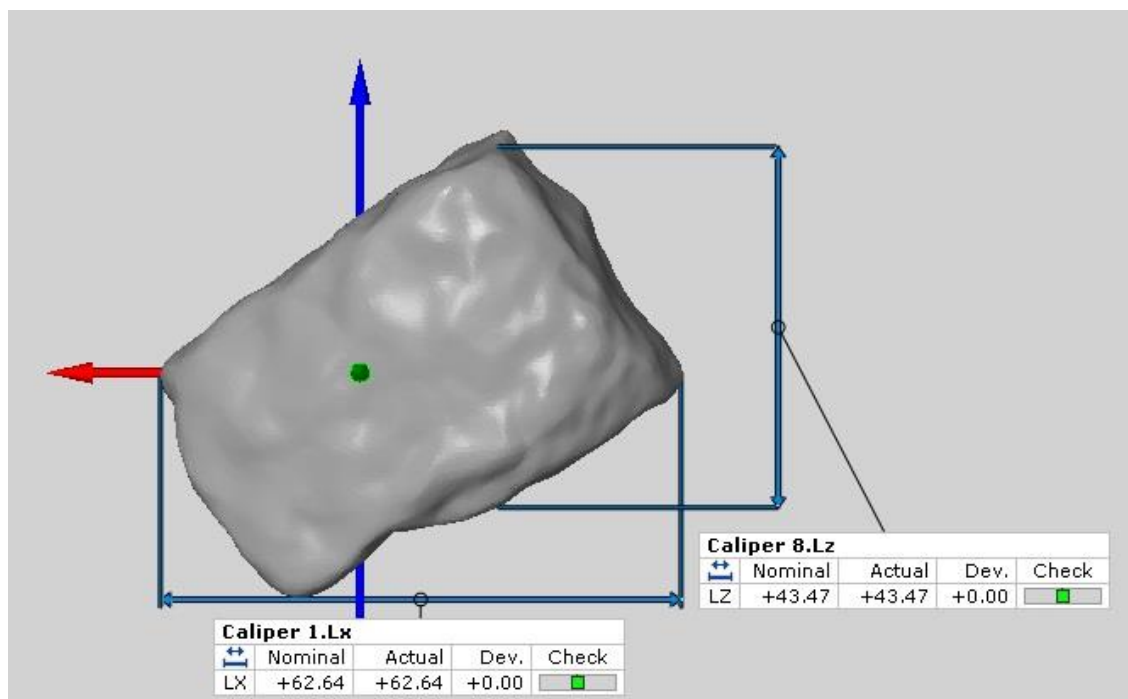


Figura LIII – Pedra f antes do ensaio – vista 1.

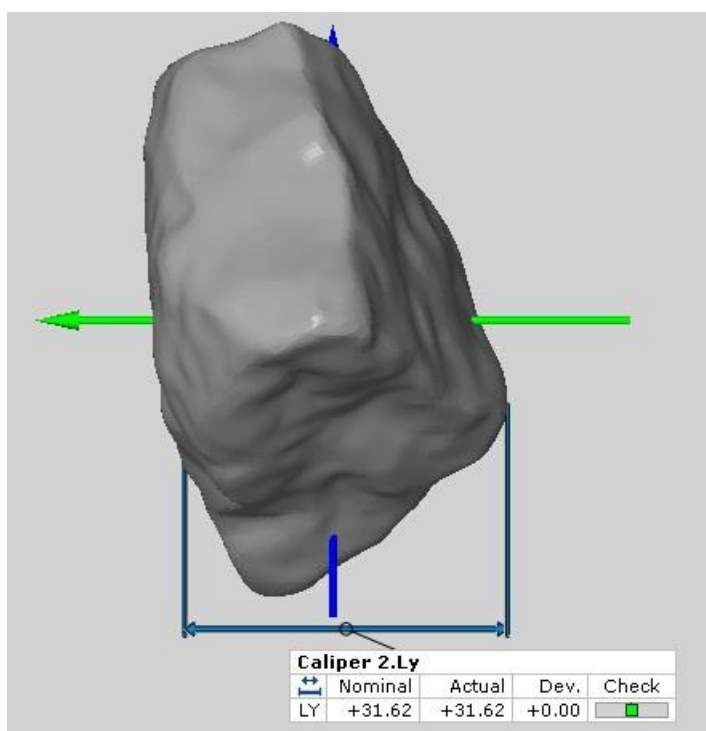


Figura LIV – Pedra f antes do ensaio – vista 2.

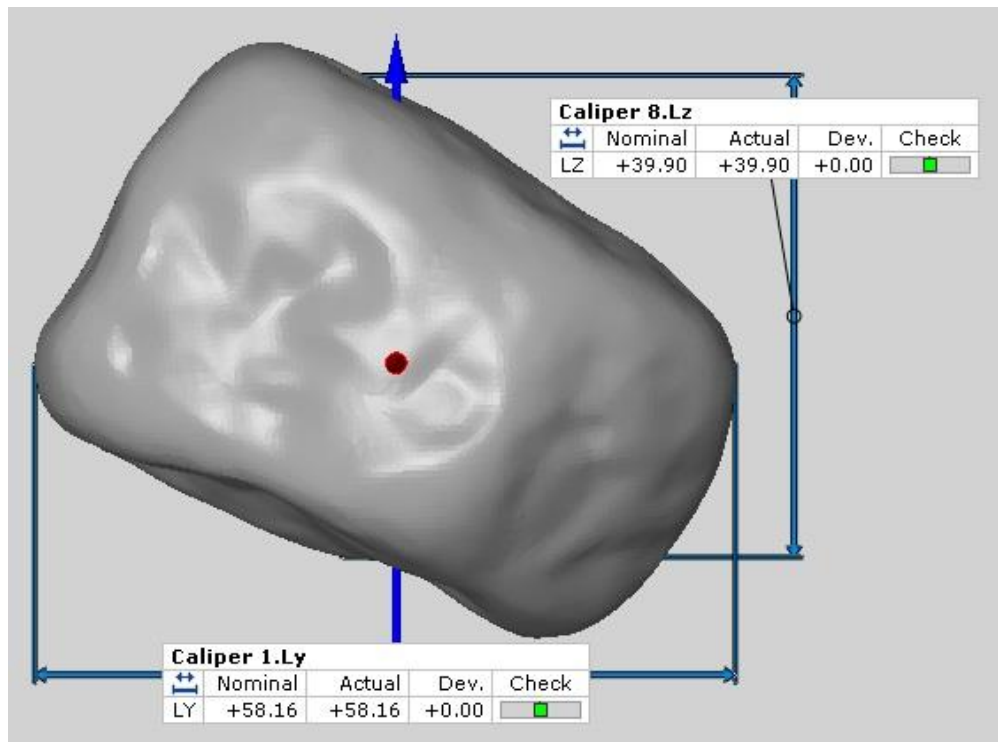


Figura LV – Pedra f após ensaio – vista 1.

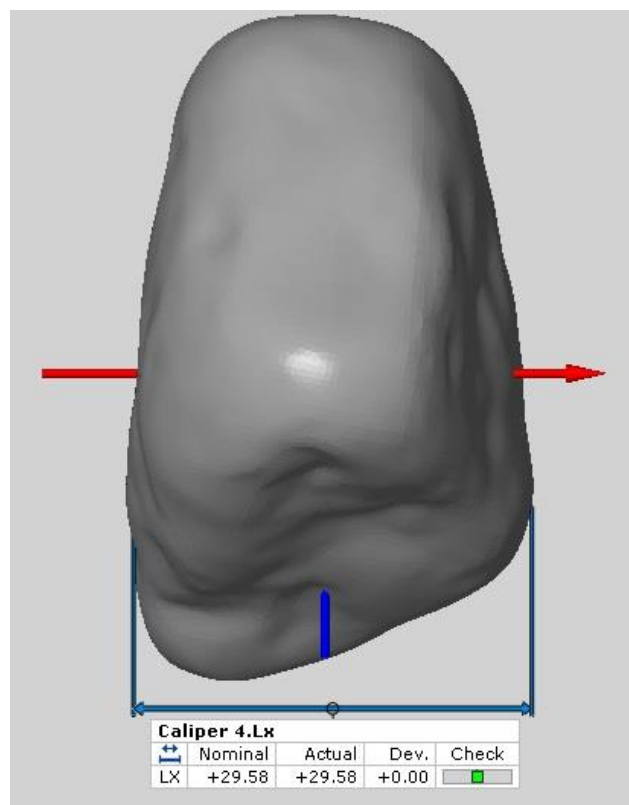


Figura LVI – Pedra f após ensaio – vista 2.

PEDRA G:

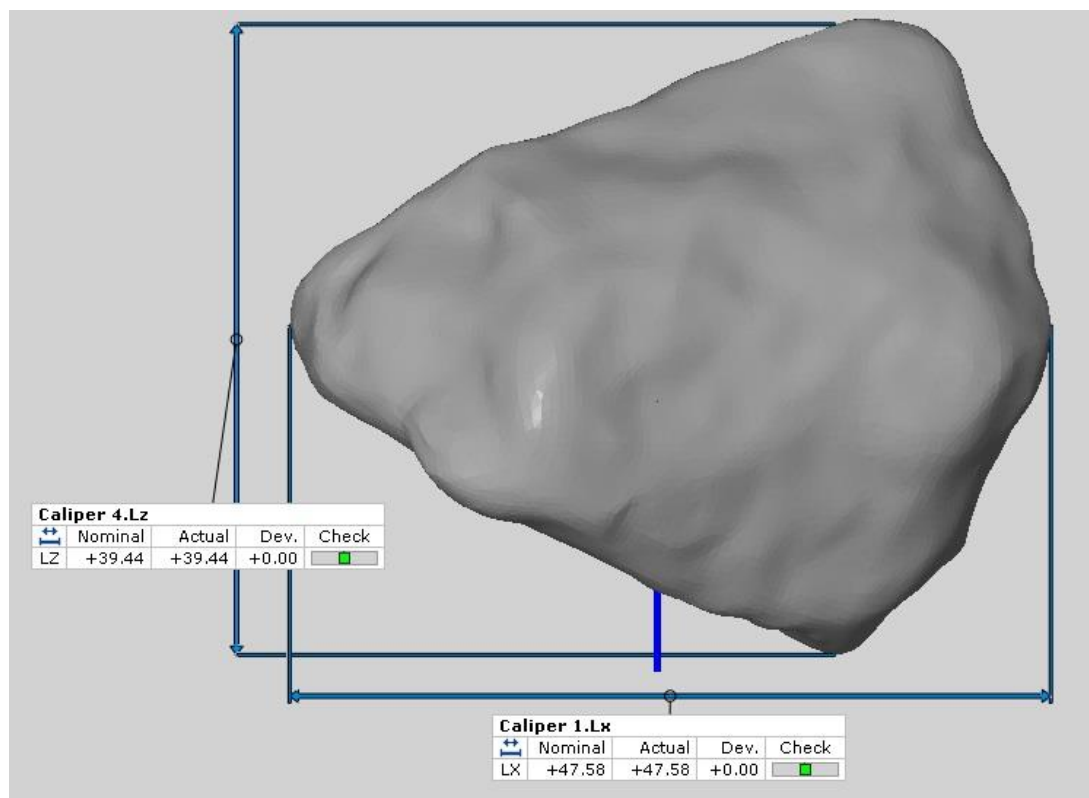


Figura LVII – Pedra g antes do ensaio – vista 1.

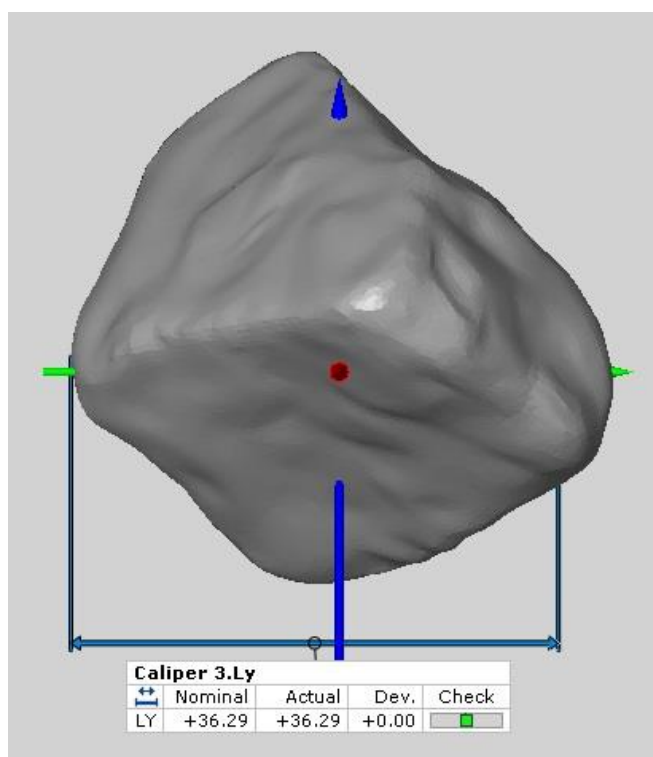


Figura LVIII – Pedra g antes do ensaio – vista 2.

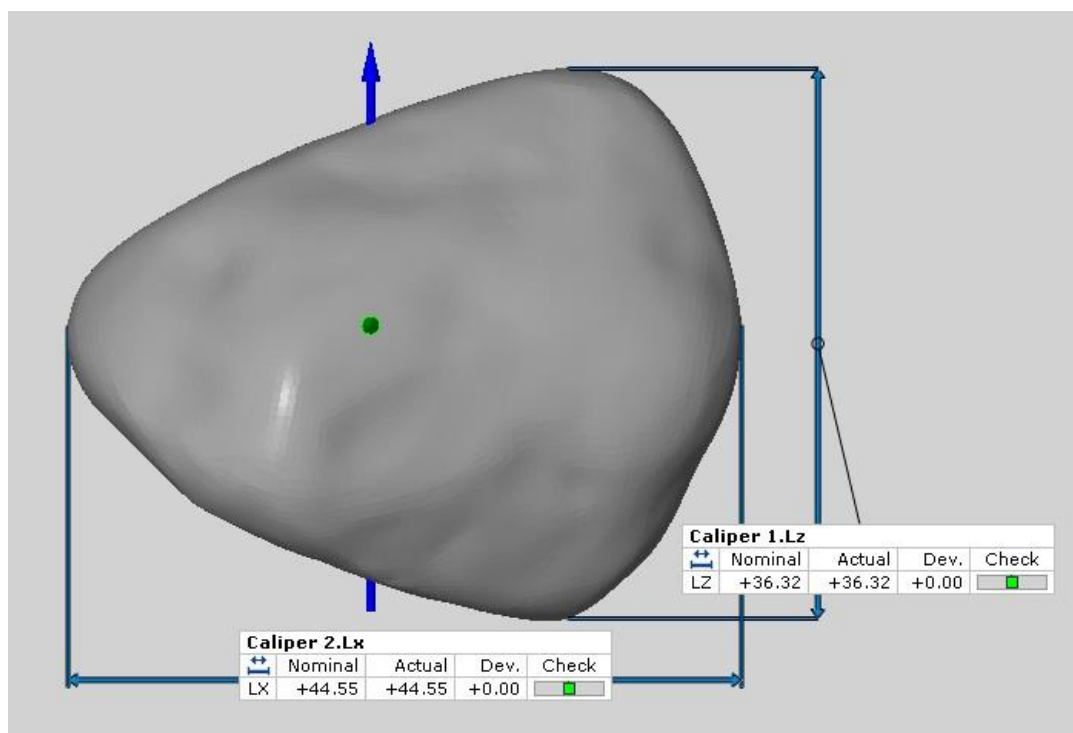


Figura LIX – Pedra g após ensaio – vista 1.

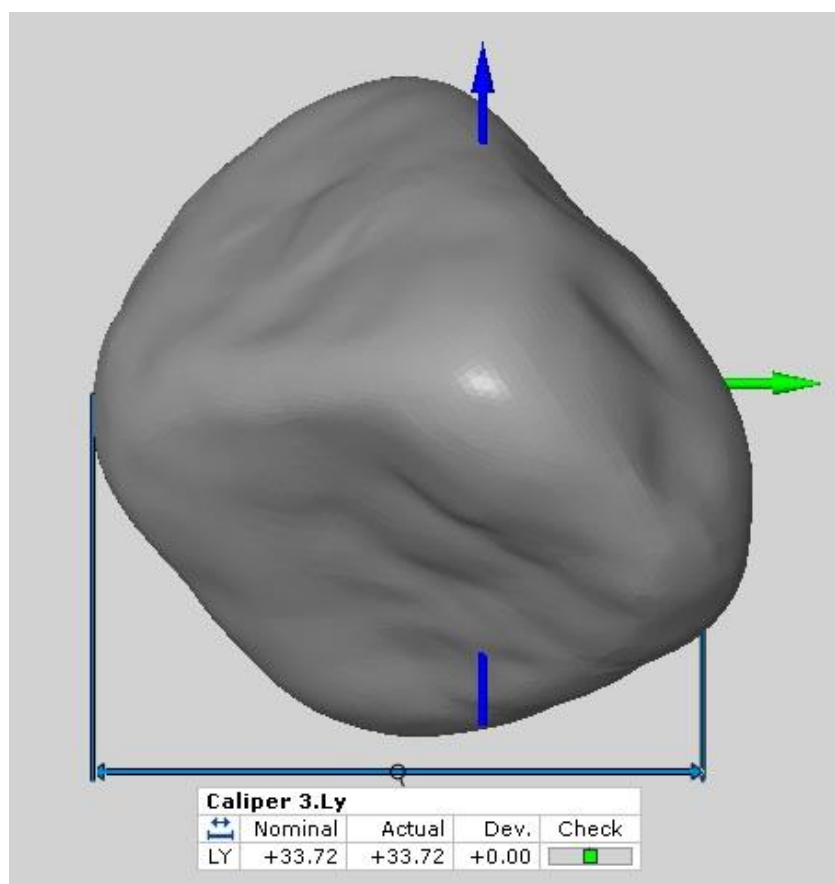


Figura LX – Pedra g após ensaio – vista 2.

PEDRA H:

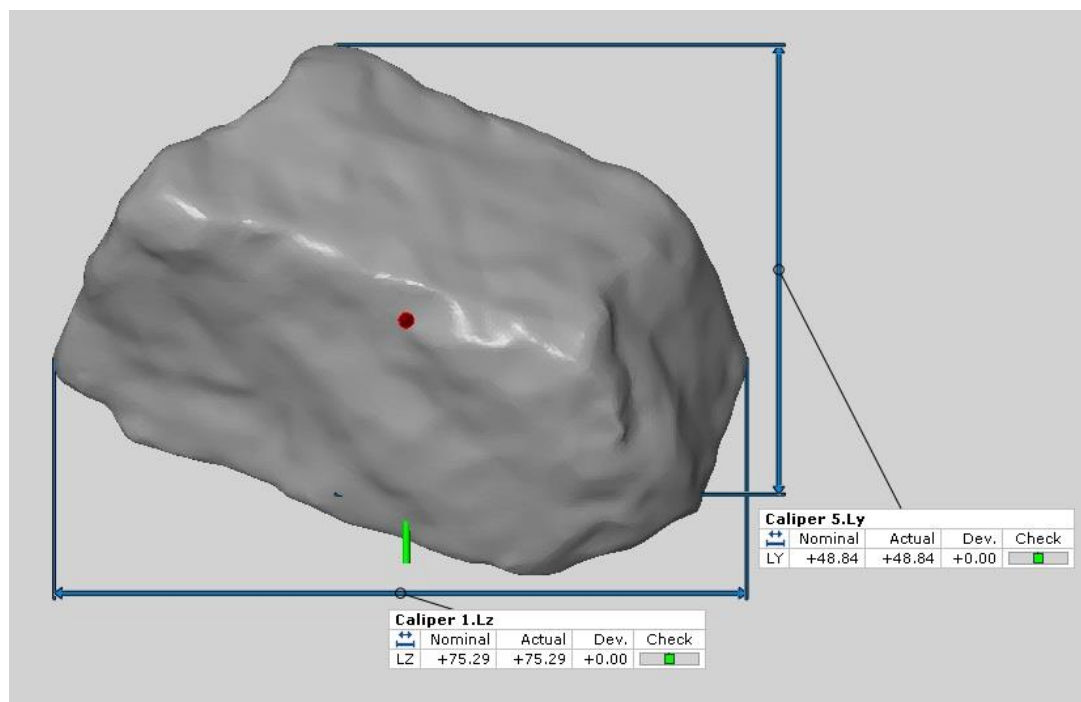


Figura LXI – Pedra h antes do ensaio – vista 1.

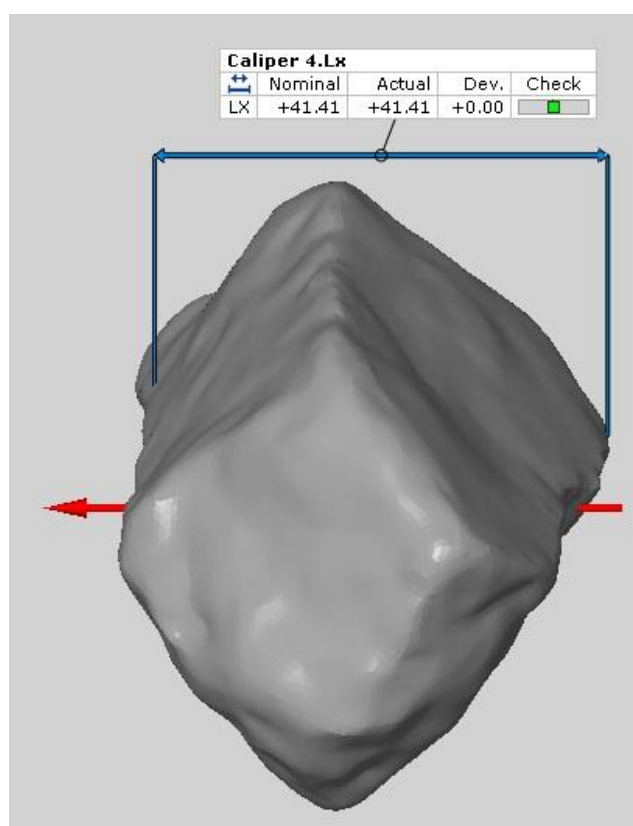


Figura LXII – Pedra h antes do ensaio – vista 2.

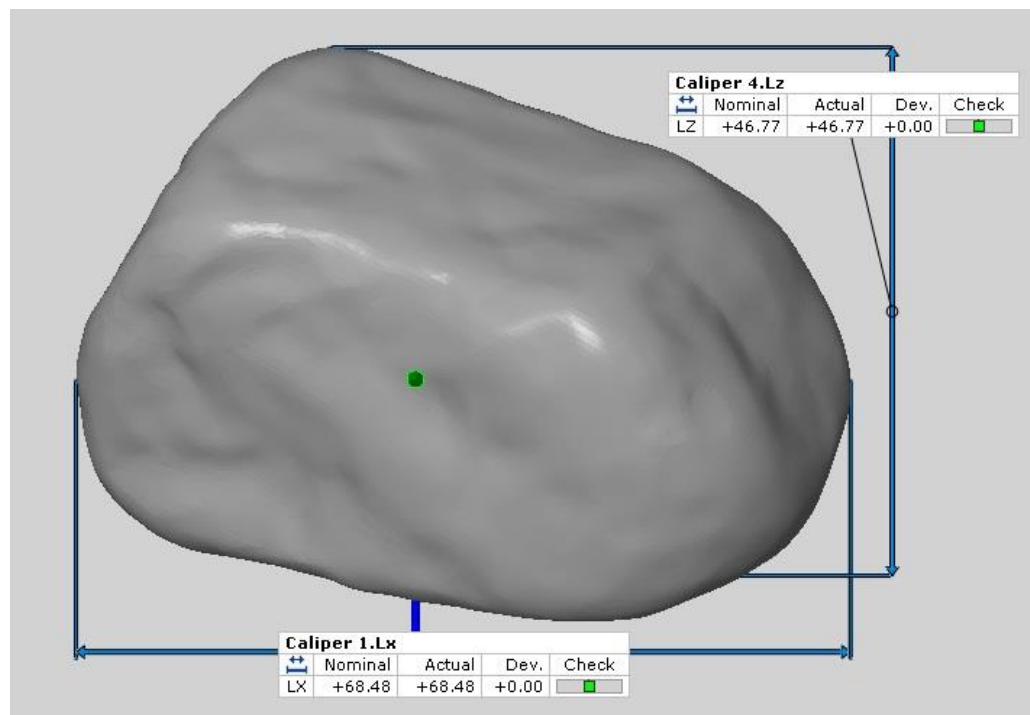


Figura LXIII – Pedra h após ensaio – vista 1.

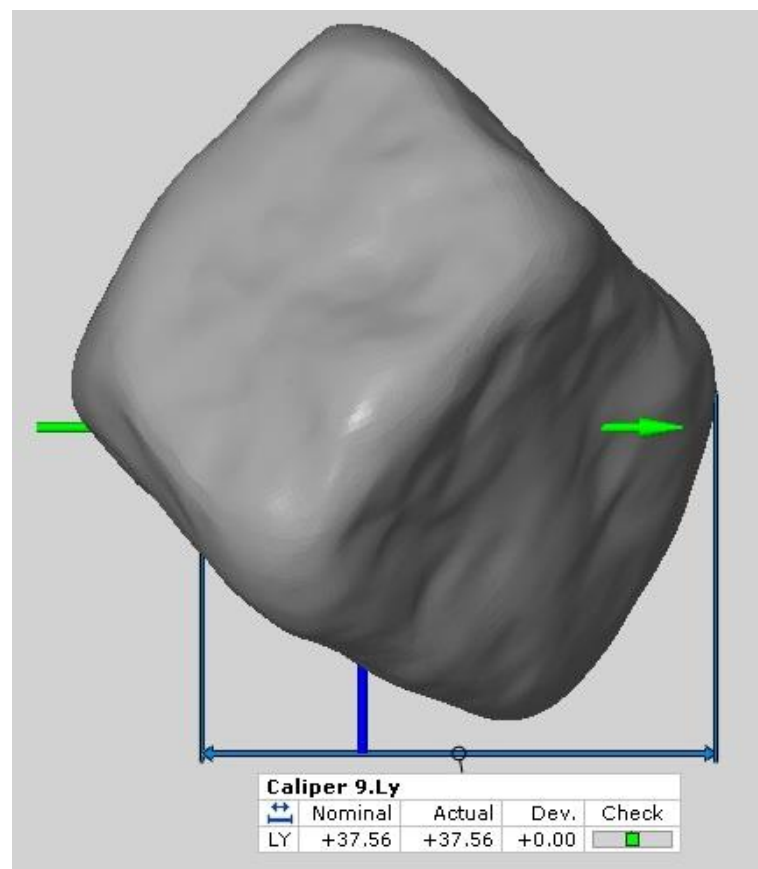


Figura LXIV – Pedra h após ensaio – vista 2.

PEDRA I:

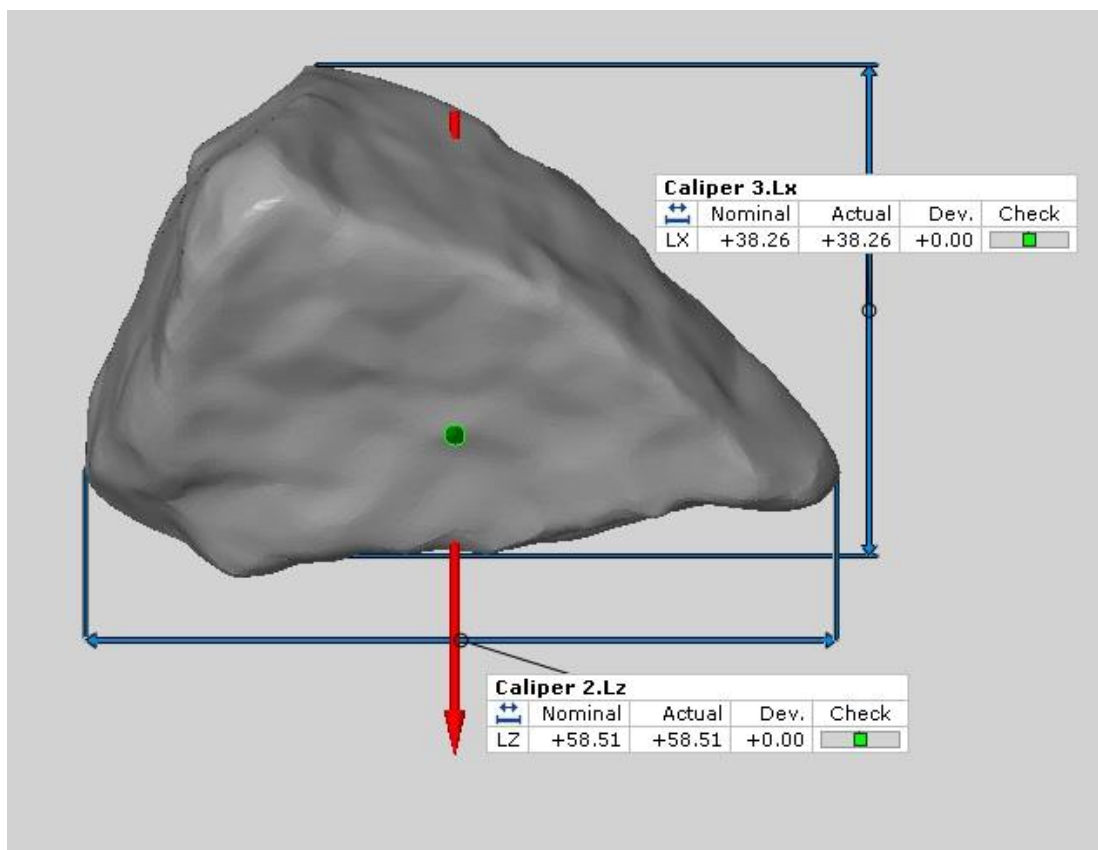


Figura LXV – Pedra i antes do ensaio – vista 1.

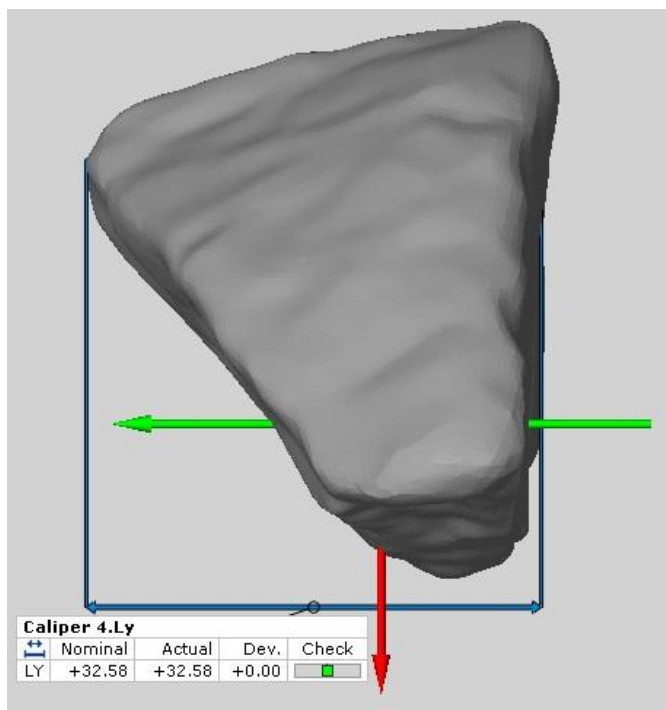


Figura LXVI – Pedra h antes do ensaio – vista 2.

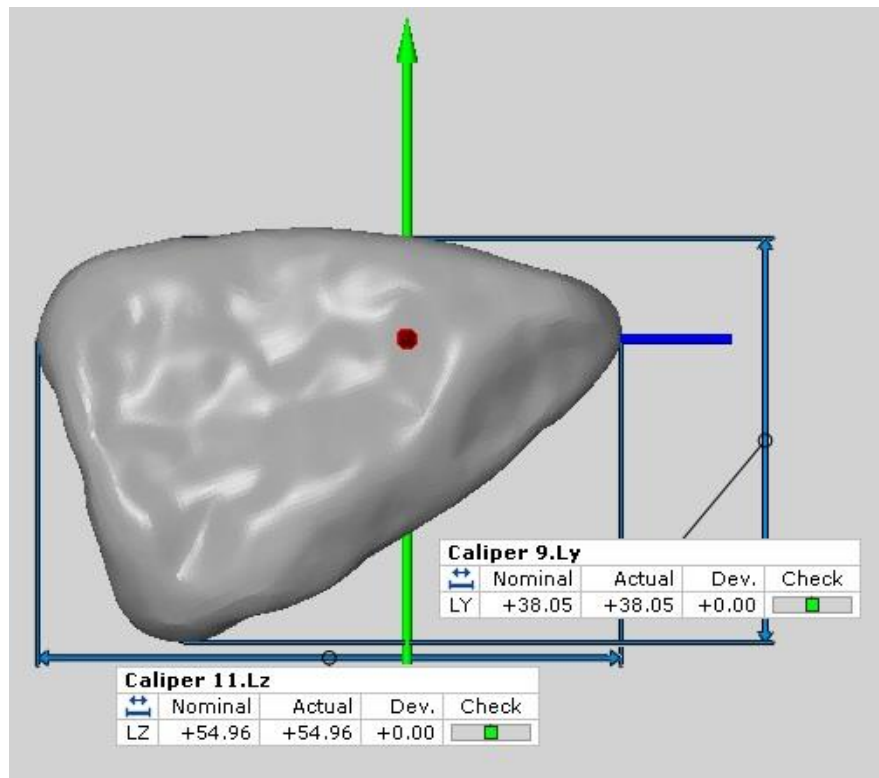


Figura LXVII – Pedra h após ensaio – vista 1.

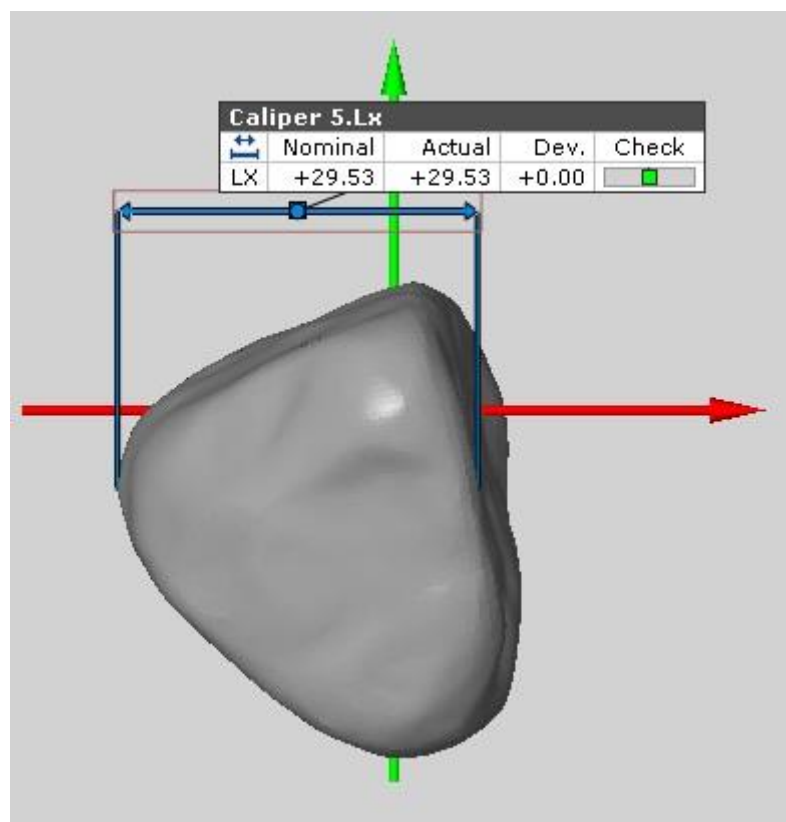


Figura LXVIII – Pedra h após ensaio – vista 2.

PEDRA J:

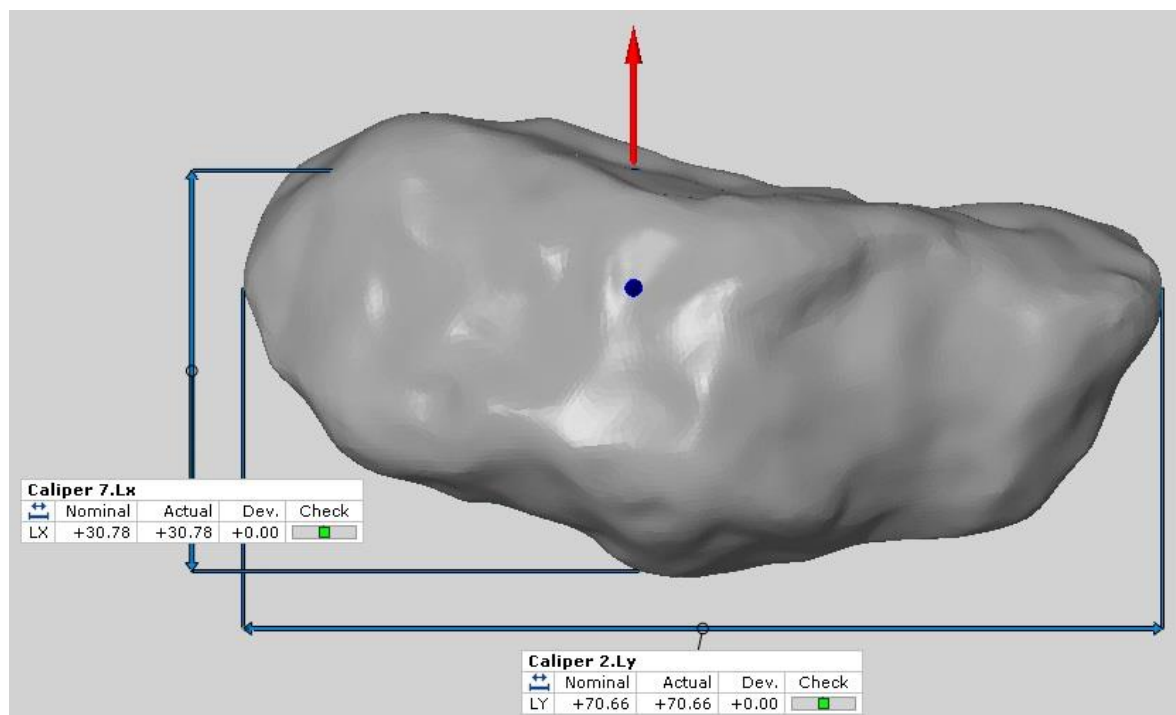


Figura LXIX – Pedra j antes do ensaio – vista 1.

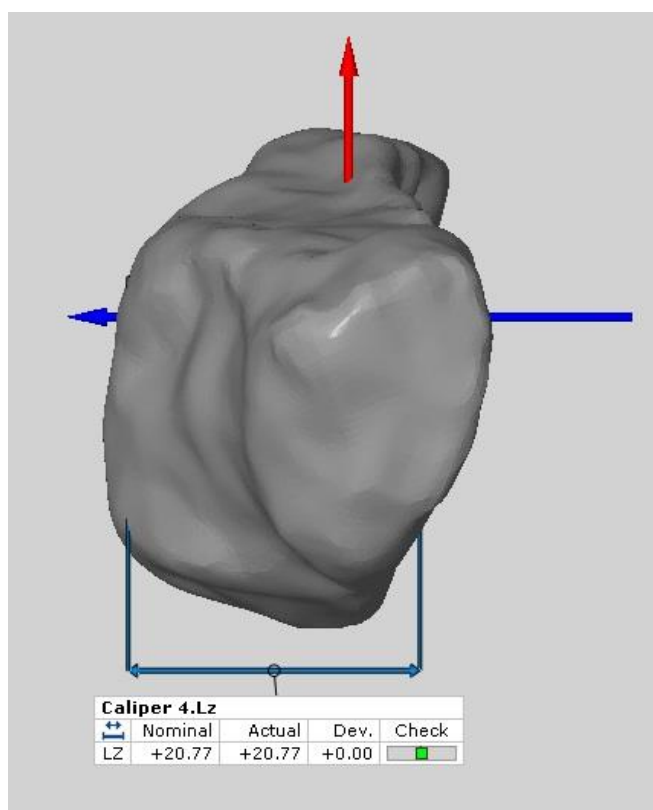


Figura LXX – Pedra j antes do ensaio – vista 2.

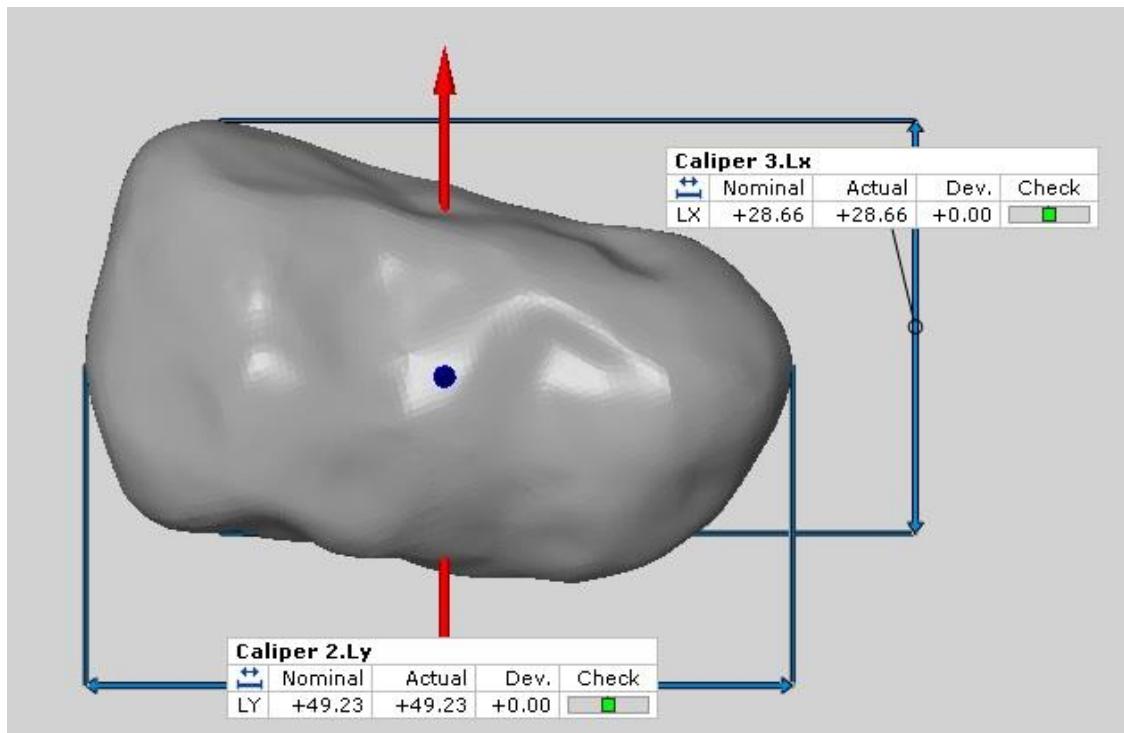


Figura LXXI – Pedra j após ensaio – vista 1.

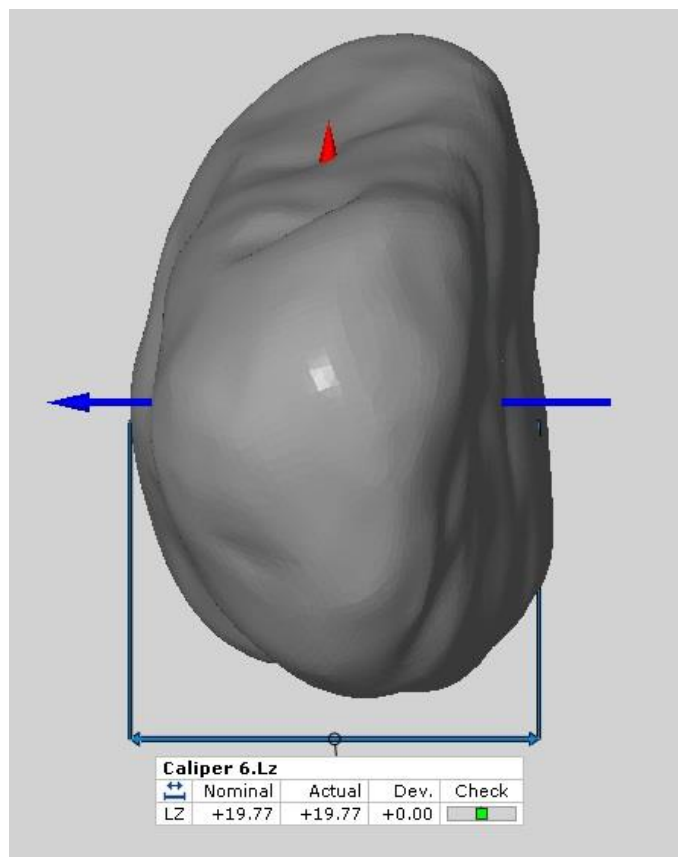


Figura LXXII – Pedra j após ensaio – vista 2.

PEDRA I:

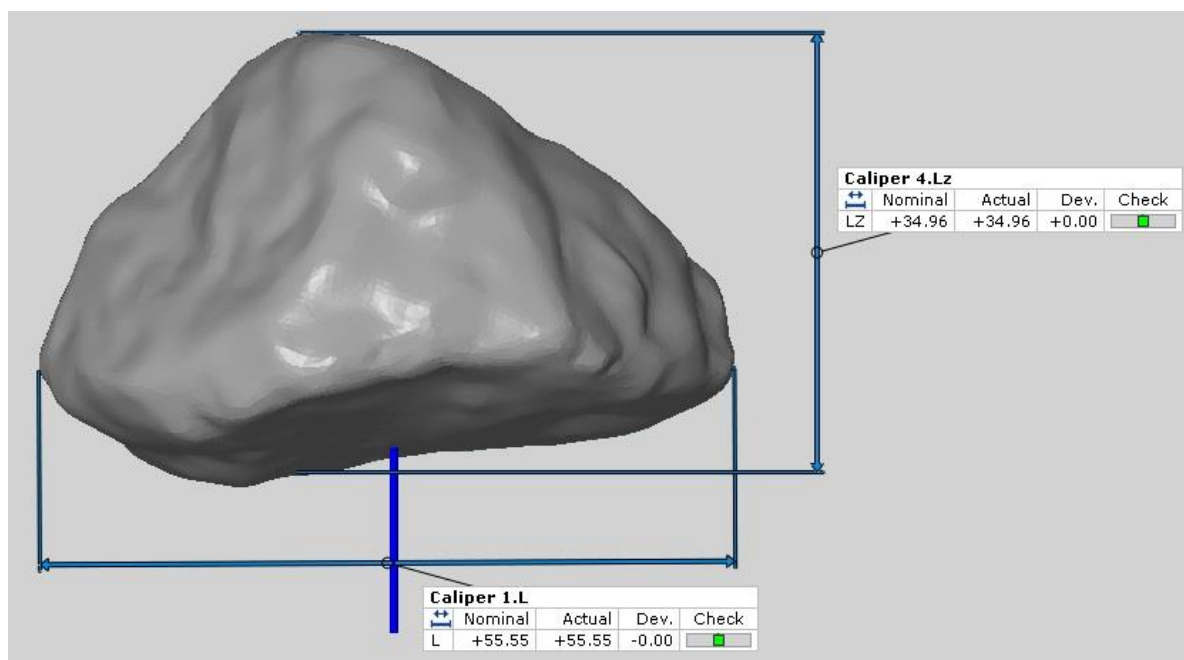


Figura LXXIII – Pedra I antes do ensaio – vista 1.

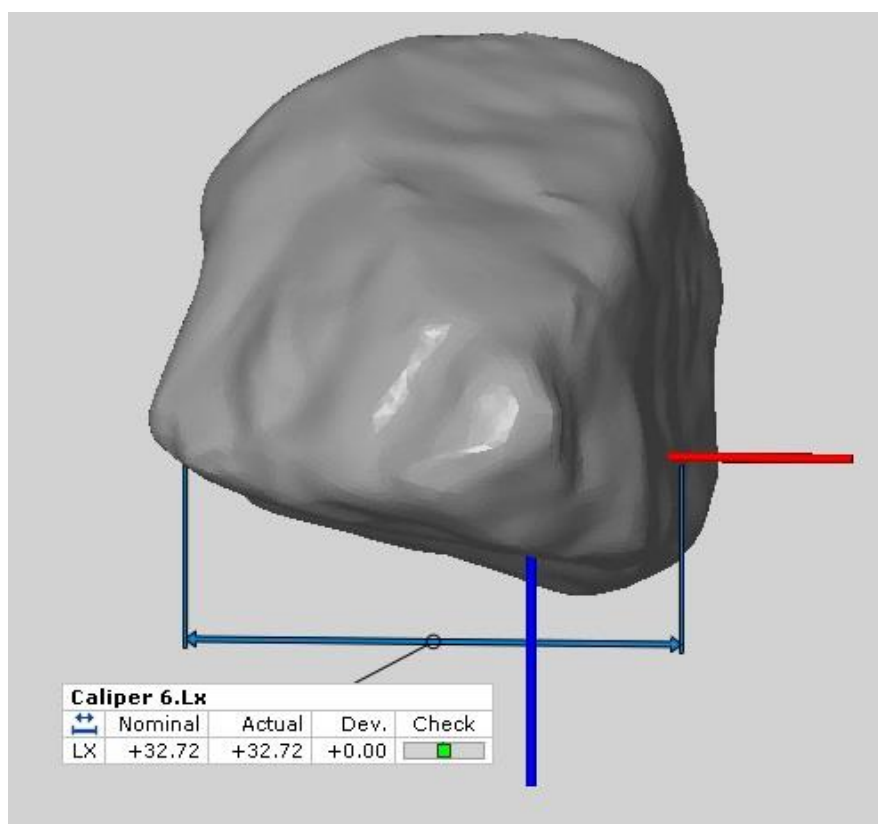


Figura LXXIV – Pedra I antes do ensaio – vista 2.

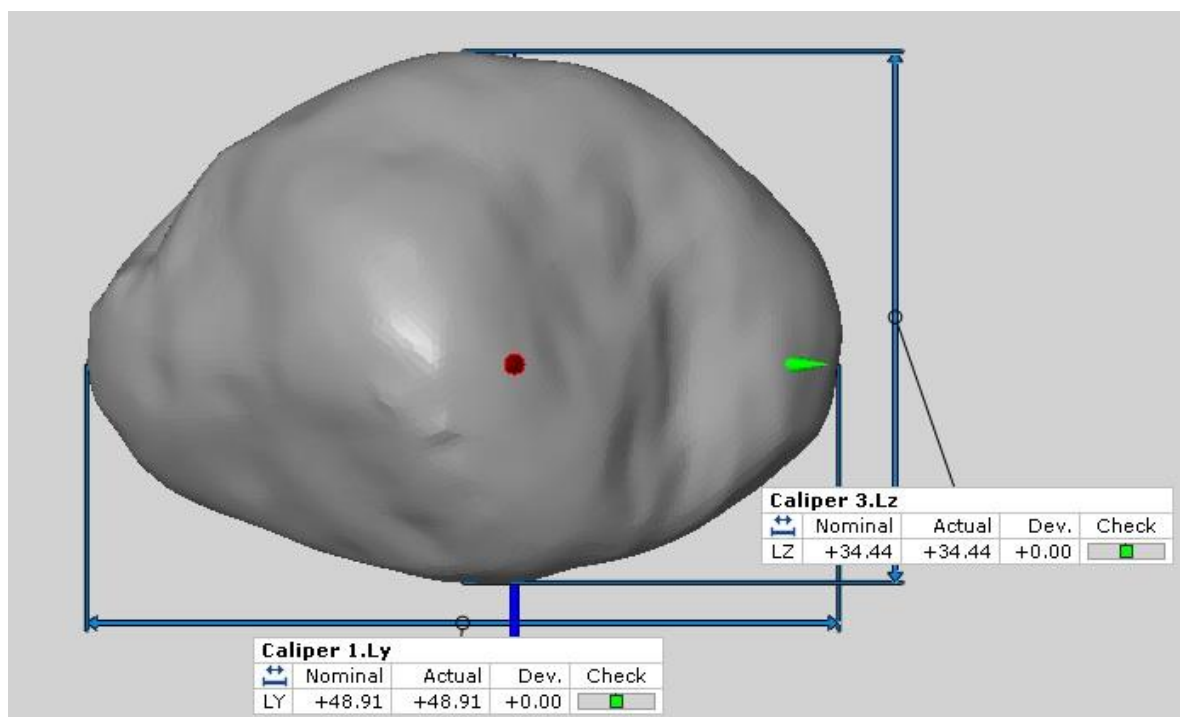


Figura LXXV – Pedra I após ensaio – vista 1.

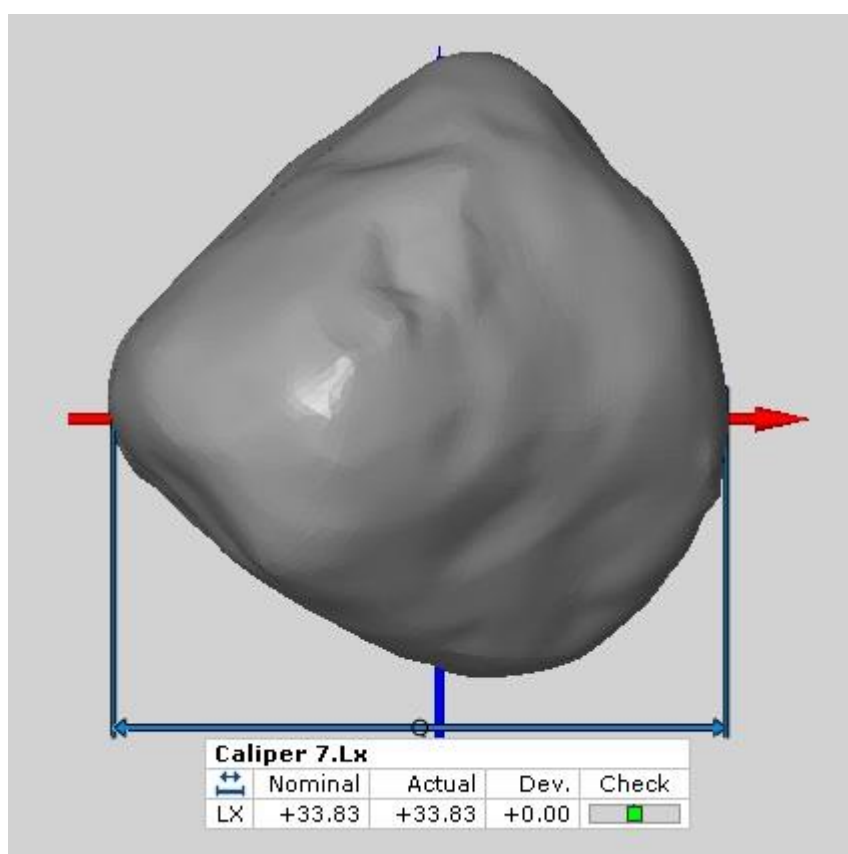


Figura LXXVI – Pedra I após ensaio – vista 2.