U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

LNEC LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA MORFOLOGIA DE AGREGADO SIDERÚRGICO INERTE PARA CONSTRUÇÃO EM CAMADAS DE APOIO DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE

MANUEL MARIA AMADO CÔRTE-REAL DE BRITO E FARO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professora Doutora Sara Rios da Rocha e Silva

Coorientador: Doutor André Luís Marques Paixão

OUTUBRO 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@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

✉ 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 em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

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.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à operação Lisboa2030-FEDER-01317300, ID4CH, Infraestrutura digital para a conservação e divulgação do património, apoiada pelos programas Lisboa2030, FEDER, Portugal 2030 e pela União Europeia, pela disponibilização do scanner de luz estruturada utilizado na presente dissertação.

O autor agradece igualmente ao Núcleo de Conservação do Património Natural e Construído, do Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, pela disponibilidade e apoio prestados durante a utilização do equipamento de digitalização tridimensional. Agradece-se em particular ao Eng.º José Saporiti Machado pela autorização concedida para a utilização do equipamento.

Este trabalho insere-se no âmbito do projeto ECO_RORAIL - Subprodutos industriais para estradas e ferrovias eco-eficientes, com o nº 16540 e com o código de operação no Balcão dos Fundos LISBOA2030-FEDER-00771300, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do COMPETE 2030 e com apoio dos Fundos Nacionais/OE através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

RESUMO

O Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) é uma escória de forno elétrico de arco (EAF) oxidante, gerada sob condições controladas em Portugal. A sua potencial aplicação em camadas não ligadas de infraestruturas de transporte tem motivado estudos do comportamento mecânico, que evidenciaram elevada rigidez, elevada resistência ao corte e boa resistência ao desgaste. Contudo, falta uma caracterização morfológica detalhada, apesar de a forma, a angularidade e a textura superficial influenciarem o contacto intergranular e o comportamento mecânico dos materiais granulares. Este estudo apresenta uma metodologia de caracterização morfológica tridimensional de partículas de ASIC das frações nominais de 8 mm e 12 mm. Modelos digitais obtidos por varrimento de luz estruturada foram processados e representados por harmónicas esféricas. A análise combinou parâmetros convencionais, nomeadamente esfericidade, alongamento e achatamento, com índices tridimensionais relativos à forma (FI3DN), angularidade (AI3DN) e microtextura (MT3DN). Ambas as frações apresentaram esfericidade média de 0.72 e formas predominantemente equidimensionais. Contudo, a fração de 8 mm revelou maior variabilidade no achatamento, na angularidade e na microtextura superficial. Embora os valores médios dos índices tridimensionais fossem semelhantes, as partículas menores apresentaram maior dispersão, indicando irregularidades superficiais mais heterogéneas. Geraram-se partículas virtuais para cada fração a partir de coeficientes normalizados de harmónicas esféricas. Estas preservaram as tendências globais de alongamento e achatamento, mas apresentaram maior esfericidade, menor angularidade e microtextura reduzida, incluindo algumas geometrias lamelares ausentes nas amostras reais. Estes resultados evidenciam a necessidade de refinar os critérios de aceitação antes da aplicação em simulações pelo Método dos Elementos Discretos (DEM). A comparação com ASIC de maior dimensão sugeriu estabilidade da forma global relativa entre diferentes gamas de tamanho. Em suma, o varrimento tridimensional e a análise por harmónicas esféricas permitem captar variações morfológicas no ASIC não inteiramente descritas por parâmetros convencionais.

Palavras-chave: ASIC, escória de aciaria, morfologia de partículas, varrimento tridimensional, harmónicas esféricas.

ABSTRACT

The Inert Steel Aggregate for Construction (ASIC) is an oxidising electric arc furnace (EAF) slag generated under controlled conditions in Portugal. Its potential application in unbound layers of transport infrastructure has motivated studies of its mechanical behaviour, which have demonstrated high stiffness, high shear strength and good resistance to wear. However, a detailed morphological characterisation is still lacking, despite particle shape, angularity and surface texture influencing interparticle contact and the mechanical behaviour of granular materials. This study presents a methodology for the three-dimensional morphological characterisation of ASIC particles from the nominal 8 mm and 12 mm fractions. Digital models obtained by structured light scanning were processed and represented by spherical harmonics. The analysis combined conventional parameters, namely sphericity, elongation and flatness, with three-dimensional indices for shape (FI3DN), angularity (AI3DN) and microtexture (MT3DN). Both fractions showed a mean sphericity of 0.72 and predominantly equidimensional shapes. However, the 8 mm fraction revealed greater variability in flatness, angularity and surface microtexture. Although the mean values of the three-dimensional indices were similar, the smaller particles showed greater dispersion, indicating more heterogeneous surface irregularities. Virtual particles were generated for each fraction from normalised spherical harmonics coefficients. These preserved the global trends of elongation and flatness, but showed higher sphericity, lower angularity and reduced microtexture, including some lamellar geometries absent from the real samples. These results highlight the need to refine the acceptance criteria before application in simulations using the Discrete Element Method (DEM). The comparison with larger ASIC suggested stability of the relative overall shape across different size ranges. In summary, three-dimensional scanning and spherical harmonics analysis allow morphological variations in ASIC to be captured that are not fully described by conventional parameters.

KEYWORDS: ASIC, steel slag, particle morphology, 3D scanning, spherical harmonics.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 ENQUADRAMENTO 1
1.2 OBJETIVOS 3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 3
2 UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS NAS CAMADAS NÃO LIGADAS DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE 5
2.1 ESTRUTURA DE UMA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE 5
2.1.1 Infraestrutura Rodoviária 5
2.1.2 Infraestrutura Ferroviária 10
2.1.3 Síntese das camadas não ligadas relevantes para o presente trabalho 14
2.2 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA AS CAMADAS NÃO LIGADAS 15
2.2.1 Enquadramento e vantagens da utilização de materiais alternativos 15
2.2.2 Principais materiais alternativos aplicáveis 16
2.3 CARACTERIZAÇÃO DO ASIC 17
2.4 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS 22
2.4.1 Importância da morfologia das partículas 22
2.4.2 Técnicas e equipamentos de caracterização morfológica 22
2.5 UTILIZAÇÃO DE PARTÍCULAS DIGITAIS NA MODELAÇÃO NUMÉRICA POR ELEMENTOS DISCRETOS 24

3 METODOLOGIA DE DIGITALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA TRIDIMENSIONAL DO ASIC 27

3.1 INTRODUÇÃO 27

3.2 MATERIAL ANALISADO E SELEÇÃO DAS PARTÍCULAS 27

3.3 PROCEDIMENTO DE DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL 29

3.3.1 Equipamento utilizado 29

3.3.2 Preparação e fixação das partículas 30

3.3.3 Aquisição dos modelos tridimensionais 32

3.4 PÓS-PROCESSAMENTO, LIMPEZA E VALIDAÇÃO DAS MALHAS 34

3.4.1 Limpeza e isolamento das partículas 34

3.4.2 Correção controlada das malhas 35

3.5 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA CONVENCIONAL 36

3.5.1 Extração dos parâmetros geométricos 36

3.5.2 Parâmetros adimensionais de forma 38

3.5.3 Classificação morfológica pelo diagrama de Zingg 39

3.6 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL POR HARMÓNICAS ESFÉRICAS 40

3.6.1 Critérios de validação das reconstruções 42

3.6.2 Índices tridimensionais de forma, angularidade e microtextura 44

3.7 GERAÇÃO DE PARTÍCULAS VIRTUAIS 46

3.7.1 Normalização e organização dos coeficientes harmónicos 46

3.7.2 Geração de vetores de *scores* e reconversão em coeficientes 48

3.7.3 Reconstrução geométrica e controlo de qualidade 49

3.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS 50

3.9 SÍNTESE DO CAPÍTULO 51

4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO ASIC 52

4.1 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA CONVENCIONAL 52

4.1.1 Parâmetros dimensionais e de forma 52
4.1.2 Classificação morfológica pelo diagrama de Zingg 55
4.2 CARACTERIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL POR HARMÓNICAS ESFÉRICAS 58
4.2.1 Índices tridimensionais de forma, angularidade e microtextura 58
4.2.2 Comparação entre frações 60
4.3 GERAÇÃO E AVALIAÇÃO DE PARTÍCULAS VIRTUAIS 61
4.3.1 Partículas virtuais geradas 61
4.3.2 Comparação entre partículas reais e virtuais 62
4.3.3 Distribuição das classes de forma 64
4.3.4 Avaliação da representatividade morfológica 66
4.4 COMPARAÇÃO COM SÉRIES DE REFERÊNCIA E MATERIAIS DE TRANSPORTE 66
4.4.1 Influência da dimensão das partículas na morfologia do ASIC 66
4.4.2 Enquadramento com a literatura 70
4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO 73
5 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO 75
5.1 CONCLUSÕES 75
5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E PERSPETIVAS FUTURAS 76
ANEXOS 82
A.1 PARTÍCULAS ORIGINAIS DE ASIC, FRAÇÃO DE 8 MM 83
A.2 PARTÍCULAS ORIGINAIS DE ASIC, FRAÇÃO DE 12 MM 101
A.3 PARTÍCULAS DE ASIC RECONSTRUÍDAS POR HARMÓNICAS ESFÉRICAS, FRAÇÃO DE 8 MM 119
A.4 PARTÍCULAS DE ASIC RECONSTRUÍDAS POR HARMÓNICAS ESFÉRICAS, FRAÇÃO DE 12 MM 136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Estrutura e propriedades de um pavimento flexível (adaptado de Fortunato, 2025d) 6
Figura 2-2. Esquema estrutural da via balastrada: a) perfil longitudinal; b) perfil transversal (adaptado de Fortunato, 2005) 10
Figura 2-3. Fuso granulométrico do sub-balastro. Adaptado de IP (2023). 13
Figura 2-4. Curva granulométrica da escória de aço (ASIC) face ao fuso de especificação portuguesa para sub-balastro (adaptado de Alves et al., 2024). 20
Figura 3-1. Curva granulométrica do ASIC da fábrica, determinada por peneiração, com indicação das frações 4/8 mm e 8/16 mm utilizadas no estudo. 28
Figura 3-2. Equipamento utilizado para a digitalização tridimensional das partículas de ASIC. 30
Figura 3-3. Preparação das partículas de ASIC para digitalização tridimensional, com fixação individual em agulhas metálicas inseridas numa base de espuma. 31
Figura 3-4. Resultado virtual preliminar da digitalização das partículas de ASIC no *software* do equipamento Artec 3D. 33
Figura 3-5. Comparação entre uma partícula real de ASIC e o respetivo modelo digital tridimensional: a) partícula real preparada para digitalização; b) modelo digital obtido após aquisição e processamento da malha. 33
Figura 3-6. Processamento da malha tridimensional de uma partícula de ASIC: a) modelo inicial antes da limpeza; b) modelo final após remoção dos artefactos de aquisição e isolamento da partícula. 35
Figura 3-7. Exemplo de uma partícula de ASIC com reentrâncias acentuadas, reconstruída por harmónicas esféricas. 41
Figura 3-8. Exemplos de avaliação da reconstrução por harmónicos esféricos: a) malha original de uma partícula com reconstrução considerada válida; b) reconstrução por harmónicos esféricos da mesma partícula; c) malha original de uma partícula com reconstrução rejeitada; d) reconstrução por harmónicos esféricos rejeitada 44
Figura 3-9. Exemplos de partículas virtuais geradas a partir dos coeficientes de harmónicas esféricas: a) partículas da fração de 8 mm; b) partículas da fração de 12 mm. 49
Figura 4-1. Gráficos boxplots de esfericidade, alongamento e achatamento das partículas de ASIC das frações de 8 mm e 12 mm. 54
Figura 4-2. Curvas de distribuição acumulada dos parâmetros de forma das partículas de ASIC de 8 mm e 12 mm. 55
Figura 4-3. Diagrama de Zingg das partículas de ASIC das frações de 8 mm e 12 mm 57
Figura 4-4. Gráficos boxplots dos índices tridimensionais FI3DN, AI3DN e MT3DN das partículas de ASIC das frações de 8 mm e 12 mm. 59
Figura 4-5. Curvas de distribuição acumulada dos índices tridimensionais FI3DN, AI3DN e MT3DN das partículas de ASIC de 8 mm e 12 mm 60

Figura 4-6. Exemplos de partículas virtuais com geometrias menos representativas das partículas reais de ASIC. 62
Figura 4-7. Boxplots comparativos dos parâmetros morfológicos das partículas ASIC de 8 mm, 12 mm e EAF-Ref. 68
Figura 4-8. Diagrama de Zingg comparativo das partículas de ASIC das frações de 8 mm, 12 mm e EAF-Ref. 69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1. Requisitos simplificados para agregados de granulometria extensa reciclados aplicados em sub-bases não ligadas, adaptado de Estradas de Portugal (2014). 8
Tabela 2-2. Estudos sobre a caracterização e aplicação do ASIC e de outras escórias siderúrgicas em infraestruturas de transporte. 18
Tabela 2-3. Propriedades físicas e granulométricas da escória de aço estudada por Alves et al. (2024), para aplicação em sub-balastro ferroviário. 20
Tabela 2-4. Parâmetros mecânicos e morfológicos reportados na literatura para o ASIC. 21
Tabela 2-5. Comparação das gamas de dimensão em equipamentos bidimensionais. 23
Tabela 4-1. Estatística descritiva dos parâmetros morfológicos das partículas ASIC de 8 mm e 12 mm 53
Tabela 4-2. Distribuição das partículas de ASIC de 8 mm e 12 mm por classe morfológica 55
Tabela 4-3. Comparação entre os parâmetros morfológicos das partículas reais e virtuais de ASIC. Valores apresentados como média ± desvio-padrão. 63
Tabela 4-4. Distribuição das partículas reais e virtuais pelas classes de forma de Zingg. 65
Tabela 4-5. Estatística descritiva dos parâmetros morfológicos da série EAF_Ref 67
Tabela 4-6. Comparação quantitativa dos parâmetros morfológicos globais e índices tridimensionais do ASIC com valores da literatura para materiais naturais e subprodutos siderúrgicos. 71

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A - área superficial da partícula

V - volume da partícula

D_{eq} *- diâmetro equivalente (diâmetro da esfera com o mesmo volume da partícula)*

L - comprimento máximo da partícula

I - dimensão intermédia da partícula

S - menor dimensão da partícula

Ψ - esfericidade

p - achatamento (razão S/I)

q - alongamento (razão I/L)

QA - razão entre a área superficial da reconstrução e a da malha original

QV - razão entre o volume da reconstrução e o da malha original

a_{lm}*- coeficiente harmónico esférico de ordem l e grau m*

a_{00}*- coeficiente harmónico esférico de ordem zero*

N - ordem harmónica máxima considerada

FI_{3DN}*- índice tridimensional de forma*

AI_{3DN} *- índice tridimensional de angularidade*

MT_{3DN} *- índice tridimensional de microtextura*

C_U *- coeficiente de uniformidade*

C_C *- coeficiente de curvatura*

C_V *- coeficiente de variação*

AIMS - Aggregate Image Measurement System (sistema de medida de imagem de agregados)

ASIC - Agregado Siderúrgico Inerte para Construção

BOF - Basic Oxygen Furnace (forno básico a oxigénio)

CBR - California Bearing Ratio

DEM - Discrete Element Method (Método dos Elementos Discretos)

EAF - Electric Arc Furnace (forno elétrico de arco)

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IP - Infraestruturas de Portugal

IPQ - Instituto Português da Qualidade

LS - Ladle Slag (escória branca)

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PCA - Principal Component Analysis (Análise de Componentes Principais)

PLY - Polygon File Format (formato de ficheiro de malhas poligonais)

1
INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A durabilidade e a segurança das infraestruturas de transporte dependem diretamente do desempenho das suas camadas de apoio. Embora fiquem ocultas após a construção, estas camadas desempenham a função estrutural crítica de distribuir tensões, absorver cargas repetidas, assegurar a drenagem e limitar as deformações permanentes sob a ação do tráfego.

Garantir estas exigências tem implicado, historicamente, o consumo de volumes muito significativos de agregados naturais, o que se traduz na exploração de recursos finitos e em impactos ambientais consideráveis nas zonas de extração. Num cenário de transição para a economia circular, a engenharia civil enfrenta o desafio de reduzir esta dependência. A solução passa, cada vez mais, por encontrar e validar subprodutos industriais que possam substituir os materiais tradicionais sem comprometer a estabilidade e o tempo de vida útil das vias.

É neste contexto que se destaca o Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC). Este material é obtido a partir do processamento e estabilização de escórias de forno elétrico de arco (EAF) e, quando sujeito a um controlo rigoroso, adquire propriedades físicas consistentes. Em Portugal, a certificação do ASIC viabiliza a sua utilização em obras de construção (Mica et al., 2023b). Para além do seu contributo ecológico, ao transformar um resíduo da indústria siderúrgica num recurso valorizado, estudos recentes indicam que o ASIC apresenta elevada densidade, rigidez e resistência ao desgaste (Alves et al., 2023). Em aplicações como o sub-balastro ferroviário, o material demonstrou inclusive um desempenho mecânico muito favorável ao nível do ângulo de atrito interno e da resiliência sob carga (Delgado et al., 2019a).

Contudo, classificar um agregado como apto para construção exige compreender o que acontece à escala do grão. O comportamento mecânico de uma camada granular, especialmente o modo como as partículas se intertravam e resistem ao corte, é governado pela geometria, pela angularidade e pela rugosidade superficial dos materiais (Delgado et al., 2019b). No caso do ASIC, que é caracterizado por arestas vivas e uma textura fortemente rugosa, a caracterização morfológica assume uma importância redobrada.

Os parâmetros clássicos, como a esfericidade, o alongamento e o achatamento, fornecem uma indicação da forma global da partícula, mas ignoram as irregularidades de superfície que definem o atrito interfacial. Para contornar esta limitação, a digitalização tridimensional por varrimento ótico apresenta-se como uma ferramenta poderosa. Ao captar o relevo preciso de cada partícula, permite transpor a análise para um ambiente numérico, quantificando simultaneamente a forma macroscópica, a angularidade das arestas e a microtextura superficial através da representação matemática por harmónicas esféricas. Inserida no âmbito do projeto ECO_RORAIL, focado no estudo de subprodutos para estradas e ferrovias ecoeficientes, a presente dissertação debruça-se sobre a caracterização tridimensional avançada do ASIC. Recorrendo a partículas das frações de 8 mm e 12 mm, o estudo procura não só compreender a geometria real desta escória, mas também desenvolver uma metodologia de geração de partículas virtuais. Este passo constitui a base para a futura integração da geometria do ASIC em modelos computacionais baseados no Método dos Elementos Discretos (DEM) que permite avaliar, por exemplo, a influência de uma camada de sub-balastro do material numa via-férrea sujeita a tráfego ferroviário.

1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo principal caracterizar a morfologia tridimensional de partículas de ASIC provenientes das frações granulométricas nominais de 8 mm e 12 mm. Para o cumprimento deste propósito geral, o trabalho consiste em digitalizar as partículas das duas frações recorrendo a um equipamento *laser scan* de luz estruturada para captar a sua geometria tridimensional. A partir desta aquisição, pretende-se estruturar um fluxo de trabalho robusto que inclua o pós-processamento, a limpeza dos artefactos de varrimento e a validação das malhas obtidas. Numa fase subsequente, o estudo visa quantificar a morfologia global através de métricas convencionais, determinando as dimensões principais, a esfericidade, o alongamento e o achatamento.

Adicionalmente, procura-se aplicar a reconstrução matemática por harmónicas esféricas para isolar e medir rigorosamente índices independentes de forma global, angularidade e microtextura. Com base nestes dados numéricos, pretende-se comparar a variabilidade geométrica das frações analisadas e enquadrar os resultados com materiais naturais correntemente aplicados na construção, nomeadamente o granito. Por fim, estabelece-se como objetivo gerar uma amostra de partículas virtuais de ASIC através dos coeficientes harmónicos, validando a sua coerência estatística face às partículas reais e abrindo caminho para a sua integração futura em rotinas de simulação computacional.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1 formula o tema, destaca a importância da transição para os materiais reciclados nas vias de transporte e estabelece os objetivos e o rumo delineado para a investigação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão do estado da arte, explorando a função estrutural das camadas não ligadas, as características do ASIC como material alternativo e o peso da morfologia granular no comportamento mecânico da via. Aborda, ainda, a digitalização tridimensional e o impacto que os modelos precisos de partículas têm na simulação micromecânica.

O Capítulo 3 descreve a metodologia experimental e o processamento de dados adotados. Detalha a seleção da amostra, as etapas de digitalização, a correção e limpeza dos ficheiros tridimensionais, o cálculo das dimensões características e a aplicação matemática das harmónicas esféricas para avaliação morfológica avançada.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos. Foca-se nas diferenças registadas entre a fração de 8 mm e a de 12 mm e avalia o rigor estatístico das partículas virtuais produzidas. Inclui também o enquadramento destes dados com outras frações de escória maiores e com agregados naturais frequentemente estudados na literatura.

O Capítulo 5, por fim, agrupa as conclusões globais do estudo, assinala as limitações inerentes à amostra e sugere linhas de continuidade para a investigação deste subproduto, tanto a nível laboratorial como numérico.

2
UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS NAS CAMADAS NÃO LIGADAS DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE

2.1 Estrutura de uma Infraestrutura de Transporte

Toda a infraestrutura de transporte, seja ela rodoviária ou ferroviária, é composta por sucessivas camadas, cada uma com função distinta, porém complementar. Nas camadas superiores concentram-se as exigências de segurança, regularidade e contacto com o tráfego e, nas inferiores, a função principal é distribuir as tensões, limitar as deformações e garantir um apoio estável ao longo da vida útil da infraestrutura. No presente capítulo, apresenta-se brevemente a função de cada camada destes dois tipos de infraestruturas de transporte.

2.1.1 Infraestrutura Rodoviária

A infraestrutura rodoviária é constituída por um sistema de camadas sobrepostas, dimensionadas para receber as ações do tráfego, distribuí-las em profundidade e garantir uma capacidade de suporte adequada ao longo da vida útil. Estas infraestruturas podem ter dois tipos de pavimentos distintos: flexíveis ou rígidos.

Os pavimentos flexíveis são usados mais regularmente. Têm um custo inicial inferior e são uma solução corrente para a maioria das vias, enquanto os pavimentos rígidos têm a vantagem de ter uma maior vida útil e menor manutenção.

Os pavimentos flexíveis são compostos, de cima para baixo, pela camada superficial, de ligação e de base, a sub-base, a camada de leito e a fundação (Fortunato, 2025d). A Figura 2-1 apresenta a estrutura típica de um pavimento flexível, evidenciando a organização das diferentes camadas que o constituem, desde as camadas betuminosas superiores até à camada de leito e fundação.

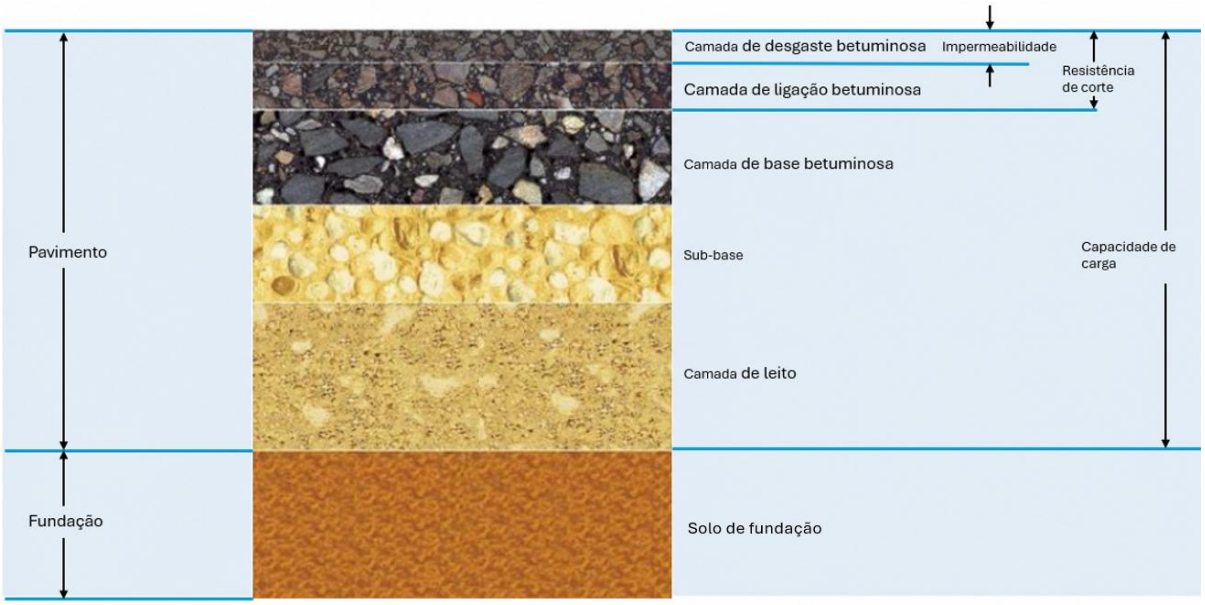


Figura 2-1. Estrutura e propriedades de um pavimento flexível (adaptado de Fortunato, 2025d)

A camada que está em contacto com os veículos é a camada superficial, pelo que deve ter boas condições de circulação e de segurança. Para além de contribuir para a regularidade da superfície e para a aderência pneu-pavimento, esta camada deve, sobretudo, limitar a entrada de água na estrutura, para evitar a sua degradação e preservar a sua capacidade resistente.

A camada de ligação situa-se abaixo da camada superficial e assegura a transição entre esta e a camada de base. Nos pavimentos flexíveis, as camadas superficiais e de ligação são normalmente constituídas por misturas betuminosas, contribuindo para a continuidade estrutural do pavimento e para a transmissão das solicitações às camadas inferiores (Fortunato, 2025b).

A camada de base desempenha uma função estrutural importante, uma vez que recebe uma parte significativa das tensões transmitidas pelas camadas superiores e redistribui para as camadas inferiores, sendo esta constituída, geralmente, por misturas betuminosas ou materiais granulares.

A sub-base localiza-se sob a camada de base e constitui a transição entre as camadas estruturais do pavimento e a fundação. A sua função é distribuir as tensões transmitidas pelas camadas superiores, regularizar as condições de apoio e, quando necessário, contribuir para a drenagem da estrutura. Pode ser executada com solos selecionados, agregados naturais ou agregados reciclados. Neste contexto, os agregados de granulometria extensa reciclados, designados por AGER, são classificados nas categorias AGER1, AGER2 e AGER3 de acordo com a composição dos seus constituintes grossos. Para a sua utilização em sub-bases não ligadas, o Caderno de Encargos Tipo Obra das Infraestruturas de Portugal (Estradas de Portugal, 2014) estabelece exigências relativas à granulometria, ao teor e qualidade dos finos, à forma das partículas e à resistência mecânica. A Tabela 2-1 apresenta uma síntese simplificada desses requisitos, verificando-se que as categorias AGER2 e AGER3 apresentam exigências mais restritivas quanto à resistência e à proporção de partículas esmagadas ou partidas (Estradas de Portugal, 2014)

Tabela 2-1. Requisitos simplificados para agregados de granulometria extensa reciclados aplicados em sub-bases não ligadas, adaptado de Estradas de Portugal (2014).

Critério	Norma	AGER1	AGER2	AGER3
Dimensão nominal		0/31,5 mm	0/31,5 mm	0/31,5 mm
Teor de finos	Percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm	2% a 9%	2% a 9%	2% a 9%
Valor de azul de metileno, máximo	NP-EN 933-9 (IPQ, 2010)	1,0 g/kg	0,8 g/kg	1,0 g/kg
Partículas esmagadas ou partidas, mínimo	NP-EN 933-5 (IPQ, 2010)	50%	50%	90%
Partículas totalmente roladas, máximo	NP-EN 933-5 (IPQ, 2010)	30%	10%	3%
Índice Los Angeles, máximo	EN 1097-2 (CEN,2020)	45	40	40
Índice micro-Deval, máximo	EN 1097-1 (CEN, 2023)	45	35	35

A zona de transição entre as camadas superiores e a fundação chama-se camada de leito. A sua função principal é melhorar e regularizar as condições de apoio, permitindo que a estrutura do pavimento assente sobre uma plataforma com comportamento mais uniforme e compatível com as exigências de projeto (Fortunato, 2025c). Durante a fase de construção, esta camada contribui para a criação de uma superfície de trabalho estável, permitindo a circulação dos equipamentos, a execução das camadas superiores e a proteção da fundação. Em serviço, contribui para uniformizar a capacidade de suporte, reduzir a sensibilidade da estrutura às variações do terreno de fundação e melhorar as condições de drenagem.

Por fim, o solo do qual o pavimento está assente chama-se fundação. O seu comportamento influencia diretamente o desempenho global da infraestrutura, já que a rigidez, a resistência e o teor de água da fundação condicionam a capacidade de suporte das camadas superiores. Por esse motivo, a drenagem é essencial para manter valores consistentes de rigidez e resistência ao longo do tempo.

Nos pavimentos flexíveis, a distribuição das cargas depende do comportamento conjunto das várias camadas, verificando-se uma redução progressiva da intensidade das tensões com a profundidade. Pelo contrário, nos pavimentos rígidos, a maior parte da carga é suportada pela laje de betão, que distribui as tensões por uma área mais ampla da fundação devido à sua elevada rigidez. Assim, enquanto os pavimentos flexíveis dependem fortemente das propriedades de todas as camadas, os pavimentos rígidos dependem sobretudo do comportamento da laje de betão, podendo ser executados diretamente sobre a fundação preparada ou sobre uma camada granular ou estabilizada.

2.1.2 Infraestrutura Ferroviária

A estrutura de uma via-férrea balastrada é composta por um conjunto de elementos e camadas sobrepostas, que asseguram a transmissão das cargas ferroviárias desde os carris até à fundação. De forma geral, esta estrutura inclui os carris, os sistemas de fixação, as travessas, o balastro, o sub-balastro, a camada de leito, o aterro e a fundação (Afonso, 2021). A Figura 2-2 apresenta, de forma esquemática, a organização estrutural de uma via-férrea balastrada, permitindo identificar os principais elementos da via e a disposição das camadas de apoio.

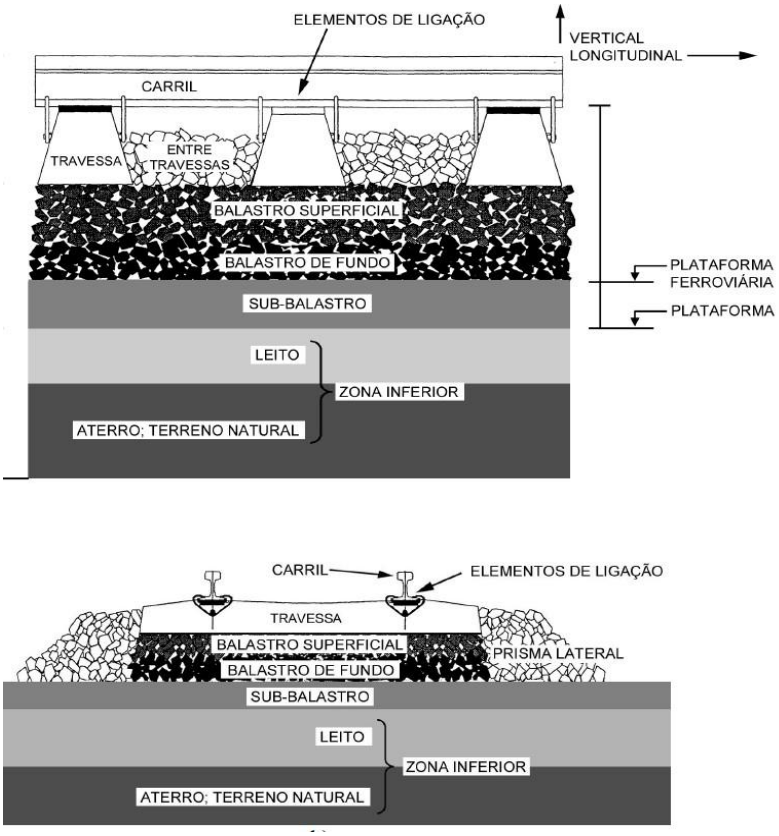


Figura 2-2. Esquema estrutural da via balastrada: a) perfil longitudinal; b) perfil transversal (adaptado de Fortunato, 2005)

Os elementos superiores da via, como os carris, as fixações e as travessas, recebem diretamente as ações do material circulante e transmitem-nas ao balastro. Por sua vez, as camadas granulares e de apoio, como o balastro, o sub-balastro e o leito de pavimento, contribuem para a distribuição das tensões, a drenagem e a estabilidade global da infraestrutura.

Entre as soluções ferroviárias tradicionais, a via balastrada continua a ser amplamente utilizada, graças à sua simplicidade construtiva, à capacidade de drenagem e à possibilidade de manter a geometria da via. Neste tipo de solução, o balastro envolve parcialmente as travessas e funciona como uma camada granular de apoio e de redistribuição de cargas. Esta camada desempenha um papel dominante no comportamento da via, dado que, em semelhança com a camada superficial dos pavimentos rodoviários, recebe diretamente as cargas e redistribui em profundidade contribuindo para a estabilidade horizontal da via.

Para além de garantir o apoio das travessas, o balastro contribui para a estabilidade longitudinal e transversal da via, para a dissipação de energia e para a drenagem. A sua natureza granular permite ainda redistribuir as cargas transmitidas pelas travessas e possibilita intervenções de manutenção destinadas à correção da geometria da via (Fortunato, 2025a).

A camada de balastro não é solicitada uniformemente ao longo da sua espessura e da sua extensão. Por esse motivo, pode ser analisada considerando diferentes zonas, como o material localizado entre travessas, o prisma lateral e as zonas superior e inferior da camada. Esta distinção é útil porque a circulação ferroviária e as operações de manutenção podem provocar assentamentos diferenciais na via e alterações distintas na compactação, granulometria e capacidade drenante do balastro ao longo do tempo (Fortunato, 2005).

O sub-balastro, tal como nos pavimentos rodoviários, atua como camada de apoio e de transição entre as camadas superiores e a fundação. Esta camada pode ser constituída por materiais granulares, betuminosos ou tratados com cimento ou cal, dependendo das exigências de projeto e das condições da plataforma. As suas principais funções são melhorar a capacidade de suporte, favorecer uma distribuição mais eficiente das cargas transmitidas pelo balastro, contribuir para o desempenho dinâmico da via, atuar como filtro entre a fundação e o balastro e assegurar o escoamento das águas superficiais.

Em Portugal, a aplicação de materiais na camada de sub-balastro deve cumprir requisitos técnicos específicos, nomeadamente quanto à origem e à natureza do agregado, à granulometria, à qualidade dos finos e à resistência mecânica. O documento técnico relativo às características do sub-balastro (IP, 2023), admite a incorporação total ou parcial de agregados reciclados e/ou artificiais nesta camada, enquadrando esta possibilidade numa lógica de reutilização de resíduos e economia circular (IP, 2023). No que respeita à granulometria, o material deve ajustar-se ao fuso especificado para o sub-balastro, apresentado na Figura 2-3, sendo ainda definidos limites para os coeficientes de uniformidade e de curvatura da curva granulométrica.

Os coeficientes de uniformidade, C_U, e de curvatura, C_C, são definidos a partir dos diâmetros correspondentes a 10%, 30% e 60% de passagem na curva granulométrica, designados respetivamente por D_{10}, D_{30} e D_{60} (IP, 2023) através dos seguintes quocientes:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{1}$$

$$C_U = \frac{D_{30}^2}{(D_{10} \times D_{60})} \tag{2}$$

O coeficiente de uniformidade mede a amplitude da distribuição granulométrica do material. Valores próximos da unidade correspondem a materiais uniformes, constituídos por partículas de dimensão semelhante, enquanto valores elevados indicam granulometrias extensas, com partículas de dimensões muito variadas. Nas camadas granulares, esta variedade de dimensões permite um melhor preenchimento dos vazios entre partículas, contribuindo para a compacidade do material. O coeficiente de curvatura descreve a forma da curva granulométrica e permite detetar descontinuidades na distribuição das dimensões. Valores compreendidos entre 1 e 3 correspondem a uma curva suave e contínua, característica de uma granulometria bem graduada, enquanto valores fora deste intervalo indicam a ausência ou o excesso de determinadas dimensões intermédias.

A Figura 2-3 apresenta o fuso granulométrico do sub-balastro (IP, 2023). O documento técnico define, para o material a incorporar nesta camada, um coeficiente de uniformidade $C_U \geq 6$ e $1 \leq C_C \leq 3$. O limite imposto ao C_U é particularmente exigente e revela a intenção de promover granulometrias extensas, em que a variedade de dimensões das partículas contribui para a compacidade e para a estabilidade da camada, enquanto o intervalo admitido para o C_C assegura a continuidade da distribuição granulométrica.

Fuso granulométrico do sub-balastro	
Abertura dos peneiros (mm)	**% de material que passa (em massa)**
40	100
31,5	90-100
20	70-90
16	62-85
8	46-66
4	32-52
2	24-40
0,5	11-24
0,25	8-19
0,063	4-8

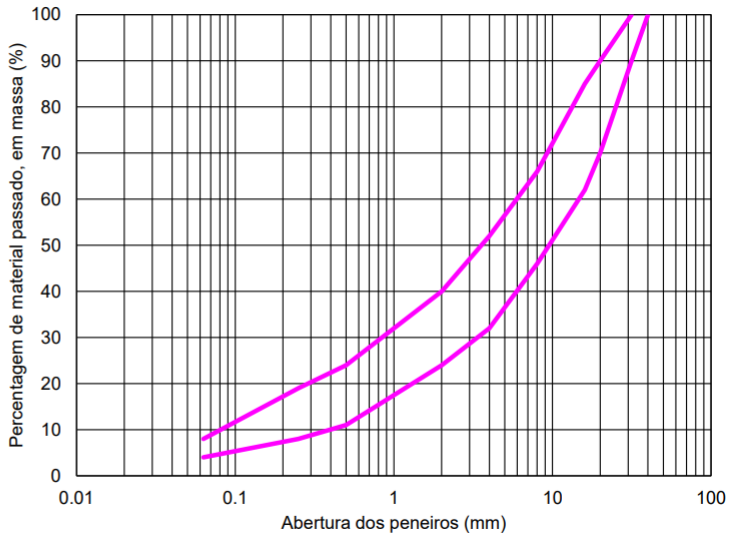


Figura 2-3. Fuso granulométrico do sub-balastro. Adaptado de IP (2023).

Para além da distribuição granulométrica, o documento técnico define ainda critérios relativos à qualidade dos finos e à resistência mecânica. A qualidade dos finos é avaliada através do ensaio de azul de metileno, enquanto a resistência mecânica à fragmentação é controlada através do coeficiente de Los Angeles e a resistência ao desgaste pelo coeficiente micro-Deval (IP, 2023).

Abaixo do sub-balastro situam-se a camada de leito, o aterro e a fundação. Estas camadas garantem o suporte global da estrutura ferroviária e condicionam a deformabilidade da via sob carregamentos cíclicos.

O comportamento das camadas ferroviárias sob a ação repetida da passagem dos comboios é complexo, sendo particularmente importante controlar a deformação permanente e a degradação dos materiais granulares. Em vias balastradas, a acumulação de deformações pode afetar a geometria das vias e aumentar as necessidades de manutenção, pelo que é essencial compreender os mecanismos de deformação e de degradação dos materiais que constituem as camadas de apoio (Alves et al., 2024).

Assim, tal como nas infraestruturas rodoviárias, a escolha dos materiais para as camadas ferroviárias deve considerar não apenas a resistência inicial, mas também a rigidez, deformabilidade, capacidade drenante, durabilidade e o comportamento sob carregamentos repetidos.

2.1.3 Síntese das camadas não ligadas relevantes para o presente trabalho

Nas infraestruturas rodoviárias e ferroviárias, as camadas não ligadas desempenham um papel essencial na transferência e na distribuição das cargas até à fundação. Nos pavimentos rodoviários, estas camadas incluem, consoante a solução estrutural adotada, a base granular, a sub-base, a camada de leito e a própria fundação melhorada. Nas vias-férreas balastradas incluem-se, sobretudo, o balastro, o sub-balastro e as camadas de apoio da plataforma ferroviária, nomeadamente a camada de leito e a fundação.

Todas estas camadas são geralmente constituídas por materiais granulares, cujo desempenho depende da granulometria, da resistência à fragmentação, da rigidez, da resistência ao corte, da deformabilidade, da permeabilidade e da sensibilidade à água. Por estarem diretamente sujeitas a ações repetidas de tráfego, a sua capacidade de limitar deformações permanentes e manter uma resposta resiliente ao longo do tempo é determinante para o desempenho global da infraestrutura.

A aplicação de subprodutos industriais em camadas não ligadas exige uma caracterização específica, não apenas granulométrica, mas também mecânica, ambiental e volumétrica, uma vez que os procedimentos normativos foram desenvolvidos sobretudo para agregados naturais e podem não abranger aspetos particulares destes materiais, como o comportamento de lixiviação ou o potencial de expansão (Mica et al., 2023b).

É neste contexto que se enquadra o estudo de materiais como as escórias de aciaria. A sua aplicação em camadas não ligadas pode contribuir para reduzir o consumo de recursos naturais e promover a valorização de resíduos, desde que o desempenho em serviço seja compatível com as exigências estruturais das infraestruturas de transporte.

2.2 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA AS CAMADAS NÃO LIGADAS

2.2.1 Enquadramento e vantagens da utilização de materiais alternativos

A construção, manutenção e reabilitação de infraestruturas de transporte exigem grandes volumes de materiais granulares, o que aumenta a pressão sobre os recursos naturais e justifica a procura de alternativas tecnicamente viáveis. Mica et al. (2023b) referem que os agregados naturais estão entre os recursos mais consumidos a nível mundial, procurando-se atualmente soluções mais sustentáveis para infraestruturas de transporte. Segundo a Aggregates Europe (UEPG, 2026), a produção europeia de agregados atingiu 4,20 mil milhões de toneladas em 2019, o que corresponde a um consumo médio de cerca de 5,6 toneladas por habitante na União Europeia (Aggregates Europe - UEPG, 2026).

A incorporação de subprodutos industriais e materiais reciclados em camadas granulares pode contribuir para uma lógica de economia circular, permitindo reduzir a extração de agregados naturais, diminuir os impactos associados ao transporte e valorizar resíduos que, de outro modo, poderiam ser depositados em aterros ou acumulados em parques. Esta abordagem é particularmente relevante em infraestruturas de transporte, uma vez que estas consomem grandes quantidades de materiais e podem, em determinadas condições, incorporar materiais alternativos sem comprometer o desempenho estrutural (Alves et al., 2023).

Assim, a seleção destes materiais deve atender simultaneamente aos benefícios ambientais e ao desempenho técnico. Qualquer material alternativo deve cumprir os mesmos requisitos da camada onde será aplicado – nomeadamente em termos de granulometria, resistência, rigidez, deformabilidade, durabilidade, estabilidade volumétrica e segurança ambiental. Só através desta verificação rigorosa é possível garantir que a solução contribui efetivamente para a sustentabilidade da infraestrutura, sem comprometer a sua vida útil nem aumentar as necessidades de manutenção.

2.2.2 Principais materiais alternativos aplicáveis

Entre os materiais alternativos com potencial de aplicação em camadas não ligadas de infraestruturas de transporte encontram-se os resíduos de construção e demolição, as escórias de aciaria e a borracha proveniente de pneus em fim de vida.

Os resíduos de construção e demolição podem ser transformados em agregados reciclados, existindo especificações técnicas para a sua utilização em camadas não ligadas de pavimentos, aterros e camadas de leito de infraestruturas de transporte (LNEC, 2009a, 2009b). A aplicação de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição deve cumprir requisitos mínimos de conformidade, incluindo dimensão máxima, teor e qualidade dos finos, propriedades geométricas, resistência à fragmentação, desgaste, comportamento mecânico, teor de sulfatos solúveis e libertação de substâncias perigosas (LNEC, 2009b).

As escórias de aciaria constituem outro grupo relevante de materiais alternativos. No processo de forno elétrico de arco, distinguem-se, em geral, escórias oxidantes, também designadas por escórias EAF, e escórias redutoras, frequentemente designadas por escórias brancas ou *ladle slag* (LS) (Mica et al., 2023b). Em Portugal, as escórias EAF de produção controlada podem ser certificadas como Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC), sendo utilizadas como agregados em obras de construção.

O ASIC mostra propriedades que justificam o seu estudo para aplicação em camadas granulares de infraestruturas de transporte, tal como a elevada densidade, rigidez, limpeza e resistência à abrasão (Alves et al., 2023). Estudos laboratoriais e ensaios em escala real indicaram, ainda, que estas escórias podem apresentar melhor desempenho mecânico do que materiais convencionais de camada de base, sobretudo em termos de rigidez e resistência à deformação permanente.

Apesar destas vantagens, o ASIC pode apresentar teor reduzido de finos, o que pode dificultar o cumprimento de algumas especificações para camadas granulares não ligadas. Uma solução estudada por Mica et al. (2023b) consiste na mistura do ASIC com LS, de modo a complementar a curva granulométrica. Este estudo visou a aplicação em camadas granulares de infraestruturas de transporte, incluindo a base, a sub-base, a camada de leito e o sub-balastro.

A borracha proveniente de pneus em fim de vida também é um material alternativo de interesse para aplicações geotécnicas e de infraestruturas. A sua reutilização permite reduzir a acumulação de pneus em aterro ou em stock e tirar partido das suas propriedades resilientes. No entanto, a borracha apresenta elevada deformabilidade, pelo que a sua incorporação em misturas granulares deve ser cuidadosamente avaliada para evitar perdas excessivas de rigidez, de capacidade de suporte e de controlo da deformação (Fu et al., 2023).

A utilização conjunta de escórias e de borracha é particularmente interessante, já que conseguimos tirar proveito dos dois sub-produtos industriais. Alves et al. (2023) referem que as misturas escória-borracha podem trazer benefícios económicos e ambientais, por evitarem a extração de materiais naturais e contribuírem para a gestão de resíduos das indústrias siderúrgicas e de pneus. Contudo, a sua aplicação em sub-balastro, camada de leito ou camadas de base e sub-base deve depender da verificação do desempenho mecânico para os teores de borracha considerados.

Apesar da crescente abertura para a incorporação de materiais alternativos, a sua transição para as especificações técnicas nacionais ainda é um processo em curso. O Caderno de Encargos Tipo Obra para pavimentação (Estradas de Portugal, 2014), reflete um claro esforço institucional para viabilizar os agregados reciclados provenientes da construção e demolição, definindo os requisitos necessários para a sua aplicação direta em misturas granulares não ligadas para camadas de base e sub-base. Contudo, este referencial normativo continua a não contemplar formalmente os subprodutos siderúrgicos, como é o caso do ASIC, nos seus quadros de materiais aprovados. Esta lacuna regulamentar evidencia a urgência em aprofundar a caracterização laboratorial da morfologia e do desempenho mecânico do ASIC, de forma a produzir a evidência científica indispensável para sustentar a sua futura integração nas diretrizes normativas de pavimentação sustentável.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO ASIC

Tal como referido no capítulo anterior, o ASIC corresponde a um agregado artificial obtido a partir do processamento de escórias siderúrgicas. Impulsionada pelas atuais preocupações ambientais e pelos princípios da Economia Circular, a sua utilização na engenharia civil tem forte potencial para tornar a construção mais sustentável, valorizando um subproduto industrial e reduzindo a extração de agregados naturais.

O ASIC resulta de um processo industrial que lhe confere propriedades relativamente constantes, sendo descrito como um material denso, rígido, limpo e resistente à abrasão. Correia et al. (2012) conduziram os primeiros estudos de desempenho em agregados siderúrgicos portugueses, destacando a importância da realização de ensaios laboratoriais de caracterização geomecânica para viabilizar e promover o uso destes subprodutos industriais em substituição dos materiais naturais. A Tabela 2-2 reúne os principais estudos e documentos técnicos considerados na caracterização e aplicação de escórias siderúrgicas em infraestruturas de transporte, indicando o material analisado, a aplicação em causa, o método adotado e os parâmetros reportados em cada estudo.

Tabela 2-2. Estudos sobre a caracterização e aplicação do ASIC e de outras escórias siderúrgicas em infraestruturas de transporte.

Referência / documento	**Material analisado**	**Aplicação / contexto**	**Método / abordagem**	**Parâmetros comparáveis**
Delgado et al. (2019b)	ASIC e granito	Balastro ferroviário	Imagem bidimensional estática (AIMS)*	Esfericidade, angularidade, textura superficial
Paixão e Fortunato (2021)	Escória EAF e granito	Balastro ferroviário, ensaio micro-Deval	Fotogrametria, malhas 3D, harmónicos esféricos	FI3DN, AI3DN , MT3DN , textura superficial
Mica et al. (2023b)	Escórias de aço, incluindo EAF	Infraestruturas de transporte	Revisão crítica	Índice de forma, índice de achatamento, angularidade, requisitos técnicos
Alves et al. (2024)	Escória EAF	Sub-balastro ferroviário	Ensaios laboratoriais e modelação numérica	Granulometria, rigidez, resistência, desgaste, propriedades físicas
Mica et al. (2023a)	Misturas EAF-LS	Base, sub-base, leito, sub-balastro e estradas não pavimentadas	Caracterização geomecânica de misturas	Desempenho geomecânico, dosagem, comportamento hidromecânico
Alves et al. (2023)	Misturas escória-borracha	Sub-balastro, camada de leito, base e sub-base	Ensaios CBR, triaxiais e defletómetro de impacto leve	Desempenho mecânico, deformabilidade, teor de borracha

* Sistema de análise morfológica por imagem bidimensional, apresentado na secção 2.4.2.

Os estudos reunidos na Tabela 2-2 abordam as escórias siderúrgicas segundo três perspetivas complementares. Delgado et al. (2019b) e Paixão e Fortunato (2021) focaram a caracterização morfológica, recorrendo, respetivamente, à análise de imagem bidimensional e à digitalização tridimensional com representação por harmónicas esféricas, e forneceram os parâmetros diretamente comparáveis com os obtidos na presente dissertação. Mica et al. (2023a, 2023b) contribuíram com uma síntese crítica sobre a utilização destas escórias em infraestruturas de transporte, sistematizando os requisitos técnicos aplicáveis e o desempenho geomecânico reportado na literatura. Por fim, Alves et al. (2023, 2024) avaliaram o comportamento mecânico do material em contexto de sub-balastro e de misturas com borracha, através de ensaios CBR, triaxiais e de defletómetro de impacto leve, complementados por modelação numérica.

A comparação entre estudos deve ser feita com cautela, uma vez que os parâmetros reportados dependem do método de caracterização e da escala de análise. Os valores mecânicos obtidos nos ensaios triaxiais e CBR, nomeadamente os ângulos de atrito e os módulos resilientes superiores aos dos materiais de referência, são apresentados em detalhe nas Tabela 2-3 e Tabela 2-4 e discutidos nas secções seguintes. Os parâmetros morfológicos, pelo contrário, apenas são diretamente comparáveis entre estudos que recorreram às mesmas grandezas, como os índices tridimensionais de Paixão e Fortunato (2021), utilizados como referência no Capítulo 4.

Alves et al. (2024) analisaram uma amostra de escória que (após ser sujeita a britagem para garantir o enquadramento na curva exigida) apresentou uma curva granulométrica perfeitamente enquadrada nos limites da especificação portuguesa para sub-balastro, classificando-se como uma gravilha bem graduada com silte, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos. Embora esta observação ateste a qualidade do lote estudado, a aplicação em obra deve ser sempre precedida de verificação granulométrica para garantir a conformidade com as exigências técnicas da respetiva camada.

Esta adequação granulométrica pode ser visualizada na Figura 2-4, que ilustra a curva da escória de aço em ensaio face às balizas (fuso) exigidas pela especificação nacional.

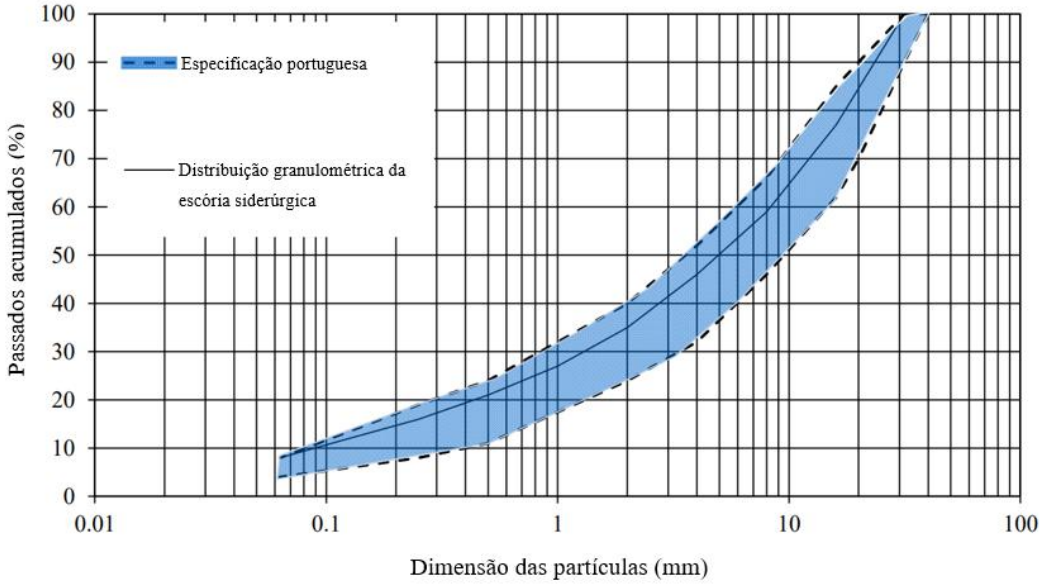


Figura 2-4. Curva granulométrica da escória de aço (ASIC) face ao fuso de especificação portuguesa para sub-balastro (adaptado de Alves et al., 2024).

Para além da conformidade granulométrica, Alves et al. (2024) determinaram as principais propriedades físicas e mecânicas da escória de aço estudada, apresentadas na Tabela 2-3. O valor de CBR obtido evidencia a elevada capacidade de suporte do material nas condições de ensaio consideradas, reforçando o seu potencial para aplicação em camadas granulares sujeitas a carregamentos repetidos.

Tabela 2-3. Propriedades físicas e granulométricas da escória de aço estudada por Alves et al. (2024), para aplicação em sub-balastro ferroviário.

Propriedade	**Valor**
Diâmetro médio, D_{50}	5 mm
Teor de finos, inferior a 0,074 mm	8%
Coeficiente de uniformidade, C_u	100
Coeficiente de curvatura, C_c	2,25
Massa volúmica específica	3,53
Peso volúmico seco máximo	2850 kg/m³
Teor ótimo em água	4%
Índice CBR	213%

No que respeita ao comportamento mecânico, o ASIC tem demonstrado uma excelente estabilidade. No contexto ferroviário, Alves et al. (2024) avaliaram laboratorialmente e numericamente (via modelação tridimensional) o seu uso como material de sub-balastro. Os ensaios triaxiais confirmaram um elevado ângulo de atrito interno, um elevado módulo resiliente e uma baixa suscetibilidade à deformação permanente, reforçando a adequação do ASIC para as camadas de fundação.

Estas conclusões alinham-se com os resultados de Delgado et al. (2019a), que compararam o comportamento do ASIC com o do granito convencional através de ensaios triaxiais monotónicos e cíclicos à escala real. O ASIC apresentou parâmetros de resistência ao corte superiores, tanto na envolvente de pico como no estado crítico, indicando maior estabilidade para cargas de grande intensidade. No que respeita à deformação permanente sob ciclos de carga pesada, o ASIC apresentou uma tendência mais rápida para estabilização e uma menor taxa de fragmentação de partículas comparativamente ao granito natural. Os principais parâmetros reportados na literatura para o ASIC encontram-se sintetizados na Tabela 2-4.

Tabela 2-4. Parâmetros mecânicos e morfológicos reportados na literatura para o ASIC.

Parâmetro	**Valor reportado**	**Referência**
Ângulo de atrito efetivo	64°	Alves et al. (2024)
Coesão efetiva	85 kPa	Alves et al. (2024)
Deformação permanente	Estabilização após cerca de 300 000 ciclos	Alves et al. (2024)
Ângulo de atrito no estado crítico	48,1° para o ASIC e 46,7° para o granito	Delgado et al. (2019a)
Esfericidade	0,64 a 0,77	Paixão e Fortunato (2021)
Índice de achatamento, S/I	0,46 a 0,98	Paixão e Fortunato (2021)
Índice de alongamento, I/L	0,61 a 0,98	Paixão e Fortunato (2021)
Angularidade e microtextura	Superiores às do granito ao longo do ensaio micro-Deval	Paixão e Fortunato (2021)

2.4 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

2.4.1 Importância da morfologia das partículas

A forma geométrica das partículas é um fator determinante no comportamento mecânico dos materiais granulares aplicados em infraestruturas de transporte. No caso do balastro ferroviário, a estabilidade de toda a camada e a sua resistência à deformação dependem fortemente do tamanho e da forma das partículas constituintes (Afonso, 2021). O mesmo princípio aplica-se ao ASIC. Delgado et al. (2019b) sublinham que a resiliência, a resistência ao corte e a deformação permanente dos agregados estão intrinsecamente ligadas às suas propriedades morfológicas.

Para compreender totalmente o comportamento destes materiais, a morfologia é avaliada a três níveis distintos: a forma global (relacionada com a proporção geral da partícula, indicando se é mais equidimensional, achatada ou alongada), a angularidade (que avalia a presença de arestas vivas e vértices aguçados) e a textura superficial (que descreve a rugosidade à microescala).

Estas três escalas geométricas controlam diretamente a qualidade do contacto entre os grãos e a eficácia do seu intertravamento. Partículas mais angulares e rugosas favorecem o bloqueio mútuo e oferecem maior resistência ao movimento. Contudo, as suas arestas proeminentes também estão mais expostas à fragmentação e ao desgaste sob a ação contínua do tráfego. Compreender esta relação é fundamental no estudo do ASIC, dado que o seu perfil geométrico peculiar ajuda a justificar o desempenho mecânico distinto que apresenta face aos agregados de rocha natural.

2.4.2 Técnicas e equipamentos de caracterização morfológica

A caracterização morfológica dos agregados pode ser realizada por métodos tradicionais ou por técnicas digitais de aquisição e processamento de imagem. As técnicas digitais permitem quantificar parâmetros geométricos de forma mais rápida, objetiva e reprodutível, reduzindo as limitações associadas à observação manual das partículas.

Neste trabalho, designa-se por caracterização morfológica convencional a análise baseada nas três dimensões principais da partícula e nas razões de modo que delas derivam (esfericidade, alongamento e achatamento), parâmetros frequentemente adotados na literatura para a caracterização global da forma.

Entre os sistemas baseados em imagem bidimensional estática destaca-se o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), comercializado pela Pine Instrument. Neste equipamento, cada partícula é colocada individualmente numa mesa circular rotativa e registada em repouso por uma câmara sob diferentes condições de iluminação, permitindo avaliar a esfericidade, a angularidade e a textura superficial a partir de projeções bidimensionais do grão (Delgado et al., 2019b). É este o sistema utilizado por Delgado et al. (2019b) na comparação morfológica entre o ASIC e o granito referida na Tabela 2-2. O equipamento apresenta, contudo, limitações quanto à gama de tamanhos analisável, estando otimizado para partículas entre os 0,075 mm e os 37,5 mm, adequado a agregados de pavimentação, mas não a poeiras muito finas ou a partículas de grandes dimensões.

A análise dinâmica de imagem constitui outra abordagem bidimensional amplamente validada. Equipamentos como o QICPIC (Sympatec), o Camsizer (Microtrac MRB) ou o Morphologi (Malvern Panalytical) registam imagens de partículas em movimento ou dispersão, permitindo analisar um número elevado de grãos num intervalo de tempo reduzido. Esta técnica é particularmente adequada para determinar a dimensão e a forma global das partículas, uma vez que recolhe projeções em várias orientações e aumenta drasticamente a representatividade estatística da amostra (Yao e Li, 2023). A gama de dimensões avaliada varia substancialmente com a ótica de cada equipamento, pelo que a Tabela 2-5 sistematiza a aplicabilidade destas principais tecnologias bidimensionais.

Tabela 2-5. Comparação das gamas de dimensão em equipamentos bidimensionais.

Equipamento	**Fabricante Principal**	**Princípio de Aquisição**	**Gama Típica de Tamanhos**
AIMS	Pine Instrument	Imagem estática (mesa rotativa)	0,075 mm a 37,5 mm
QICPIC	Sympatec	Imagem dinâmica (dispersão/queda)	1 µm a 30 mm
Camsizer P4	Microtrac MRB	Imagem dinâmica (2 câmaras)	20 µm a 30 mm
Morphologi 4	Malvern Panalytical	Imagem estática (lâmina)	0,5 µm a 1,3 mm

Apesar da utilidade dos equipamentos referidos, quando se pretende caracterizar a geometria completa das partículas, as técnicas tridimensionais tornam-se indispensáveis. A digitalização por contacto, a digitalização a laser e a fotogrametria de proximidade permitem obter as coordenadas reais da superfície e gerar malhas digitais tridimensionais, essenciais para analisar a fundo a angularidade e a evolução da degradação das partículas (Jerónimo et al., 2019; Paixão e Fortunato, 2021).

Uma tecnologia particularmente vantajosa para agregados na ordem dos centímetros (como as escórias deste trabalho) é a digitalização por luz estruturada. Neste método, o equipamento projeta padrões luminosos sobre a superfície da partícula e as câmaras óticas registam a deformação topográfica desses padrões, reconstruindo a geometria de forma precisa. Esta abordagem supera a digitalização bidimensional ao permitir obter modelos onde são perfeitamente visíveis as arestas vivas, as concavidades profundas e as zonas de elevada rugosidade que caracterizam o ASIC.

No presente trabalho, recorreu-se a um scanner *Artec 3D* de luz estruturada para a aquisição destes modelos geométricos, método cuja descrição detalhada será objeto de análise no capítulo metodológico subsequente.

2.5 Utilização de Partículas Digitais na Modelação Numérica por Elementos Discretos

O Método dos Elementos Discretos, geralmente designado por DEM, é uma ferramenta numérica adequada ao estudo de materiais granulares, pois representa o material como um conjunto de partículas individuais e permite analisar a evolução dos seus contactos, deslocamentos e forças interparticulares durante o carregamento. Esta abordagem complementa os ensaios laboratoriais, possibilitando a observação de mecanismos micromecânicos que não são diretamente acessíveis à escala do provete, como o rearranjo das partículas e a evolução da rede de contactos.

A fiabilidade e o realismo desta modelação numérica dependem, de forma indissociável, da geometria com que os grãos são simulados. Como demonstrado no trabalho de revisão da evolução do DEM para aplicações geotécnicas (O'Sullivan et al., 2026), a utilização de formas idealizadas (como esferas perfeitas) constitui uma limitação estrutural na predição do comportamento de materiais geológicos, sublinhando a necessidade premente de incorporar a morfologia, a angularidade e a textura superficial nas análises. Torna-se, assim, essencial para o sucesso do modelo dispor de malhas digitalizadas das partículas ou, em alternativa, garantir algoritmos capazes de gerar geometrias baseadas em características validadas estatisticamente. A representação fiel da forma influencia a distribuição dos contactos no esqueleto e, em consequência, a resposta macro-mecânica ao corte e à compressão.

Esta exigência representativa é ainda mais crítica quando se avaliam subprodutos industriais de geometria complexa, como as escórias siderúrgicas (ASIC). A aplicação da modelação DEM à avaliação do desempenho destas escórias tem revelado como a sua morfologia se traduz em vantagens mecânicas no comportamento granular. Jia et al. (2021) acoplaram ensaios laboratoriais e simulações DEM para analisar o potencial da escória como sub-balastro ferroviário. A modelação micromecânica permitiu verificar que as partículas de escória apresentavam uma melhor distribuição de forças e garantiam um desempenho global superior ao da brita convencional, destacando o papel favorável da sua rugosidade e irregularidade, registando inclusivamente uma redução dilatante considerável face aos agregados tradicionais.

Num estudo equivalente mas focado noutra via de escoamento industrial, Aremu et al. (2026) avaliaram agregados de escória de forno básico a oxigénio (BOF) para a camada de balastro. Recorrendo a ensaios de corte direto à escala real calibrados por simulações DEM, Aremu et al. (2026) demonstraram que o forte intertravamento derivado da morfologia irregular das escórias e da sua resistência de pico é determinável através da simulação micromecânica de agregados de geometria angular rigorosa.

Assim, a modelação DEM constitui uma ferramenta muito útil para investigar a influência da geometria das partículas nas condições de suporte de infraestruturas de transporte. Contudo, para que os mecanismos captados pelo modelo reflitam com rigor as propriedades do ASIC, a introdução de uma geração de geometrias artificiais (partículas virtuais) baseada em parâmetros validados e reconstruções de fotogrametria e de harmónicas esféricas é uma transição indispensável. Os resultados numéricos derivados destes contornos rigorosos deverão, como em qualquer abordagem mista, ser sempre calibrados e validados com as correspondentes propriedades laboratoriais e ensaios em elementos à escala.

3 METODOLOGIA DE DIGITALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA TRIDIMENSIONAL DO ASIC

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve a metodologia adotada para a digitalização tridimensional e a caracterização morfológica de partículas de ASIC. O procedimento foi desenvolvido para obter modelos geométricos individuais capazes de representar, com rigor, a geometria das partículas e de apoiar a quantificação das suas propriedades de forma.

O trabalho incluiu a seleção das partículas, a digitalização tridimensional, o pós-processamento e a validação das malhas obtidas, bem como a caracterização morfológica através de parâmetros convencionais e da representação geométrica por harmónicas esféricas. A informação extraída das partículas reais foi posteriormente utilizada na geração de partículas virtuais, com o objetivo de representar a variabilidade geométrica observada em cada fração granulométrica.

3.2 MATERIAL ANALISADO E SELEÇÃO DAS PARTÍCULAS

A análise incidiu sobre partículas individuais de ASIC provenientes de duas frações granulométricas obtidas por peneiração, 4/8 mm e 8/16 mm. Ao longo deste trabalho, as partículas da fração 4/8 mm são designadas por fração de 8 mm, enquanto as partículas da fração 8/16 mm são designadas por fração de 12 mm. Esta última designação foi adotada por representar de forma mais adequada a dimensão das partículas analisadas, uma vez que eram pouco numerosas as partículas com comprimento superior a 12 mm.

Cada partícula foi tratada como uma entidade geométrica independente em todas as etapas do estudo. A seleção procurou incluir partículas com diferentes formas globais e distintos níveis de irregularidade superficial, de modo a abranger a variabilidade morfológica existente em cada fração. A amostra não pretende representar toda a gama de dimensões produzida pela indústria siderúrgica, mas permitir uma análise controlada das relações entre a dimensão das partículas, a sua geometria global e a microtextura superficial.

A Figura 3-1 apresenta a curva granulométrica do ASIC fornecido pela fábrica, determinada por peneiração, que serviu de base à seleção das partículas analisadas. A análise da curva mostra que aproximadamente 35% do material se encontra na gama da fração 4/8 mm e cerca de 32% na gama da fração 8/16 mm, frações de onde foram extraídas as partículas analisadas neste trabalho. Regista-se ainda que apenas cerca de 4% do material apresenta dimensões superiores a 16 mm, o que é consistente com a adoção, ao longo do texto, de designações baseadas na abertura dos peneiros que delimitam cada fração.

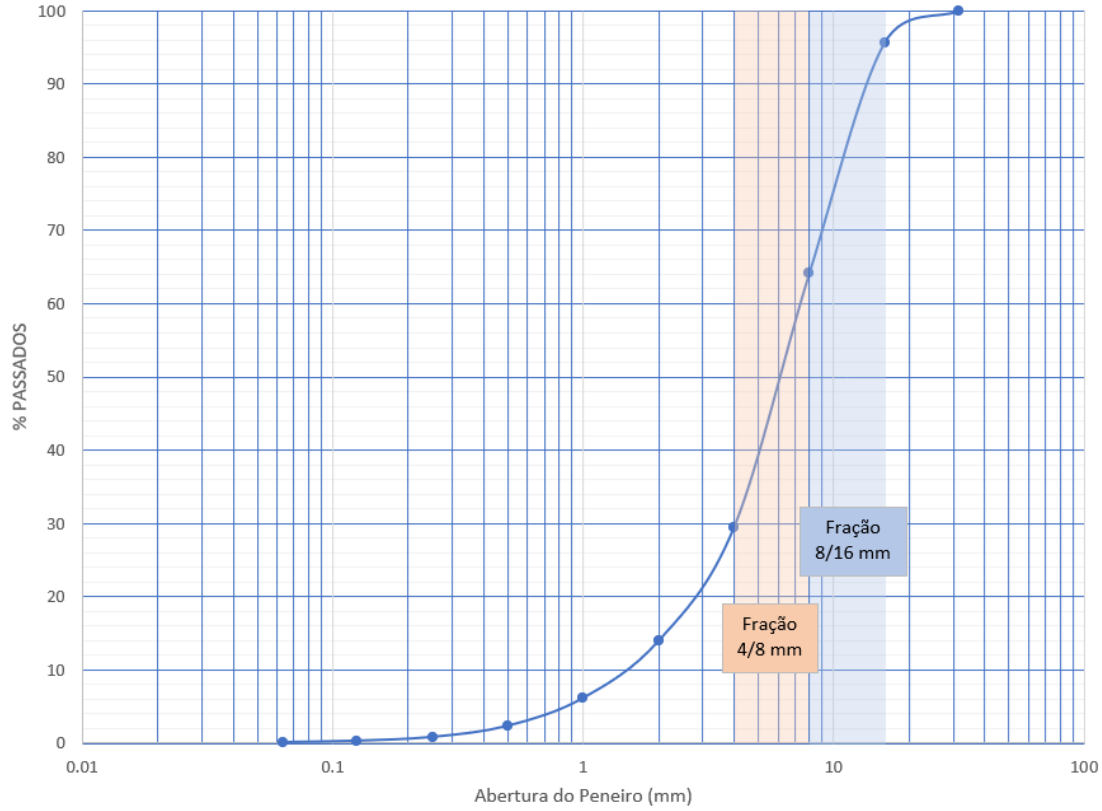


Figura 3-1. Curva granulométrica do ASIC da fábrica, determinada por peneiração, com indicação das frações 4/8 mm e 8/16 mm utilizadas no estudo.

3.3 PROCEDIMENTO DE DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL

3.3.1 Equipamento utilizado

A digitalização tridimensional das partículas de Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) foi realizada com recurso a um scanner portátil de luz estruturada Artec 3D Space Spider, disponibilizado pelo Núcleo de Conservação do Património Natural e Construído do Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O equipamento utiliza tecnologia de luz azul estruturada para adquirir a geometria tridimensional da superfície dos objetos e permite também a obtenção de informação de textura em cor RGB.

De acordo com as especificações técnicas consultadas, o Artec 3D Space Spider apresenta uma resolução tridimensional até 0,05 mm, uma precisão pontual até 0,05 mm, uma precisão volumétrica de 0,05 mm/m, uma área de digitalização focal de aproximadamente 90 × 70 mm e uma taxa de aquisição de 7,5 fotogramas por segundo.

A área de digitalização de 90 × 70 mm corresponde ao campo de aquisição ou zona focal do scanner, não devendo ser confundida com a gama granulométrica das partículas analisadas. No presente trabalho, o equipamento foi utilizado para digitalizar partículas de ASIC pertencentes às frações nominais de 8 mm e 12 mm, integradas no intervalo dimensional associado ao sub-balastro, aproximadamente entre 0 e 30 mm.

Estas características tornam o equipamento adequado à obtenção de modelos geométricos detalhados de partículas de pequena dimensão. A resolução e a precisão do scanner permitiram representar a geometria global das partículas, bem como as suas irregularidades superficiais, arestas e reentrâncias.

Para assegurar a reprodutibilidade e a consistência dos resultados, manteve-se, tanto quanto possível, a mesma configuração durante todas as aquisições, nomeadamente no que respeita à posição do scanner, à distância relativamente às partículas, às condições de iluminação e à velocidade de rotação do suporte. A Figura 3-2 apresenta a configuração utilizada na digitalização tridimensional das partículas de ASIC.



Figura 3-2. Equipamento utilizado para a digitalização tridimensional das partículas de ASIC.

A utilização deste equipamento permitiu obter uma representação detalhada da superfície das partículas. Os modelos digitais resultantes constituíram a base das etapas subsequentes de pós-processamento, caracterização morfológica e análise dos dados.

3.3.2 Preparação e fixação das partículas

Antes da digitalização, as partículas de ASIC foram preparadas através da remoção de poeiras, fragmentos soltos e resíduos superficiais suscetíveis de interferir com a leitura ótica da superfície. Esta etapa permitiu reduzir a presença de elementos estranhos nos modelos digitais e assegurar que a geometria obtida correspondesse, tanto quanto possível, à geometria real de cada partícula.

A fixação das partículas exigiu particular atenção devido à sua reduzida dimensão, elevada rigidez e geometria irregular. A utilização de um suporte convencional poderia ocultar parte da superfície ou dificultar a aquisição de zonas com maior irregularidade geométrica, comprometendo a qualidade do modelo tridimensional.

Para ultrapassar esta limitação, cada partícula foi fixada numa agulha metálica fina, inserida numa base de espuma. A configuração adotada, apresentada na Figura 3-3, assegurou a estabilidade das partículas durante a aquisição e reduziu a área de contacto com o suporte, permitindo expor uma maior porção da superfície ao scanner.



Figura 3-3. Preparação das partículas de ASIC para digitalização tridimensional, com fixação individual em agulhas metálicas inseridas numa base de espuma.

As partículas foram preparadas em pequenos conjuntos, geralmente constituídos por quatro ou cinco unidades, dependendo da sua dimensão. A base de espuma, com as partículas fixadas nas agulhas metálicas, foi colocada sobre um prato giratório, enquanto o scanner permaneceu numa posição fixa durante a aquisição.

A rotação controlada do prato permitiu adquirir a superfície das partículas segundo diferentes orientações e reduzir a existência de zonas ocultas. Este procedimento foi realizado de forma lenta e controlada, uma vez que uma rotação excessivamente rápida poderia comprometer a qualidade da leitura ótica e provocar a queda das partículas fixadas nas agulhas.

Embora as partículas tenham sido digitalizadas em pequenos conjuntos, cada uma foi posteriormente isolada e tratada como um modelo tridimensional independente nas etapas de processamento e caracterização morfológica.

3.3.3 Aquisição dos modelos tridimensionais

Durante o processo de digitalização, a superfície das partículas foi adquirida segundo diferentes orientações, procurando manter uma distância adequada e aproximadamente constante entre o scanner e o material. Dada a morfologia complexa do ASIC, a presença de arestas, reentrâncias e zonas de sombra dificultava a captura integral da superfície numa única passagem.

Para ultrapassar esta dificuldade, a aquisição foi acompanhada em tempo real através do *software* Artec Studio. O ambiente de visualização preliminar do *software* é apresentado na Figura 3-4. Este acompanhamento permitiu identificar imediatamente regiões insuficientemente captadas ou com informação incompleta.

Sempre que eram detetadas zonas ocultas, o prato giratório ou as partículas eram reposicionados, permitindo realizar aquisições complementares. Desta forma, procurou-se garantir a continuidade da informação geométrica e o nível de detalhe necessário à construção dos modelos tridimensionais.

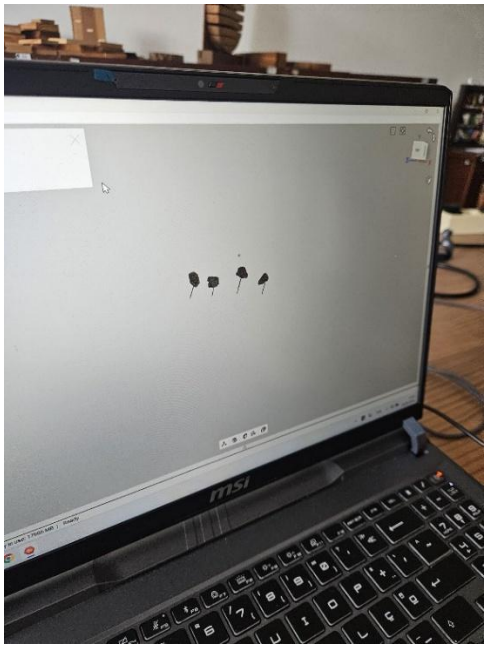
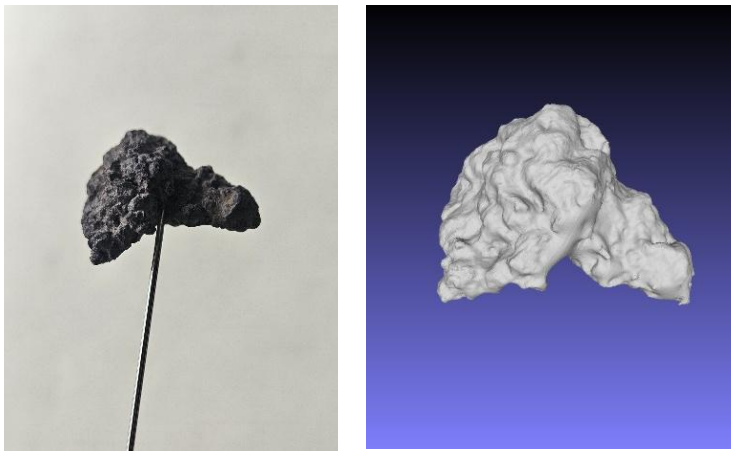


Figura 3-4. Resultado virtual preliminar da digitalização das partículas de ASIC no *software* do equipamento Artec 3D.

A correspondência visual entre uma partícula física e o respetivo modelo digital, apresentada na Figura 3-5, permite avaliar qualitativamente o resultado da aquisição.



a) b)

Figura 3-5. Comparação entre uma partícula real de ASIC e o respetivo modelo digital tridimensional: a) partícula real preparada para digitalização; b) modelo digital obtido após aquisição e processamento da malha.

A comparação evidencia que a digitalização permitiu representar a geometria global da partícula e as suas principais irregularidades superficiais. Após a conclusão da aquisição e da verificação visual preliminar, os modelos digitais foram exportados para a fase de pós-processamento, que incluiu a limpeza, o isolamento e a validação final das malhas.

3.4 PÓS-PROCESSAMENTO, LIMPEZA E VALIDAÇÃO DAS MALHAS

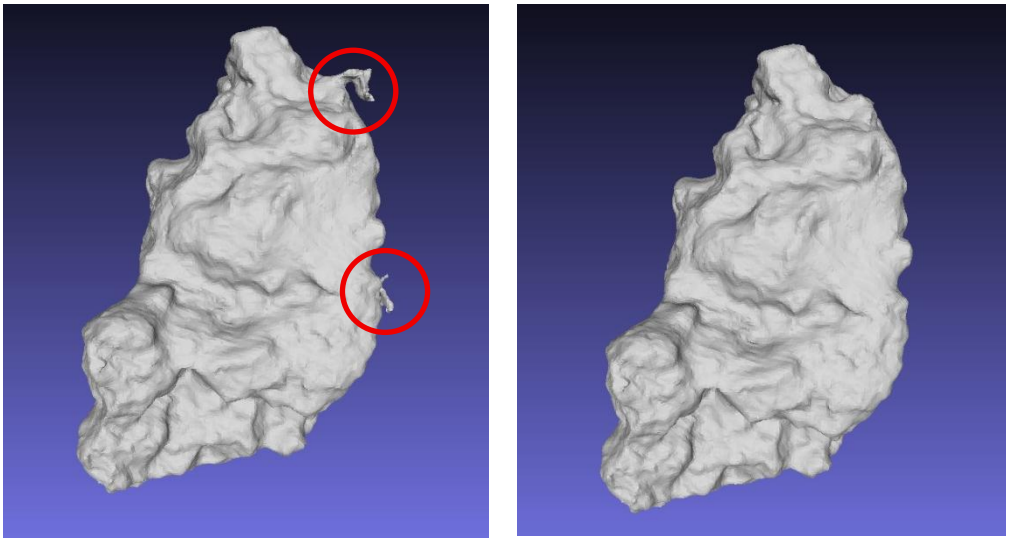
3.4.1 Limpeza e isolamento das partículas

Após a digitalização, os modelos tridimensionais foram submetidos a pós-processamento, com o objetivo de produzir malhas adequadas à caracterização morfológica. Esta etapa incluiu a limpeza dos modelos, o isolamento das partículas, a correção de pequenas lacunas e a validação das geometrias antes da exportação para os procedimentos de cálculo.

Os modelos tridimensionais obtidos durante a digitalização podiam incluir elementos que não pertenciam à geometria das partículas de ASIC. Estes elementos resultavam sobretudo do sistema de fixação utilizado durante a aquisição, incluindo partes das agulhas metálicas, da base de suporte, resíduos associados ao processo de digitalização ou pequenos fragmentos isolados.

No *software* MeshLab, estes artefactos foram identificados por inspeção visual e removidos das malhas. Em primeiro lugar, recorreu-se às ferramentas de seleção disponíveis na barra principal do programa, para selecionar manualmente as faces e os vértices correspondentes aos elementos externos à partícula, nomeadamente os fragmentos das agulhas metálicas e da base de suporte, seguidamente eliminados através da operação de remoção da seleção efetuada. As lacunas resultantes desta operação, bem como as pequenas falhas da aquisição, foram depois preenchidas com o filtro *Close Holes*, que deteta os contornos de bordos livres e fecha as aberturas por interpolação da superfície circundante, tendo o diâmetro máximo de fecho sido ajustado caso a caso para não interferir com reentrâncias que pertenciam à geometria real da partícula.

O processo de limpeza aplicado a uma das partículas é ilustrado na Figura 3-6. A figura compara o modelo inicial, ainda com artefactos resultantes da aquisição, com a malha final após a remoção desses elementos e o isolamento da partícula.



a) b)

Figura 3-6. Processamento da malha tridimensional de uma partícula de ASIC: a) modelo inicial antes da limpeza; b) modelo final após remoção dos artefactos de aquisição e isolamento da partícula.

Após a limpeza, a estanquidade de cada malha foi verificada através do filtro *Compute Topological Measures*, que quantifica o número de bordos de fronteira e de buracos da superfície, considerando-se a malha fechada quando o número de bordos de fronteira era nulo. A consistência da malha foi ainda assegurada através da remoção de faces duplicadas (*Remove Duplicate Faces*), de vértices duplicados (*Remove Duplicate Vertices*) e de vértices ou fragmentos isolados desconectados da geometria principal (*Remove Isolated Vertices e Remove Isolated Pieces)*. Estas verificações garantiram que os cálculos posteriores incidissem apenas sobre a superfície efetiva de cada partícula. A permanência de elementos externos poderia alterar parâmetros como a área superficial, o volume e as dimensões extraídas da malha, comprometendo a caracterização morfológica.

3.4.2 Correção controlada das malhas

Concluídas a limpeza e o isolamento, as malhas foram novamente verificadas no MeshLab para avaliar a continuidade da superfície e a coerência geométrica dos modelos obtidos. Esta verificação permitiu identificar pequenas lacunas, descontinuidades ou zonas localmente incompletas, geralmente associadas a regiões de acesso mais difícil durante a digitalização.

Sempre que necessário, essas imperfeições foram corrigidas para obter superfícies fechadas e adequadas ao cálculo das propriedades geométricas. As correções limitaram-se aos efeitos introduzidos durante a aquisição, sem suavizar ou alterar as arestas, reentrâncias e restantes irregularidades que pertenciam à geometria real das partículas.

A validação final foi realizada por inspeção visual, confirmando que cada malha apresentava continuidade suficiente, mantinha uma geometria coerente com a partícula digitalizada e podia ser utilizada nos cálculos de área superficial, volume e parâmetros dimensionais. As malhas que ainda apresentavam problemas foram novamente corrigidas antes de avançarem para a caracterização morfológica.

Os modelos validados foram exportados em formato PLY, constituindo a base de dados de entrada para a caracterização morfológica convencional e tridimensional.

Esta validação diz respeito à qualidade da malha obtida após a digitalização e o pós-processamento. A validação das reconstruções por harmónicas esféricas, baseada na comparação entre a malha original e a geometria reconstruída, é apresentada no ponto 3.5.

3.5 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA CONVENCIONAL

3.5.1 Extração dos parâmetros geométricos

A caracterização morfológica convencional foi realizada a partir das malhas tridimensionais validadas e exportadas em formato PLY. Esta etapa teve como objetivo quantificar a dimensão e a forma global de cada partícula de ASIC, permitindo comparar as frações granulométricas nominais de 8 mm e 12 mm.

Para cada partícula foram determinados parâmetros dimensionais, parâmetros adimensionais de forma e a respetiva classe morfológica no diagrama de Zingg, como explicado abaixo. Esta análise permitiu obter uma primeira descrição quantitativa da geometria das partículas. A angularidade e a microtextura superficial foram analisadas posteriormente na secção 3.6, através da representação por harmónicas esféricas.

A extração dos parâmetros geométricos foi automatizada através de uma rotina desenvolvida em MATLAB que foi adaptada no âmbito desta dissertação a partir de trabalhos anteriores do grupo, nomeadamente por Afonso (2021) e Paixão e Fortunato (2021). A rotina processa sequencialmente cada malha PLY, começando por ler a malha triangular e construir a matriz de coordenadas dos vértices, posteriormente, centra a geometria no seu centro de massa e alinha segundo os eixos principais de inércia, de modo a obter uma orientação consistente entre partículas. As três dimensões ortogonais principais da partícula, L, I e S, são determinadas a partir da extensão da geometria alinhada ao longo de cada eixo principal, garantindo que os comprimentos medidos correspondem às dimensões ortogonais extremas da partícula. A área superficial, A, é obtida por soma das áreas dos triângulos da malha, e o volume, V, é calculado pela soma dos volumes dos tetraedros definidos por cada face triangular em relação à origem do referencial local. O diâmetro equivalente, D_{eq}, foi utilizado como medida única da dimensão global da partícula e corresponde ao diâmetro de uma esfera com o mesmo volume.

$$D_{eq} = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

As dimensões assim determinadas correspondem à escala real de cada malha digitalizada. Para permitir a comparação dimensional entre conjuntos de partículas de dimensões muito distintas, as dimensões das partículas da série de referência EAF-Ref (Paixão e Fortunato, 2021), de dimensões superiores às das frações analisadas, foram escaladas por um fator de escala uniforme, de modo a torná-las dimensionalmente equivalentes às frações de 8 mm e de 12 mm. Esta operação não introduz distorção morfológica, uma vez que a aplicação de um fator de escala uniforme multiplica todas as dimensões pelo mesmo valor, preservando as razões entre elas e, consequentemente, todos os parâmetros adimensionais de forma. Os parâmetros dimensionais assim corrigidos são identificados, ao longo do texto, pelos sufixos L_{corr}, I_{corr}, L_{corr} e $D_{eq,corr}$. Na série EAF-Ref, os valores adimensionais (esfericidade, alongamento, achatamento e índices tridimensionais) são, por isso, diretamente comparáveis com os das frações analisadas, independentemente da escala.

Este procedimento foi aplicado de forma idêntica a todas as partículas das duas frações, assegurando a comparabilidade e a reprodutibilidade dos valores extraídos.

3.5.2 Parâmetros adimensionais de forma

A forma das partículas foi avaliada através da esfericidade, do alongamento e do achatamento. Como estes parâmetros são calculados a partir de relações entre dimensões ou entre propriedades geométricas, permitem comparar partículas de tamanhos diferentes sem que a escala absoluta condicione diretamente a interpretação.

A esfericidade relaciona o volume e a área superficial de cada partícula. Valores próximos de 1 correspondem a geometrias mais compactas e semelhantes a uma esfera, enquanto valores menores indicam um maior afastamento dessa geometria ideal. A esfericidade, definida por Wadell (1932) e utilizada por Paixão e Fortunato (2021) na caracterização de partículas por harmónicas esféricas, foi obtida por:

$$\Psi = \frac{\pi^{\frac{1}{3}}(6V)^{\frac{2}{3}}}{A} \tag{4}$$

O alongamento, q, determinado pela relação entre a dimensão intermédia e o comprimento máximo (Zingg, 1935), foi obtido por:

$$q = \frac{I}{L} \tag{5}$$

Valores inferiores indicam partículas mais alongadas, enquanto valores próximos de 1 representam partículas cujas dimensões maior e intermédia são semelhantes.

O achatamento, p, calculado pela relação entre a menor dimensão e a dimensão intermédia (Zingg, 1935), foi determinado por:

$$p = \frac{S}{I} \tag{6}$$

Neste caso, valores baixos correspondem a partículas mais achatadas, enquanto valores próximos de 1 indicam espessura semelhante à dimensão intermédia.

3.5.3 Classificação morfológica pelo diagrama de Zingg

A classificação das partículas pelo diagrama de Zingg (Zingg, 1935), na forma utilizada por Afonso (2021) com base em Blott e Pye (2002), permitiu complementar os parâmetros de alongamento e achatamento calculados anteriormente, representando cada partícula no plano definido pelo achatamento, p, e pelo alongamento, q.

No diagrama, as linhas $p = \frac{2}{3}$ e $q = \frac{2}{3}$ definem os limites entre as quatro classes morfológicas. As partículas são classificadas como equidimensionais quando as suas três dimensões apresentam valores semelhantes. Quando a dimensão L se destaca relativamente a I e S, a partícula é classificada como alongada. Quando a dimensão S é claramente inferior às restantes, corresponde a uma partícula achatada. Por fim, quando uma partícula apresenta simultaneamente tendência para alongamento e achatamento, é classificada como lamelar.

Esta classificação foi utilizada para comparar a distribuição morfológica das partículas das frações de 8 mm e de 12 mm. A representação dos resultados no diagrama de Zingg é apresentada no Capítulo 4.

A qualidade e a robustez desta etapa de extração dependem sobretudo da qualidade das malhas de entrada, validada na secção 3.4.2, e da consistência do alinhamento por eixos principais de inércia. Este alinhamento pode apresentar ambiguidade quando a partícula tem dimensões principais muito próximas entre si, uma vez que a ordenação dos eixos se torna sensível a pequenas diferenças. Nas partículas afetadas, o impacto sobre os parâmetros adimensionais é reduzido, dado que a troca de atribuição entre eixos não altera o conjunto dos três comprimentos determinados, apenas a sua correspondência a cada eixo. A aplicação uniforme da rotina a todas as partículas das duas frações garante, assim, a comparabilidade dos resultados.

3.6 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL POR HARMÓNICAS ESFÉRICAS

Para complementar a caracterização morfológica convencional, as malhas tridimensionais validadas foram analisadas através de harmónicas esféricas. Este método permitiu representar matematicamente a superfície de cada partícula, descrevendo a sua forma tridimensional fechada através de uma função radial em coordenadas esféricas (Garboczi, 2002), e separar diferentes escalas da sua geometria, desde a forma global até às irregularidades mais localizadas.

A análise foi utilizada para reconstruir a geometria das partículas, avaliar a qualidade dessa reconstrução e calcular índices tridimensionais associados à forma, à angularidade e à microtextura superficial. Apenas as reconstruções que apresentaram correspondência adequada com as malhas originais foram utilizadas nas etapas seguintes.

A análise por harmónicas esféricas foi aplicada às malhas PLY previamente processadas, e o cálculo foi realizado em MATLAB através de um algoritmo baseado na formulação radial proposta por Garboczi (2002) e posteriormente aplicada à caracterização de partículas granulares por Kutay et al. (2010) e Paixão e Fortunato (2021). O procedimento incluiu a leitura da malha triangular, a centralização da partícula, o alinhamento segundo os eixos principais de inércia e o ajuste dos coeficientes harmónicos a partir das coordenadas esféricas dos vértices da malha pré-alinhada, procurando minimizar a diferença entre a superfície digitalizada e a superfície reconstruída. A rotina utilizada constitui uma adaptação do procedimento de Paixão e Fortunato (2021), mantendo a formulação radial e a estrutura de cálculo dos índices tridimensionais do trabalho original e introduzindo ajustes no pré-processamento das malhas e nos critérios de validação das reconstruções, descritos nas secções seguintes

Foram avaliadas as ordens harmónicas $N = 5,\ 10,\ 15,\ 20,\ 25$ e 30. O aumento da ordem permite representar detalhes progressivamente mais finos da superfície. Contudo, uma ordem mais elevada também pode introduzir instabilidade ou detalhe numérico sem significado geométrico. Por esse motivo, a ordem utilizada em cada reconstrução foi selecionada com base nos indicadores de qualidade, nomeadamente os desvios de área e volume reconstruídos e o índice de violação da condição *star-shaped*, obtidos durante a validação. A Figura 3-7 exemplifica uma partícula com reentrâncias acentuadas, cuja geometria dificulta o cumprimento da condição *star-shaped* e a obtenção de uma reconstrução fiel por harmónicas esféricas.

A reconstrução por harmónicas esféricas apenas é rigorosa quando a superfície da partícula cumpre a condição *star-shaped* (condição de forma-estrela) em relação ao seu centro: cada semi-reta com origem no centro da partícula deve intersetar a superfície uma única vez. Partículas não convexas, com reentrâncias profundas, podem ser atravessadas mais do que uma vez por uma mesma semi-reta, caso em que a superfície não pode ser descrita de forma unívoca por uma função radial. Nestas situações, a reconstrução tende a suavizar ou a omitir as reentrâncias, afastando-se da geometria real da partícula. O índice de violação quantifica a percentagem de direções de avaliação em que esta condição não foi cumprida, constituindo uma medida direta da aptidão de cada partícula para este tipo de representação. A Figura 3-7 apresenta a reconstrução obtida para uma partícula cuja malha original apresenta reentrâncias que dificultam a sua representação através de uma função radial unívoca.

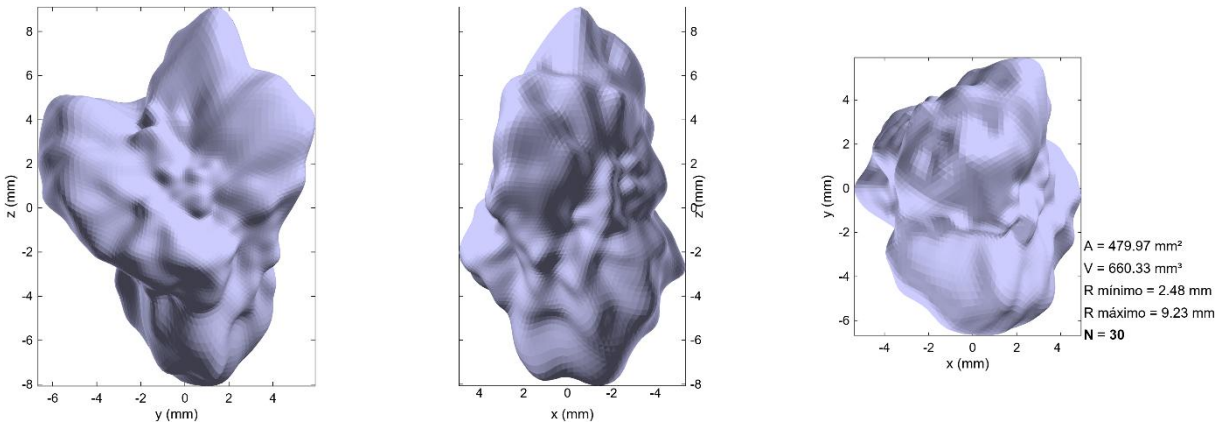


Figura 3-7. Exemplo de uma partícula de ASIC com reentrâncias acentuadas, reconstruída por harmónicas esféricas.

Nestes casos, a reconstrução por harmónicas esféricas pode afastar-se da malha original, pelo que a partícula é excluída das etapas seguintes de análise, de acordo com os critérios de validação apresentados na secção 3.6.1.

A superfície reconstruída foi avaliada numa grelha obtida a partir de uma icosfera, isto é, uma representação da esfera com pontos distribuídos de forma aproximadamente uniforme pela sua superfície. Esta distribuição permitiu avaliar a geometria reconstruída de modo equilibrado em todas as direções, contribuindo para uma análise numérica mais estável.

3.6.1 Critérios de validação das reconstruções

A qualidade de cada reconstrução foi avaliada através da comparação com a malha original da mesma partícula. Esta comparação permitiu verificar se a geometria reconstruída preservava as propriedades globais da partícula e se podia ser utilizada de forma fiável no cálculo dos índices tridimensionais.

A avaliação considerou as razões entre a área superficial e o volume da geometria reconstruída e os valores correspondentes da malha original:

$$Q_A = \frac{A'}{A} \tag{7}$$

$$Q_V = \frac{V'}{V} \tag{8}$$

Nas expressões anteriores, A e V correspondem, respetivamente, à área superficial e ao volume da malha original, enquanto A' e V' representam os valores obtidos para a superfície reconstruída. Valores de Q_A e Q_V próximos de 1 indicam que a reconstrução preserva adequadamente estas propriedades geométricas.

Para cada reconstrução, a rotina em MATLAB registou a ordem harmónica selecionada, as razões de validação Q_A e Q_V, a percentagem de raios negativos e o índice de violação da condição *star-shaped*.

A classificação automática foi atribuída a partir do afastamento das razões Q_A e Q_V em relação à unidade. A reconstrução foi considerada *OK* quando os desvios de Q_A e Q_V foram ambos inferiores a 5%. Quando os dois desvios se mantiveram abaixo de 15%, mas pelo menos um excedeu 5%, a reconstrução foi assinalada como *WARN*. As reconstruções em que pelo menos um dos desvios atingiu ou ultrapassou 15% foram classificadas como *FAIL*.

O estado *CRASH* foi reservado para situações de colapso da reconstrução, identificadas quando Q_A ou Q_V excederam 100. Os casos classificados como *WARN* foram posteriormente revistos individualmente, analisando em conjunto a estabilidade dos rácios Q_A e Q_V, a percentagem de raios negativos, a ordem harmónica selecionada e a concordância visual da geometria reconstruída com a malha original. Este processo de revisão manual destina-se a distinguir os casos em que os desvios moderados resultam de detalhes localizados da superfície, sem relevância para a caracterização global, dos casos em que refletem uma reconstrução efetivamente deficiente. As reconstruções classificadas como *FAIL* ou *CRASH* foram excluídas da análise estatística.

A Figura 3-8 apresenta dois exemplos da avaliação efetuada. No primeiro caso, trata-se de uma partícula compacta e sem reentrâncias acentuadas, para a qual a reconstrução manteve as razões de validação muito próximas da unidade e um índice de violação nulo ou residual; a superfície reconstruída coincide visualmente com a malha original, pelo que a reconstrução é considerada válida (Figura 3-8 a e b). No segundo caso, a partícula apresenta reentrâncias profundas que a tornam fortemente não convexa: a reconstrução não consegue reproduzir estas concavidades, gerando uma superfície mais lisa e com dimensão global superior à da malha original, acompanhada de desvios acentuados nas razões de validação e de raios negativos, pelo que a reconstrução é rejeitada (Figura 3-8 c e d). Esta análise qualitativa permite complementar e fundamentar os indicadores numéricos utilizados no processo de classificação automática, justificando que as reconstruções com esta tipologia de geometria sejam excluídas da caracterização morfológica.

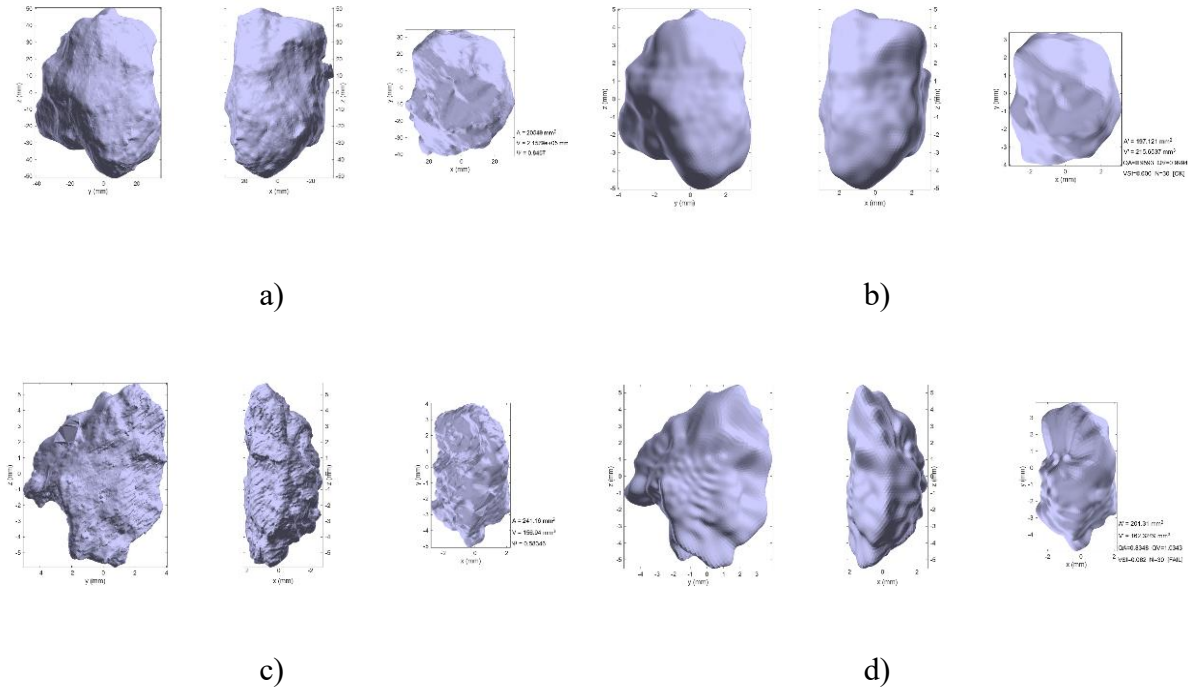


Figura 3-8. Exemplos de avaliação da reconstrução por harmónicos esféricos: a) malha original de uma partícula com reconstrução considerada válida; b) reconstrução por harmónicos esféricos da mesma partícula; c) malha original de uma partícula com reconstrução rejeitada; d) reconstrução por harmónicos esféricos rejeitada

3.6.2 Índices tridimensionais de forma, angularidade e microtextura

Depois de validadas as reconstruções, os coeficientes harmónicos foram normalizados pelo coeficiente de ordem zero, a_{00}, de forma a reduzir a influência da dimensão absoluta das partículas. O coeficiente a_{00} é o termo de ordem zero do desenvolvimento em harmónicas esféricas, que não varia com a direção e corresponde ao raio médio da partícula, isto é, ao valor médio da distância do centro à superfície em todas as direções, pelo que o seu valor cresce linearmente com a dimensão da partícula. Ao dividir todos os coeficientes por a_{00}, obtém-se uma descrição adimensional da geometria, na qual a informação de escala fica isolada neste único parâmetro. Esta opção permitiu comparar partículas de dimensões diferentes, centrando a análise nas diferenças de geometria, e isolou a escala para reintrodução posterior na geração de partículas virtuais.

Os coeficientes foram depois agrupados de acordo com a ordem harmónica a que pertencem. As ordens mais baixas estão sobretudo relacionadas com a forma global da partícula, enquanto as ordens intermédias refletem variações mais acentuadas da superfície, associadas à angularidade. As ordens mais elevadas permitem captar irregularidades de menor escala, relacionadas com a microtextura. Este agrupamento e a associação de cada banda de ordens a um índice tridimensional seguem a abordagem aplicada por Kutay et al. (2010, 2011) e por Paixão e Fortunato (2021), nos quais a energia geométrica contida em cada gama de ordens harmónicas é utilizada como medida dos três escalões da morfologia. A delimitação das gamas de ordem adotada (1 a 4, 5 a 25 e superiores a 25) acompanha igualmente os referidos trabalhos, refletindo a separação convencional entre as escalas geométrica, angular e textural.

O índice tridimensional de forma, FI_{3DN}, foi calculado a partir das ordens entre 1 e 4:

$$FI_{3DN} = \frac{\sum_{l=1}^{4} \sum_{m=-l}^{l} | a_{lm} |}{| a_{00} |} \tag{9}$$

O índice tridimensional de angularidade, AI_{3DN} , reuniu os coeficientes das ordens entre 5 e 25:

$$AI_{3DN} = \frac{\sum_{l=5}^{25} \sum_{m=-l}^{l} | a_{lm} |}{| a_{00} |} \tag{10}$$

Por fim, o índice tridimensional de microtextura, MT_{3DN}, foi obtido a partir das ordens superiores, entre 26 e a ordem máxima considerada:

$$MT_{3DN} = \frac{\sum_{l=26}^{N_{\max}} \sum_{m=-l}^{l} | a_{lm} |}{| a_{00} |} \tag{11}$$

Estes índices complementam os parâmetros convencionais de esfericidade, alongamento e achatamento. Enquanto esses parâmetros descrevem a forma da partícula a partir das suas dimensões principais, a análise por harmónicas esféricas permite distinguir a contribuição da forma global, das arestas e das irregularidades superficiais. Na interpretação dos valores, índices de forma próximos da unidade indicam geometrias globais semelhantes à esfera de referência, enquanto valores crescentes de angularidade e de microtextura traduzem arestas mais pronunciadas e superfícies mais rugosas à escala microscópica, respetivamente. A comparação de valores deve ser feita dentro do mesmo conjunto de partículas e com a mesma ordem harmónica máxima, dado que os índices dependem destas escolhas de processamento. Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4.

3.7 GERAÇÃO DE PARTÍCULAS VIRTUAIS

A representação matemática por harmónicas esféricas permitiu não só avaliar as partículas reais, como também criar uma base de dados para a geração de partículas virtuais. O objetivo desta etapa não foi o de produzir cópias exatas das malhas digitalizadas, mas sim o de gerar novas geometrias que partilhassem a variabilidade morfológica observada em cada fração do material.

As partículas virtuais podem ser integradas em modelos numéricos, como o Método dos Elementos Discretos (DEM), garantindo que as simulações refletem a verdadeira complexidade e irregularidade geométrica do ASIC, sem estarem limitadas ao número restrito de partículas efetivamente digitalizadas.

3.7.1 Normalização e organização dos coeficientes harmónicos

A geração de partículas virtuais baseou-se nos coeficientes harmónicos das partículas reais cujas reconstruções foram consideradas válidas. Os coeficientes foram organizados numa matriz de dados, em que cada linha correspondeu a uma partícula e cada coluna a um coeficiente harmónico.

Como referido anteriormente, antes da análise, os coeficientes foram normalizados para reduzir a influência da dimensão absoluta das partículas. O coeficiente a_{00}, que contém a informação de escala, foi mantido separadamente, para poder ser reintroduzido após a geração das novas geometrias.

Como a matriz incluía um número elevado de coeficientes, aplicou-se uma Análise de Componentes Principais, PCA (Jolliffe, 2002). A PCA é uma técnica estatística multivariada que transforma um conjunto de variáveis originalmente correlacionadas num novo conjunto de variáveis não correlacionadas, as componentes principais, ordenadas de forma decrescente de acordo com a variância dos dados que explicam. As primeiras componentes concentram a maior parte da variabilidade observada, pelo que a retenção de um número reduzido de componentes permite simplificar a descrição dos dados com perda de informação mínima. No presente caso, a técnica permitiu representar a informação contida nos coeficientes harmónicos através de um número mais reduzido de componentes principais, organizadas de acordo com a variabilidade observada entre as partículas, passando cada partícula a ser descrita pelos seus *scores* nas componentes retidas.

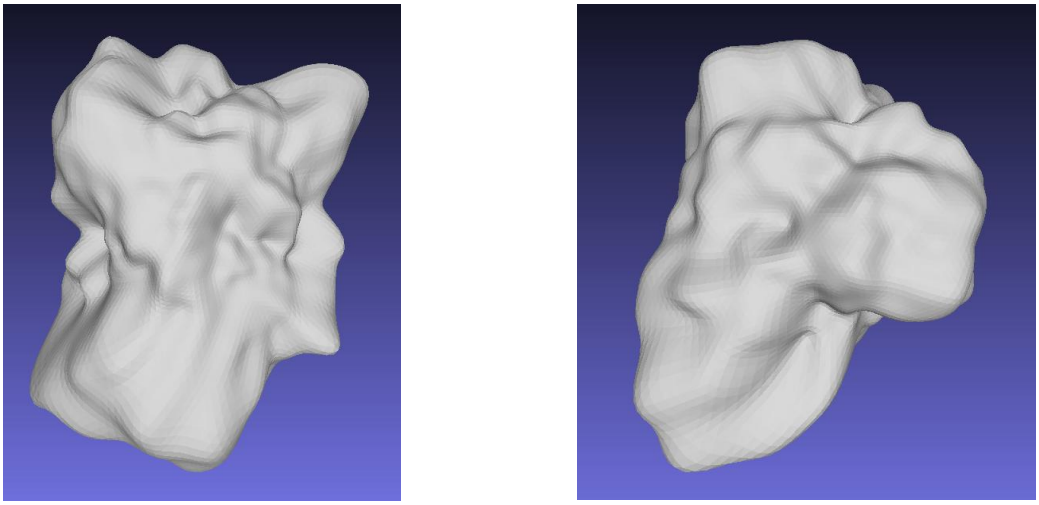
A PCA foi aplicada à matriz centrada dos 960 coeficientes normalizados, correspondentes às ordens harmónicas de 1 a 30, através da decomposição em valores singulares. Foram retidas as componentes necessárias para acumular, no mínimo, 95% da variância total dos coeficientes: 27 componentes principais para a fração de 8 mm e 28 componentes para a fração de 12 mm, correspondendo respetivamente a 95,3% e 95,3% de variância explicada.

3.7.2 Geração de vetores de *scores* e reconversão em coeficientes

Os *scores* obtidos pela PCA descrevem a posição de cada partícula real no espaço das componentes principais retidas. A geração de novos vetores de *scores* foi realizada por amostragem aleatória componente a componente, a partir de distribuições normais com desvios-padrão iguais aos observados nas componentes das partículas reais, limitada aos valores mínimo e máximo registados em cada componente, de modo a manter as combinações dentro do espaço morfológico amostrado. A aceitação de cada combinação foi ainda condicionada pela distância de Mahalanobis, calculada nas três primeiras componentes e ponderada pela covariância dos *scores* reais: foram rejeitadas as combinações com distância superior a 6,25, com um limite de 1000 tentativas por partícula. Foram assim geradas vinte partículas virtuais para cada fração. O coeficiente a_{00}, que contém a informação de escala, foi atribuído a cada partícula virtual por sorteio entre os valores das partículas reais da respetiva fração, permitindo recuperar dimensões compatíveis com a fração granulométrica em causa. Os vetores gerados foram reconvertidos em coeficientes harmónicos normalizados e, após a reintrodução de a_{00}, utilizados para reconstruir as superfícies tridimensionais, que foram exportadas como malhas PLY.

Os vetores gerados foram reconvertidos em coeficientes harmónicos normalizados. Em seguida, foi reintroduzido o coeficiente a_{00} separado na fase anterior, permitindo recuperar geometrias com dimensões compatíveis com a fração granulométrica que se pretendia representar. Os coeficientes completos foram então utilizados para reconstruir as superfícies tridimensionais, que foram exportadas como malhas PLY.

A Figura 3-9 apresenta alguns exemplos das geometrias virtuais obtidas através deste procedimento. As partículas representadas resultam da geração de novos vetores no espaço das componentes principais e não correspondem a cópias diretas das partículas digitalizadas.



a) b)

Figura 3-9. Exemplos de partículas virtuais geradas a partir dos coeficientes de harmónicas esféricas: a) partículas da fração de 8 mm; b) partículas da fração de 12 mm.

As malhas geradas foram depois submetidas a controlo de qualidade geométrico, descrito na secção seguinte, antes de serem incluídas na avaliação morfológica.

3.7.3 Reconstrução geométrica e controlo de qualidade

Após a reconstrução, cada geometria virtual foi submetida a um controlo de qualidade antes de ser incluída na análise. Esta verificação incidiu sobre a continuidade da superfície, a existência de raios positivos e a ausência de anomalias geométricas que pudessem comprometer a utilização da malha. O controlo de qualidade foi realizado através da avaliação do raio reconstruído numa grelha esférica de pontos distribuídos de forma aproximadamente uniforme (icosfera com cinco subdivisões), à semelhança do procedimento de validação descrito na secção 3.6. As geometrias que apresentaram raios não positivos ou valores não finitos em qualquer direção não foram exportadas nem consideradas na análise subsequente.

As partículas que cumpriram estes critérios foram caracterizadas pelos mesmos parâmetros aplicados às partículas reais. Foram determinados a área superficial, o volume, as dimensões principais L, I e S, o diâmetro equivalente, a esfericidade, o alongamento, o achatamento e a classificação no diagrama de Zingg. Foram ainda calculados os índices tridimensionais de forma, angularidade e microtextura, FI_{3DN}, AI_{3DN} e MT_{3DN}.

A avaliação não procurou associar cada partícula virtual a uma partícula real específica. O objetivo foi verificar se, no seu conjunto, as geometrias geradas reproduziam a variabilidade morfológica observada nas partículas reais de cada fração granulométrica. A comparação entre os dois conjuntos é apresentada no Capítulo 4.

3.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Após a obtenção dos parâmetros morfológicos convencionais e dos índices tridimensionais derivados das harmónicas esféricas, os resultados foram organizados de acordo com a fração granulométrica nominal das partículas de ASIC, correspondente a 8 mm e 12 mm. Apenas foram incluídas na análise as partículas reais e virtuais que cumpriram os critérios de validação definidos nas secções anteriores.

Para cada parâmetro foram determinados o número de partículas válidas, a média, a mediana, os valores mínimo e máximo, o desvio-padrão e o coeficiente de variação. Estes indicadores permitiram caracterizar não só a tendência central de cada conjunto, mas também a dispersão dos resultados e a amplitude da variabilidade morfológica observada.

A análise incidiu sobre os parâmetros dimensionais, a esfericidade, o alongamento, o achatamento, a classificação pelo diagrama de Zingg e os índices tridimensionais de forma, angularidade e microtextura. As partículas virtuais foram avaliadas através dos mesmos parâmetros, permitindo comparar a sua distribuição morfológica com a das partículas reais que serviram de base à geração.

Os resultados foram apresentados através de tabelas, boxplots, curvas de frequência acumulada e diagramas de Zingg. Estas representações permitem observar a distribuição dos valores, identificar eventuais valores extremos e comparar as frações granulométricas sem limitar a interpretação aos valores médios. A apresentação e discussão dos resultados são realizadas no Capítulo 4.

3.9 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo descreveu o procedimento adotado para a caracterização morfológica tridimensional das partículas de ASIC e para a geração de partículas virtuais com base na informação geométrica obtida.

O procedimento incluiu a preparação e digitalização das partículas, o pós-processamento e a validação das malhas, a caracterização morfológica convencional e a representação por harmónicas esféricas. A partir das malhas validadas foram determinados parâmetros dimensionais, parâmetros de forma e índices tridimensionais associados à forma global, angularidade e microtextura superficial.

Foram também definidos os procedimentos para a geração de partículas virtuais, através da normalização dos coeficientes harmónicos, da redução de dimensionalidade por PCA e da reconstrução de novas geometrias tridimensionais. As partículas geradas foram submetidas a controlo de qualidade e avaliadas pelos mesmos critérios aplicados às partículas reais.

Por fim, foi estabelecido o tratamento estatístico utilizado para comparar as frações de 8 mm e 12 mm e para avaliar a compatibilidade morfológica entre os conjuntos de partículas reais e virtuais. Os resultados obtidos através desta metodologia são apresentados no Capítulo 4.

4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO ASIC

4.1 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA CONVENCIONAL

A caracterização morfológica convencional permitiu comparar as partículas de ASIC das frações granulométricas nominais de 8 mm e 12 mm a partir das suas dimensões principais e dos parâmetros de forma. Após a aplicação dos critérios de validação, foram consideradas 45 partículas na fração de 8 mm e 46 partículas na fração de 12 mm.

4.1.1 Parâmetros dimensionais e de forma

Para facilitar a leitura dos resultados, as dimensões L_{corr}, I_{corr} e S_{corr} correspondem, respetivamente, ao comprimento máximo, à dimensão intermédia e à menor dimensão de cada partícula, após a correção de escala descrita em 3.5.1. O parâmetro $D_{eq,corr}$ corresponde ao diâmetro de uma esfera com o mesmo volume da partícula analisada.

A Tabela 4-1 apresenta a estatística descritiva dos parâmetros dimensionais e de forma obtidos para as frações granulométricas nominais de 8 mm e 12 mm. Para cada parâmetro são indicados o número de partículas válidas, a média, a mediana, os valores mínimo e máximo, o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 4-1. Estatística descritiva dos parâmetros morfológicos das partículas ASIC de 8 mm e 12 mm

	Média		**Mediana**		**Mínimo**		**Máximo**		**Desvio-padrão**		**CV (%)**	
Parâmetro	8mm	12mm	8mm	12mm	8mm	12mm	8mm	12mm	8mm	12mm	8mm	12mm
L_{corr}	8.97	14.43	9.17	13.82	6.57	10.95	12.43	25.85	1.46	2.60	16.32	17.99
I_{corr}	7.35	11.20	7.26	11.23	5.12	9.15	11.70	13.77	1.41	0.99	19.14	8.81
S_{corr}	5.51	9.05	5.26	9.21	2.81	6.87	8.53	11.25	1.38	1.07	25.15	11.84
$D_{eq,corr}$	5.81	9.27	5.60	9.09	4.10	7.79	8.10	11.90	1.06	0.89	18.22	9.62
Ψ	0.72	0.72	0.72	0.72	0.60	0.62	0.85	0.81	0.07	0.04	9.62	5.97
q	0.82	0.79	0.82	0.79	0.60	0.45	0.99	0.97	0.09	0.10	10.87	12.96
p	0.75	0.81	0.78	0.82	0.40	0.60	0.97	0.97	0.14	0.10	18.14	11.74
FI_{3DN}	1.00	0.96	1.02	0.91	0.48	0.62	2.21	1.40	0.30	0.18	29.75	19.28
AI_{3DN}	1.58	1.46	1.59	1.46	0.88	1.08	3.21	1.97	0.44	0.20	27.53	13.93
MT_{3DN}	0.12	0.11	0.11	0.10	0.05	0.07	0.26	0.15	0.04	0.02	37.12	18.27

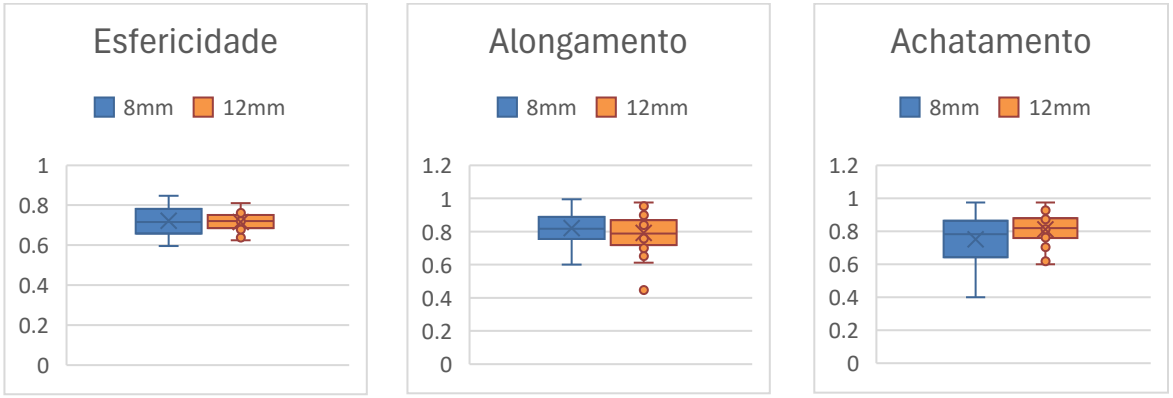
Os parâmetros dimensionais permitem distinguir claramente os dois conjuntos. Como seria expectável, os valores médios de L_{corr}, I_{corr}, S_{corr} e $D_{eq,corr}$ são superiores na fração nominal de 12 mm, que corresponde a partículas de maior dimensão característica. O valor médio de L_{corr} aumentou de 8.97 mm para 14.43 mm, I_{corr} passou de 7.35 mm para 11.20 mm e S_{corr} de 5.51 mm para 9.05 mm. O diâmetro equivalente corrigido apresentou valores médios de 5.81 mm e 9.27 mm nas frações de 8 mm e 12 mm, respetivamente.

Apesar da diferença entre os valores médios, os intervalos de variação das duas frações apresentam alguma sobreposição. Esta situação é compatível com o facto de as designações 8 mm e 12 mm corresponderem a frações granulométricas nominais e não a dimensões fixas de todas as partículas incluídas em cada conjunto.

As diferenças nos parâmetros de forma são menos marcadas. A esfericidade média foi de 0.72 nas duas frações, indicando que a forma global média das partículas é semelhante. O alongamento médio foi ligeiramente superior na fração de 8 mm, com 0.82, face a 0.79 na fração de 12 mm, enquanto o achatamento médio foi superior na fração maior, com 0.81, face à menor que apresentou um valor médio de 0.75.

A diferença mais evidente surge na dispersão do achatamento. O coeficiente de variação foi de 18.14% na fração de 8 mm e de 11.74% na de 12 mm, indicando maior heterogeneidade deste parâmetro no conjunto de partículas mais pequenas.

Para complementar a leitura da Tabela 4-1, a Figura 4-1 apresenta os gráficos boxplots de esfericidade, alongamento e achatamento. Esta representação permite observar a posição da mediana, a amplitude interquartil, a dispersão dos resultados e a presença de alguns valores extremos.

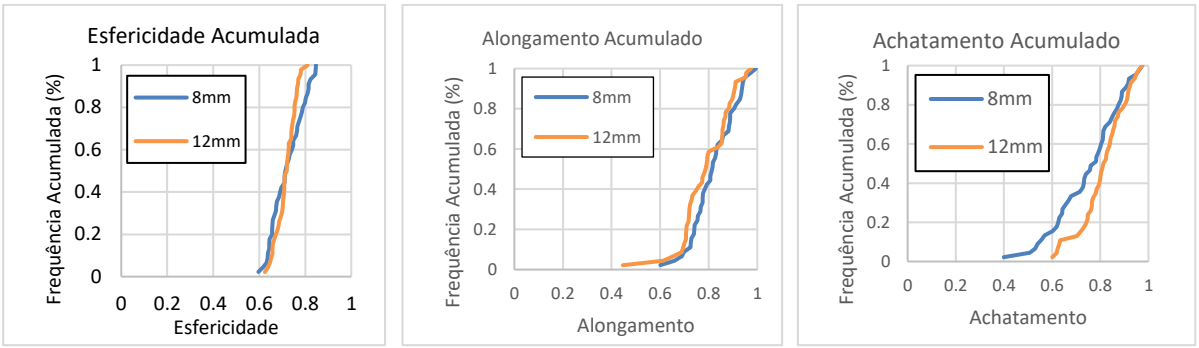


a) b) c)

Figura 4-1. Gráficos boxplots de esfericidade, alongamento e achatamento das partículas de ASIC das frações de 8 mm e 12 mm.

Os gráficos boxplots confirmam a proximidade das distribuições de esfericidade e alongamento nas duas frações. A diferença mais visível ocorre no achatamento, cuja distribuição é mais dispersa na fração de 8 mm. Esta observação está de acordo com o coeficiente de variação mais elevado obtido para esta fração.

A Figura 4-2 apresenta as curvas de frequência acumulada dos mesmos parâmetros. Enquanto os gráficos boxplots resumem a distribuição dos dados, as curvas acumuladas permitem observar a posição relativa de cada fração ao longo de toda a gama de valores.



a) b) c)

Figura 4-2. Curvas de distribuição acumulada dos parâmetros de forma das partículas de ASIC de 8 mm e 12 mm.

As curvas de esfericidade mostram uma sobreposição acentuada entre as duas frações, reforçando a semelhança dos valores médios observados na Tabela 4-1. No alongamento, as distribuições também são próximas, embora a fração de 8 mm apresente uma ligeira tendência para valores superiores.

A diferença é mais percetível no achatamento. A fração de 8 mm apresenta uma distribuição mais alargada e uma maior presença de valores baixos, evidenciando a existência de mais partículas com tendência achatada. Esta tendência será complementada na secção seguinte, pela classificação das partículas no diagrama de Zingg.

4.1.2 Classificação morfológica pelo diagrama de Zingg

A distribuição das partículas pelas classes morfológicas indicadas na secção 3.5.3 é apresentada na Tabela 4-2. Esta tabela permite quantificar a informação observada no diagrama de Zingg e distinguir as tendências dominantes em cada fração.

Tabela 4-2. Distribuição das partículas de ASIC de 8 mm e 12 mm por classe morfológica

	8mm		**12mm**	
	Nº	**%**	**Nº**	**%**
Equidimensionais	30	67%	38	83%
Alongadas	2	4%	3	7%
Achatadas	13	29%	5	11%
Lamelares	0	0%	0	0%

As partículas equidimensionais predominam nas duas frações, embora sejam mais representativas no conjunto de 12 mm, onde correspondem a 83% das partículas analisadas. Na fração de 8 mm, esta classe representa 67% do total. A principal diferença surge na percentagem de partículas achatadas, que é de 29% na fração de 8 mm e de 11% na fração de 12 mm. As classes alongada e lamelar têm uma expressão reduzida ou inexistente nos dois conjuntos.

A Figura 4-3 apresenta a posição individual das partículas no diagrama de Zingg modificado. Para além das classes principais, a figura inclui as linhas de fator de forma F e as curvas de equidimensionalidade S/L, seguindo a representação utilizada por Paixão e Fortunato (2021). As linhas de fator de forma F representam lugares geométricos de valor constante de um fator de forma definido a partir das razões entre as dimensões principais da partícula, funcionando como referência visual do grau de equidimensionalidade: os pontos situados junto às linhas de valor mais elevado correspondem a partículas com as três dimensões semelhantes, enquanto o deslocamento para linhas de valor inferior traduz formas progressivamente menos equidimensionais, nomeadamente partículas mais achatadas ou mais alongadas.

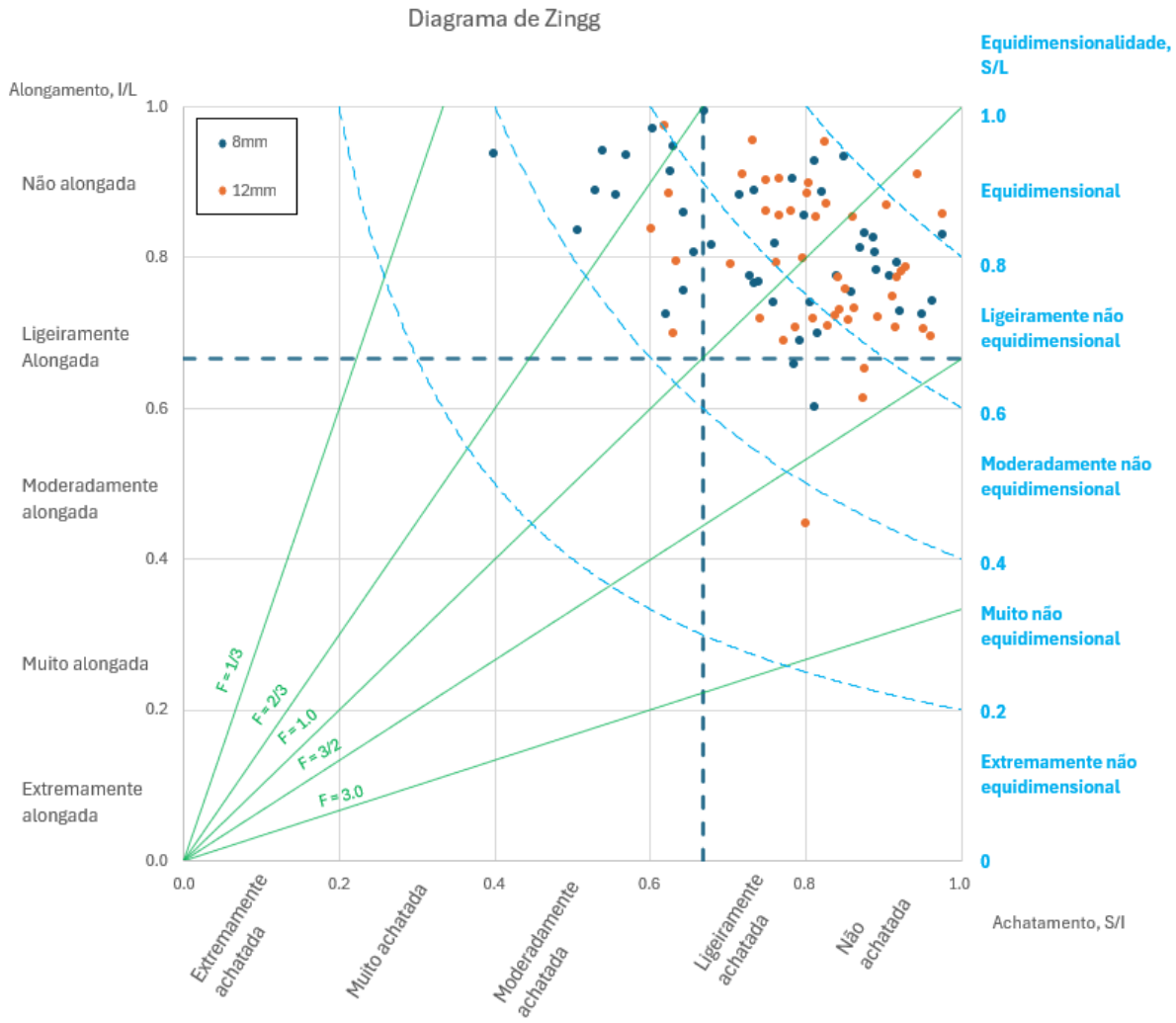


Figura 4-3. Diagrama de Zingg das partículas de ASIC das frações de 8 mm e 12 mm

A maior parte dos pontos das duas frações encontra-se na zona correspondente a partículas pouco achatadas e pouco alongadas. No entanto, a fração de 12 mm ocupa uma região mais concentrada do diagrama, enquanto os pontos da fração de 8 mm se distribuem por uma área mais ampla, sobretudo em direção a valores mais baixos de S/I. Esta diferença mostra que a maior variabilidade da fração de 8 mm está associada principalmente ao achatamento e não a uma tendência generalizada para o alongamento.

As curvas de S/L mostram que a maior parte das partículas mantém uma relação relativamente equilibrada entre a menor e a maior dimensão, concentrando-se sobretudo entre os valores de 0.6 e 0.8. Os casos com menor equidimensionalidade são pontuais, mas surgem com maior dispersão na fração de 8 mm. A leitura das linhas de F conduz à mesma conclusão: os desvios mais visíveis em relação à região central do diagrama resultam sobretudo de partículas mais achatadas.

O diagrama não revela uma separação completa entre as duas frações, mas confirma que o conjunto de 8 mm é geometricamente mais heterogéneo. A análise seguinte permite verificar se essa maior dispersão também se manifesta nos índices tridimensionais associados à angularidade e à microtextura.

4.2 CARACTERIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL POR HARMÓNICAS ESFÉRICAS

A caracterização tridimensional permitiu complementar a análise convencional, avaliando aspetos da geometria das partículas que não são totalmente descritos pelas dimensões principais. Nesta secção são apresentados, primeiro, os resultados da validação das reconstruções e, posteriormente, os índices associados à forma global, angularidade e, microtextura.

4.2.1 Índices tridimensionais de forma, angularidade e microtextura

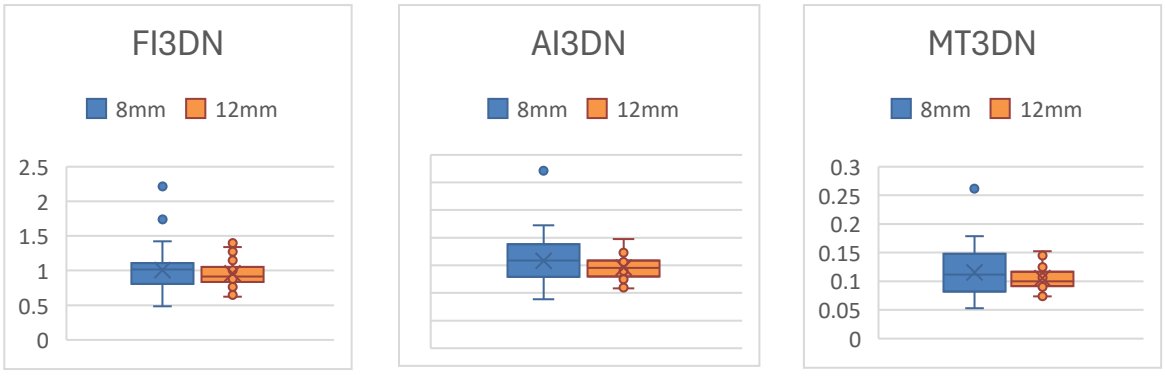
A análise por harmónicas esféricas incidiu apenas sobre as partículas cujas reconstruções foram consideradas válidas. Os índices tridimensionais FI_{3DN}, AI_{3DN} e MT_{3DN}, apresentados na parte final da Figura 4-1, permitem complementar a caracterização convencional, distinguindo a forma global das variações associadas à angularidade e à microtextura.

Os valores médios de FI_{3DN} são próximos nas duas frações, correspondendo a 1.00 para as partículas de 8 mm e a 0.96 para as partículas de 12 mm. O mesmo se verifica nos índices de angularidade e microtextura: AI_{3DN} apresenta valores médios de 1.58 e 1.46, enquanto MT_{3DN} apresenta médias de 0.12 e 0.11, respetivamente.

As médias, por si só, não mostram uma separação marcada entre os dois conjuntos. A diferença torna-se mais clara quando se observa a dispersão. Os coeficientes de variação de FI_{3DN}, AI_{3DN} e MT_{3DN} são mais elevados na fração de 8 mm, com valores de 29.75%, 27.53% e, 37.12%. Na fração de 12 mm, os valores correspondentes são de 19.28%, 13.93% e, 18.27%.

Para ilustrar o impacto dos índices de forma na caracterização da morfologia, considere-se o contraste entre partículas com valores de índices diferentes dentro da mesma fração. Na fração de 8 mm, os valores de AI3DN variam entre 0.88 e 3.21 e os de MT3DN entre 0.05 e 0.26, ou seja, a partícula mais angular da amostra regista uma angularidade cerca de três vezes superior à da menos angular, e a microtextura mais rugosa atinge cerca de cinco vezes o valor da menos rugosa. Duas partículas com esfericidade semelhante podem, assim, apresentar arestas e superfícies muito distintas: a partícula com AI3DN e MT3DN elevados tende a gerar contactos intergranulares mais estáveis e maior resistência ao corte, enquanto a de valores baixos apresenta contornos mais suaves e menor capacidade de intertravamento. Estes contrastes não são detetados pelos parâmetros convencionais quando a esfericidade média é idêntica, o que evidencia o valor acrescido da caracterização por harmónicas esféricas.

A Figura 4-4 apresenta os gráficos boxplots dos três índices, permitindo visualizar esta diferença de dispersão entre as frações.

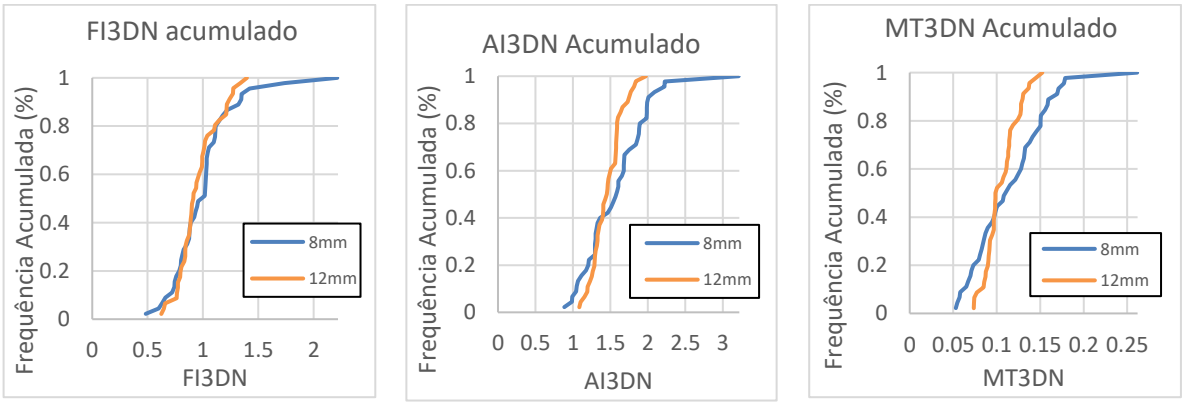


a) b) c)

Figura 4-4. Gráficos boxplots dos índices tridimensionais FI3DN, AI3DN e MT3DN das partículas de ASIC das frações de 8 mm e 12 mm.

Os gráficos boxplots mostram uma sobreposição considerável dos valores de FI_{3DN}, o que está de acordo com a proximidade observada nas médias. Em AI_{3DN} e MT_{3DN}, a fração de 8 mm apresenta uma distribuição mais alargada. A diferença entre os conjuntos está, portanto, menos relacionada com a forma global média e mais com a diversidade das arestas e das irregularidades superficiais.

A Figura 4-5 apresenta as curvas de frequência acumulada dos mesmos índices. Estas curvas permitem confirmar se a maior dispersão observada nos gráficos boxplots resulta apenas de alguns valores extremos ou se se mantém ao longo da distribuição.



a) b) c)

Figura 4-5. Curvas de distribuição acumulada dos índices tridimensionais FI3DN, AI3DN e MT3DN das partículas de ASIC de 8 mm e 12 mm

As curvas de FI_{3DN} permanecem próximas, embora a fração de 8 mm cubra uma gama de valores mais ampla. Para AI_{3DN} e MT_{3DN}, a diferença de dispersão mantém-se ao longo da distribuição, confirmando que a fração de 8 mm apresenta maior variabilidade na angularidade e na microtextura.

4.2.2 Comparação entre frações

A aplicação de índices tridimensionais permitiu captar diferenças morfológicas entre frações que a caracterização convencional não distinguia isoladamente de forma tão nítida.

Os resultados confirmam a tendência identificada na caracterização inicial: a fração de 8 mm exibe maior variabilidade morfológica, sendo esta expressa não apenas no achatamento (já detetado), mas sobretudo na angularidade e microtextura.

Estas evidências sugerem que as partículas de ASIC menores apresentam maior heterogeneidade na complexidade da superfície.

4.3 GERAÇÃO E AVALIAÇÃO DE PARTÍCULAS VIRTUAIS

4.3.1 Partículas virtuais geradas

A geração de partículas virtuais foi realizada separadamente para as frações de 8 mm e 12 mm, seguindo o procedimento descrito no capítulo anterior. O objetivo desta etapa consistiu em obter novas geometrias tridimensionais a partir da variabilidade morfológica observada nas partículas reais, sem reproduzir diretamente as malhas digitalizadas.

Foram geradas vinte partículas virtuais para cada fração, designadas por V8 e V12. De forma geral, as geometrias obtidas apresentam dimensões e características de forma compatíveis com as partículas reais de cada conjunto. Contudo, observaram-se também algumas partículas com configurações menos representativas, sobretudo associadas a formas mais lamelares ou a proporções entre as dimensões principais pouco frequentes nas amostras reais.

A Figura 4-6 apresenta exemplos dessas partículas. A sua inclusão permite evidenciar que, embora o procedimento tenha sido capaz de gerar geometrias tridimensionais coerentes em muitos casos, a combinação dos parâmetros utilizados pode ainda originar formas que se afastam da morfologia mais comum do ASIC analisado.

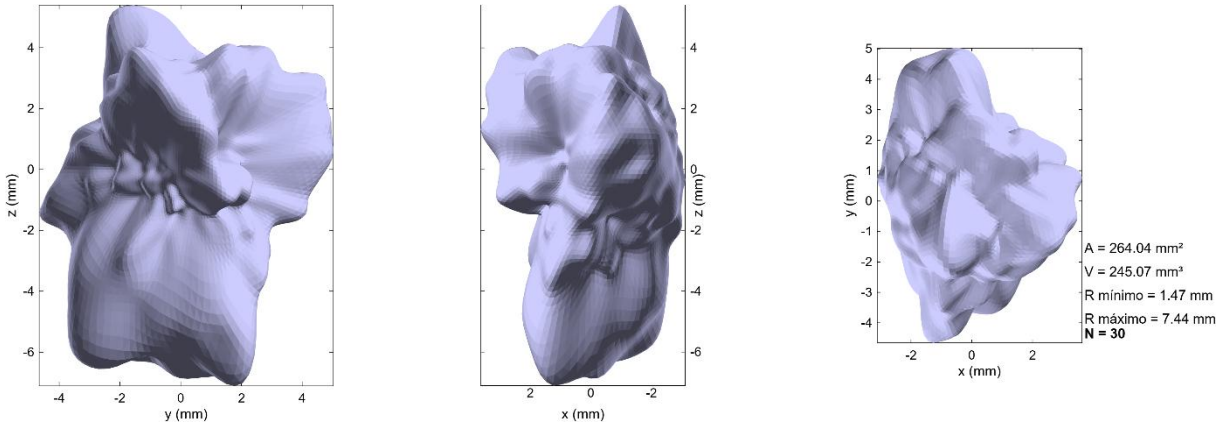


Figura 4-6. Exemplos de partículas virtuais com geometrias menos representativas das partículas reais de ASIC.

Estas ocorrências não invalidam a aplicação desenvolvida, mas mostram que a geração de partículas virtuais deve ser entendida como uma primeira aproximação. O procedimento permitiu explorar a utilização das harmónicas esféricas na criação de novas geometrias de ASIC e identificar aspetos que deverão ser melhorados numa fase posterior.

4.3.2 Comparação entre partículas reais e virtuais

A Tabela 4-3 apresenta os parâmetros morfológicos médios das partículas reais e virtuais das duas frações analisadas. Os resultados permitem avaliar até que ponto as partículas geradas preservam as principais características geométricas das amostras de referência.

Tabela 4-3. Comparação entre os parâmetros morfológicos das partículas reais e virtuais de ASIC. Valores apresentados como média ± desvio-padrão.

Parâmetro	8 mm	V8	12 mm	V12
L_{corr}	8.86 ± 1.46	9.03 ± 0.99	14.32 ± 2.67	13.38 ± 1.80
I_{corr}	7.36 ± 1.45	7.19 ± 0.65	11.13 ± 0.93	10.41 ± 0.74
S_{corr}	5.35 ± 1.34	5.43 ± 0.97	9.01 ± 1.01	7.83 ± 1.01
$D_{eq,corr}$	5.74 ± 1.07	6.19 ± 0.72	9.19 ± 0.88	2.46 ± 0.11
Ψ	0.72 ± 0.07	0.84 ± 0.04	0.72 ± 0.04	0.86 ± 0.03
q	0.83 ± 0.09	0.80 ± 0.04	0.79 ± 0.10	0.79 ± 0.08
p	0.73 ± 0.13	0.75 ± 0.12	0.81 ± 0.09	0.75 ± 0.11
FI_{3DN}	1.02 ± 0.31	0.90 ± 0.08	0.97 ± 0.18	0.91 ± 0.16
AI_{3DN}	1.62 ± 0.43	1.26 ± 0.11	1.47 ± 0.21	1.23 ± 0.15
MT_{3DN}	0.12 ± 0.04	0.09 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.09 ± 0.01

Na fração de 8 mm, as partículas virtuais apresentam valores médios próximos dos observados nas partículas reais. A dimensão principal L_{corr} aumenta ligeiramente, de 8.86 mm para 9.03 mm, enquanto I_{corr} apresenta uma pequena redução. O valor médio de S_{corr} mantém-se praticamente inalterado. O diâmetro equivalente aumenta de 5.74 mm nas partículas reais para 6.19 mm nas partículas virtuais.

Na fração de 12 mm, as partículas virtuais apresentam valores médios inferiores para as três dimensões principais. A diferença é mais evidente em S_{corr}, que diminui de 9.01 mm para 7.83 mm. O valor de $D_{eq,corr}$ obtido para V12 é também substancialmente inferior ao das partículas reais, devendo por isso ser interpretado com reserva quando analisado isoladamente. "Este valor deverá ser confirmado em iterações futuras da rotina de geração. Com efeito, um diâmetro equivalente próximo de 2,5 mm é compatível com geometrias reconstruídas na escala unitária dos coeficientes normalizados, cujo raio médio é a unidade, o que sugeriria que a reintrodução do coeficiente de escala a00 não teve o efeito pretendido nesta fração; a baixa dispersão registada (desvio-padrão de 0,11 mm) é consistente com esta interpretação, uma vez que elimina a variabilidade de escala entre partículas. A confirmação exige a revisão da rotina de reconversão aplicada à fração de 12 mm.

A diferença mais consistente entre os conjuntos verifica-se na esfericidade. Em ambas as frações, as partículas virtuais apresentam valores médios superiores aos das partículas reais. Na fração de 8 mm, a esfericidade aumenta de 0.72 para 0.84 e, na fração de 12 mm, passa de 0.72 para 0.86. Este resultado indica que o procedimento de geração tende a produzir partículas globalmente mais regulares do que as partículas reais digitalizadas.

Os parâmetros de alongamento e achatamento mantêm, em geral, valores próximos. Na fração de 8 mm, as partículas virtuais apresentam um alongamento médio ligeiramente superior, enquanto o achatamento permanece semelhante. Na fração de 12 mm, o alongamento médio mantém-se praticamente constante, mas o achatamento diminui de 0.81 para 0.75.

Os índices tridimensionais apresentam valores inferiores nas partículas virtuais de ambas as frações. Esta tendência é particularmente visível nos índices de forma e angularidade, FI_{3DN} e AI_{3DN}. A microtextura, representada por MT_{3DN}, também diminui ligeiramente nas partículas virtuais. Estes resultados sugerem que, apesar de preservarem a geometria global das partículas reais, as geometrias virtuais tendem a apresentar superfícies e contornos menos irregulares.

De notar que os critérios de aceitação adotados na geração, nomeadamente a limitação dos *scores* às gamas observadas nas partículas reais e a rejeição de combinações com distância de Mahalanobis elevada, excluem tendencialmente as configurações mais extremas, o que é compatível com a maior regularidade observada nas geometrias virtuais.

4.3.3 Distribuição das classes de forma

A comparação dos valores médios não permite, por si só, avaliar integralmente a representatividade das partículas virtuais. Por esse motivo, foi também analisada a distribuição das partículas pelas classes de forma do diagrama de Zingg.

Tabela 4-4. Distribuição das partículas reais e virtuais pelas classes de forma de Zingg.

Número de partículas				
	8mm	**V8**	**12mm**	**V12**
Equidimensionais	30	15	38	14
Alongadas	2	1	3	0
Achatadas	13	1	5	3
Lamelares	0	3	0	3

Percentagem				
	8mm	**V8**	**12mm**	**V12**
Equidimensionais	67%	75%	83%	70%
Alongadas	4%	5%	7%	0%
Achatadas	29%	5%	11%	15%
Lamelares	0%	15%	0%	15%

Nas duas frações, as partículas equidimensionais continuam a constituir a classe predominante nas amostras virtuais. Na fração de 8 mm, a sua proporção aumenta de 67% para 75%. Na fração de 12 mm, embora se mantenham maioritárias, as partículas equidimensionais diminuem de 83% para 70%.

A principal diferença verifica-se na ocorrência de partículas lamelares. Esta classe não está presente nas partículas reais de nenhuma das frações, mas representa 15% das partículas virtuais de V8 e de V12. A presença destas partículas está de acordo com os exemplos apresentados na Figura 4-6 e mostra que algumas geometrias geradas se afastam da distribuição de formas observada no ASIC real.

Na fração de 8 mm, verifica-se ainda uma redução expressiva da proporção de partículas achatadas, que passa de 29% nas partículas reais para 5% nas partículas virtuais. Na fração de 12 mm, a proporção de partículas achatadas aumenta ligeiramente, de 11% para 15%, mas continua a observar-se a formação de partículas lamelares que não existiam na amostra de referência.

4.3.4 Avaliação da representatividade morfológica

Os resultados obtidos mostram que o procedimento desenvolvido permitiu gerar partículas virtuais com várias características próximas das observadas nas partículas reais. As dimensões principais, os parâmetros de alongamento e achatamento e os índices tridimensionais mantêm tendências globais semelhantes, sobretudo na fração de 8 mm. A abordagem demonstra, assim, que é possível utilizar os coeficientes de harmónicas esféricas para gerar novas geometrias tridimensionais de ASIC a partir da informação recolhida durante a digitalização.

No entanto, as diferenças observadas na esfericidade, nos índices tridimensionais e na distribuição das classes de Zingg mostram que as partículas virtuais ainda não reproduzem completamente a variabilidade morfológica do material real. A ocorrência de partículas lamelares, ausentes nas duas amostras reais, evidencia que algumas combinações geradas conduzem a geometrias pouco representativas.

Apesar do esforço de desenvolvimento realizado, não foi possível aprofundar esta fase dentro do tempo disponível para o presente trabalho. O desenvolvimento imediato desta metodologia deverá incidir na melhoria dos critérios de aceitação das partículas geradas, procurando limitar a ocorrência de geometrias com proporções entre dimensões pouco compatíveis com as partículas reais. Será também importante testar diferentes condições de geração e avaliar a sua influência na distribuição das classes de forma.

Este aprofundamento permitirá construir bibliotecas de partículas virtuais mais robustas e representativas, que poderão posteriormente ser utilizadas em modelos numéricos pelo Método dos Elementos Discretos. A aplicação dessas bibliotecas permitirá analisar o comportamento mecânico do ASIC considerando geometrias mais próximas das partículas reais, sem ficar limitada ao número de partículas que foi possível digitalizar no presente estudo.

4.4 Comparação com séries de referência e materiais de transporte

4.4.1 Influência da dimensão das partículas na morfologia do ASIC

Nesta secção apresenta-se a comparação entre os resultados obtidos nas frações de 8 mm e 12 mm com a série EAF-Ref correspondente às partículas de escória estudadas por Paixão e Fortunato (2021) de dimensão superior.

Esta comparação permite avaliar se as diferenças de dimensão são acompanhadas por alterações sistemáticas na forma, angularidade ou microtextura das partículas. No entanto, os resultados devem ser interpretados com cautela, uma vez que a EAF-Ref foi obtida noutro contexto experimental através de fotogrametria de proximidade e não através de um scanner de luz estruturada. A Tabela 4-5 apresenta a estatística descritiva da série EAF-Ref.

Tabela 4-5. Estatística descritiva dos parâmetros morfológicos da série EAF_Ref

Parâmetro	Nº	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão	CV (%)
L_{corr}	29	64.45	65.05	53.54	79.41	7.20	11.17
I_{corr}	29	50.83	48.48	40.75	67.20	6.68	13.14
S_{corr}	29	37.61	36.00	29.98	50.69	4.95	13.15
$D_{eq,corr}$	29	41.27	40.54	35.85	48.67	3.72	9.01
Ψ	29	0.70	0.70	0.64	0.77	0.04	5.62
q	29	0.79	0.79	0.61	0.98	0.10	13.03
p	29	0.75	0.77	0.46	0.98	0.13	17.88
FI_{3DN}	29	1.01	0.91	0.64	1.56	0.28	27.68
AI_{3DN}	29	1.44	1.42	1.01	1.89	0.28	19.32
MT_{3DN}	29	0.11	0.10	0.07	0.16	0.03	24.73

Os parâmetros dimensionais da EAF-Ref são, naturalmente, muito superiores aos das frações analisadas neste estudo. O valor médio de L_{corr} é de 64.45 mm, enquanto o diâmetro equivalente médio é de 41.27 mm. Estes valores contrastam com os diâmetros equivalentes médios de 5.81 mm e 9.27 mm obtidos para as frações de 8 mm e 12 mm.

Apesar desta diferença de escala, os parâmetros adimensionais permanecem próximos. A esfericidade média da EAF-Ref é de 0.70, o alongamento médio é de 0.79 e o achatamento médio é de 0.75. Estes valores situam-se no mesmo intervalo observado para as duas frações de ASIC. Os índices tridimensionais também apresentam valores semelhantes, com $FI_{3DN} = 1.01$, $AI_{3DN} = 1.44$ e $MT_{3DN} = 0.11$. A Figura 4-7 compara a distribuição dos principais parâmetros morfológicos das três séries.

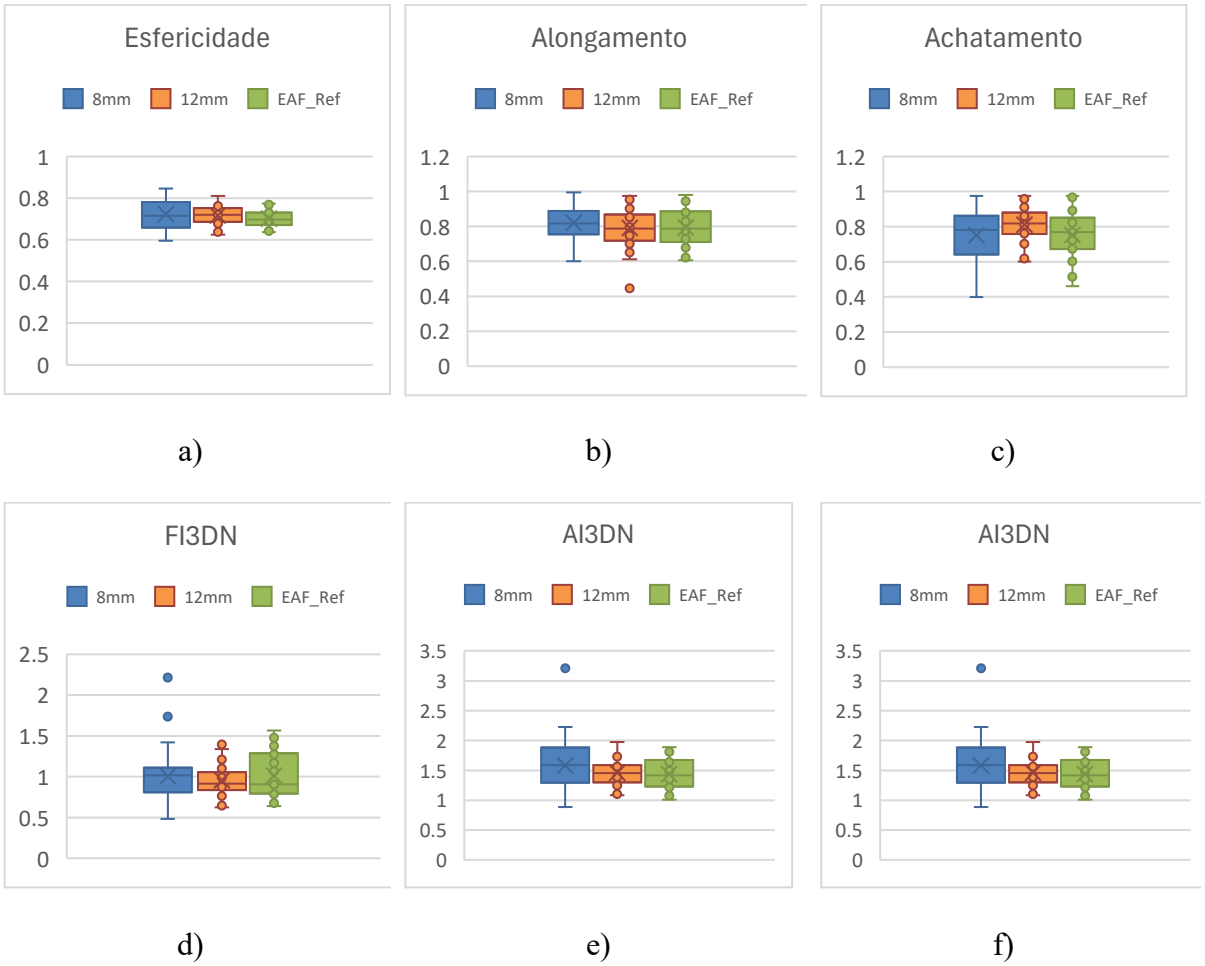


Figura 4-7. Boxplots comparativos dos parâmetros morfológicos das partículas ASIC de 8 mm, 12 mm e EAF-Ref.

A Figura 4-7 evidencia a diferença dimensional entre os conjuntos, mas mostra uma sobreposição considerável nos parâmetros de forma. A EAF-Ref não se afasta de forma marcada das frações de 8 mm e 12 mm quanto à esfericidade, alongamento ou achatamento. Nos índices tridimensionais, a fração de 8 mm apresenta a maior dispersão, sobretudo em AI_{3DN} e MT_{3DN}. A distribuição das três séries no diagrama de Zingg é apresentada na Figura 4-8.

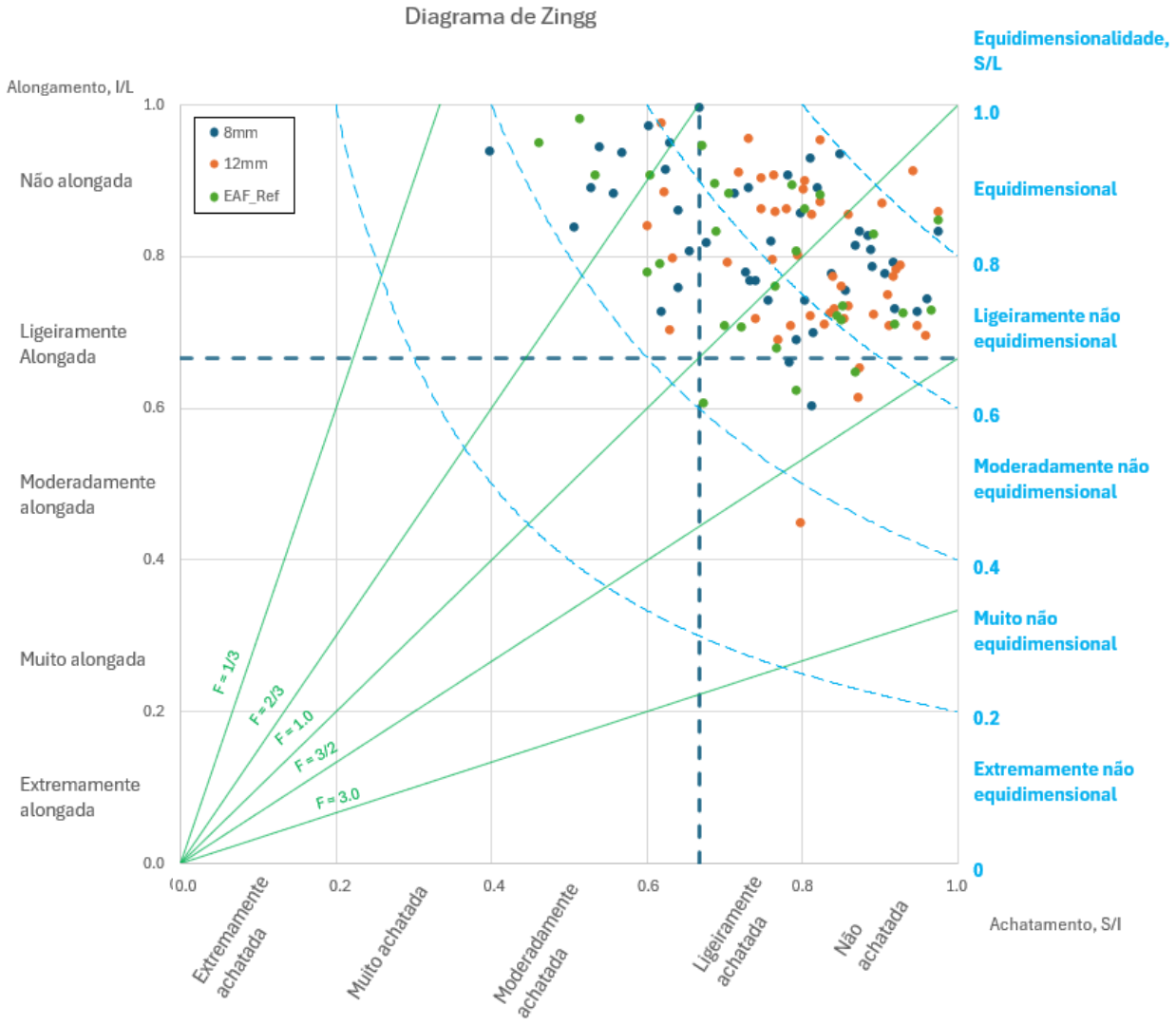


Figura 4-8. Diagrama de Zingg comparativo das partículas de ASIC das frações de 8 mm, 12 mm e EAF-Ref.

Os três conjuntos concentram-se sobretudo na região correspondente a partículas equidimensionais. A EAF-Ref não apresenta uma deslocação clara para classes morfológicas distintas, o que é coerente com a proximidade dos parâmetros adimensionais observada na Tabela 4-5. Assim, embora a dimensão absoluta varie de forma expressiva, os resultados não indicam uma alteração proporcional e sistemática da forma global das partículas de escória EAF.

Esta comparação não permite provar que a dimensão não influencia a morfologia, mas mostra que, nas séries analisadas, a diferença de dimensão não se traduziu numa mudança consistente dos parâmetros de forma global. As diferenças observadas parecem estar mais relacionadas com a variabilidade geométrica entre partículas do que com um efeito direto da escala.

4.4.2 Enquadramento com a literatura

A avaliação da morfologia das frações de ASIC ganha maior relevância quando contextualizada face aos valores obtidos para materiais tradicionalmente aplicados em infraestruturas de transporte.

Para permitir esta comparação direta, a Tabela 4-6 reúne os valores médios obtidos no presente estudo e os intervalos de variação identificados na literatura para escórias EAF, granito de balastro, brita de calcário e seixo natural rolado.

Tabela 4-6. Comparação quantitativa dos parâmetros morfológicos globais e índices tridimensionais do ASIC com valores da literatura para materiais naturais e subprodutos siderúrgicos.

Estudo	**Material**	Ψ	**q**	**p**	FI_{3DN}	AI_{3DN}	MT_{3DN}
Presente estudo	ASIC 8 mm	0.72	0.82	0.75	1.00	1,58	0,12
Presente estudo	ASIC 12 mm	0.72	0.79	0.81	0.96	1,46	0,11
Paixão e Fortunato (2021)	Escória EAF	-	-	-	0,20 a 0,90*	0,10 a 0,45*	0,005 a 0,050*
Paixão e Fortunato (2021)	Granito (balastro)	-	-	-	0,30 a 0,90*	0,10 a 0,40*	0,005 a 0,040*
Kutay et al. (2010, 2011)	Brita de Calcário	-	-	-	Elevado	Médio / Alto	Elevada
Kutay et al. (2010, 2011)	Seixo natural rolado	-	-	-	Baixo	Baixo	Baixa

(Nota: Os valores assinalados com asterisco () representam os intervalos de dispersão inicial extraídos graficamente dos dados de Paixão e Fortunato (2021), para partículas de balastro ferroviário).

No estudo de Paixão e Fortunato (2021), a representação por harmónicas esféricas demonstrou que as partículas de escória EAF originais apresentavam, em geral, maior angularidade e maior complexidade superficial, avaliadas por AI_{3DN} e MT_{3DN}, respetivamente, do que as partículas de granito. A forma global, avaliada por FI_{3DN}, apresentou distribuições semelhantes nos dois materiais. Contudo, os intervalos numéricos do presente estudo não são diretamente comparáveis com os desse trabalho, devido às diferenças no processo de digitalização, às condições de abrasão das partículas e ao processamento das harmónicas esféricas. Os valores de AI_{3DN}, entre 1.46 e 1.58, e de MT_{3DN}, entre 0.11 e 0.12, obtidos neste trabalho evidenciam a relevância da angularidade e da microtextura na caracterização do ASIC. Adicionalmente, verifica-se que a fração de menor dimensão, 8 mm, exibe valores médios de angularidade e microtextura superiores aos da fração de 12 mm.

Os resultados de Kutay et al. (2010, 2011) reforçam este enquadramento comparativo. A brita de calcário apresentou valores elevados de forma, angularidade média a elevada e microtextura elevada, enquanto o seixo natural rolado revelou valores baixos nos três índices. Esta diferença evidencia o contraste entre agregados britados, caracterizados por superfícies mais irregulares e angulosas, e materiais naturalmente rolados, cuja geometria tende a ser mais suavizada. Assim, as partículas de ASIC analisadas aproximam-se mais do comportamento morfológico de agregados britados do que do seixo natural rolado. A comparação deve ser interpretada em termos de tendências, não como equivalência numérica direta entre estudos.

Estas propriedades geométricas assumem um impacto direto no comportamento mecânico do material. A elevada angularidade e a microtextura fortemente rugosa das partículas de ASIC favorecem o aumento da resistência ao corte das camadas não ligadas, potenciando o intertravamento mecânico entre os grãos e maximizando o atrito interfacial (conforme referido na Secção 2.4.1). Contudo, estas mesmas características implicam tipicamente uma maior exigência de energia de compactação em obra e podem resultar em fenómenos de esmagamento localizado das arestas mais proeminentes quando sujeitas a tensão.

Em conclusão, a morfologia do ASIC, evidenciada por índices tridimensionais maiores do que os do granito, é intrinsecamente vantajosa para o desempenho estrutural, mas não deve ser interpretada de forma isolada. A aplicação do material em infraestruturas (sub-balastro, base ou sub-base) exige que o desempenho mecânico favorecido pela angularidade atue em conjunto com o cumprimento dos limites normativos associados à granulometria, desgaste, estabilidade volumétrica e impacto ambiental.

4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

A caracterização morfológica convencional mostrou que as frações de 8 mm e 12 mm se distinguem claramente pela dimensão, mas apresentam valores médios próximos de esfericidade, alongamento e achatamento. A fração de 8 mm revelou, contudo, maior dispersão no achatamento e uma maior proporção de partículas classificadas como achatadas no diagrama de Zingg.

A análise por harmónicas esféricas confirmou que as diferenças entre as frações não se resumem às dimensões principais. Os valores médios dos índices tridimensionais mantiveram-se próximos, mas a fração de 8 mm apresentou maior dispersão, sobretudo nos índices de angularidade e microtextura. Este resultado indica uma maior variabilidade das irregularidades geométricas e superficiais dentro desta fração.

A comparação com a série EAF-Ref (Paixão e Fortunato, 2021) permitiu enquadrar os resultados numa gama dimensional mais ampla. Apesar da diferença expressiva de dimensão, os parâmetros adimensionais e os índices tridimensionais mantiveram valores próximos dos observados nas frações de 8 mm e 12 mm. Esta comparação não demonstra, por si só, a inexistência de um efeito de escala, mas sugere que a forma global relativa das partículas de escória EAF se mantém semelhante nos conjuntos analisados.

Em conjunto, os resultados mostram que o ASIC apresenta partículas predominantemente equidimensionais, mas com variação relevante na angularidade e na microtextura superficial. A caracterização realizada contribui para compreender a geometria do material, devendo ser articulada com os restantes requisitos mecânicos, granulométricos, ambientais e de durabilidade necessários para a sua aplicação em camadas de transporte.

5 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO

5.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação explorou a morfologia tridimensional de partículas de Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) das frações de 8 mm e 12 mm, com o propósito de aprofundar o conhecimento geométrico sobre este subproduto e promover a sua integração em camadas de apoio de vias rodoviárias e ferroviárias.

O recurso a metodologias avançadas de aquisição ótica e de processamento por harmónicas esféricas revelou-se um passo essencial para superar as limitações das abordagens bidimensionais, que raramente conseguem descrever a forte rugosidade e as arestas proeminentes caraterísticas da escória de aciaria. Da análise dos parâmetros geométricos convencionais resulta que, apesar da óbvia diferença de tamanho entre as duas gamas nominais, a forma global das partículas mantém-se estável. Ambas as frações apresentaram uma esfericidade média de 0,72 e a classificação morfológica apontou o predomínio evidente da classe equidimensional, atingindo os 67% na fração fina e os 83% na fração grossa.

Contudo, a verdadeira natureza do ASIC revelou-se quando se escalou a análise para a angularidade e microtextura através das harmónicas esféricas. Os índices tridimensionais mostraram que a fração menor de 8 mm acarreta não só um achatamento mais disperso, mas também uma maior variabilidade de arestas vivas e defeitos superficiais. Este facto indica que a desagregação da escória a dimensões mais finas não a torna mecanicamente mais suave. Pelo contrário, concentra e diversifica a complexidade da superfície.

Comparativamente aos agregados naturais britados, como o granito, os índices obtidos sugerem vantagens mecânicas potenciais do ASIC. O elevado atrito interfacial expectável em partículas tão rugosas poderá favorecer a rigidez e a resistência ao corte. Em contexto de projeto para infraestruturas de transporte e, em particular, nas camadas de sub-balastro, o material deve apresentar uma granulometria correta dentro dos fusos granulométricos previstos nas especificações técnicas de materiais granulares, de modo que a energia de compactação em obra introduza uma degradação localizada, garantindo a estabilidade volumétrica da camada final.

A geração de partículas virtuais a partir dos coeficientes normalizados de harmónicas esféricas constitui um resultado metodológico promissor deste trabalho, mas ainda requer aperfeiçoamento antes da sua utilização em simulações pelo Método dos Elementos Discretos. As partículas virtuais preservaram as tendências geométricas globais das amostras reais, nomeadamente ao nível do alongamento e do achatamento. Contudo, apresentaram maior esfericidade, menor angularidade e microtextura reduzida relativamente às partículas reais. Verificaram-se também algumas geometrias lamelares ausentes nas amostras de ASIC analisadas. Estes desvios indicam que os coeficientes normalizados permitem reproduzir a geometria global das partículas, mas ainda não captam integralmente as irregularidades superficiais e as arestas características do material real. Assim, a biblioteca virtual constitui uma base para futura modelação DEM, devendo os critérios de seleção e aceitação das partículas ser refinados e validados antes da sua aplicação em simulações.

5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E PERSPETIVAS FUTURAS

Como em todo o estudo experimental assente numa técnica de alta resolução, o volume de amostra foi condicionado. O número de partículas processadas captou a variabilidade dominante das frações analisadas de um lote específico de ASIC, mas não encerra todas as flutuações possíveis dependentes do histórico de arrefecimento da aciaria original. Por se tratar de um estudo marcadamente geométrico, este trabalho deve ser visto como uma base fundamental, cujas propriedades medidas assumem o seu real valor quando testadas na prática e sujeitas à ação de cargas reais.

Nesse sentido, impõe-se como recomendação futura a realização de um estudo em larga escala com diferentes proveniências de escória de forno elétrico, permitindo traçar os limites da dispersão morfológica nacional deste material e verificar se as tendências registadas nestas frações de base se repetem de forma sistemática.

Revela-se também essencial que futuros estudos integrem a digitalização tridimensional de todas as frações granulométricas constituintes do ASIC, incluindo partículas de menor e de maior dimensão. Para esse efeito, serão necessários equipamentos e procedimentos de aquisição capazes de captar, com resolução adequada, partículas abrangendo toda a curva granulométrica especificada para a aplicação em causa. Só assim será possível construir modelos pelo Método dos Elementos Discretos com partículas geometricamente representativas das diferentes dimensões presentes numa camada granular de ASIC.

A relação entre os parâmetros morfológicos e o comportamento mecânico deverá ser avaliada em amostras de material compactado em laboratório, com curva granulométrica extensa e compatível com as especificações técnicas aplicáveis, incorporando partículas de várias dimensões. Esta abordagem permitirá analisar a influência da angularidade e da microtextura na rigidez, na deformação permanente e na degradação global do material, complementando a análise da evolução morfológica individual durante a abrasão realizada por Paixão e Fortunato (2021).

Com os resultados atualmente obtidos, seria possível construir uma representação provisória da curva granulométrica em modelos DEM através do escalamento das partículas digitalizadas. Contudo, esse procedimento pressupõe que a morfologia das partículas se mantém constante entre diferentes dimensões. A comparação com a série EAF-Ref sugere que esta hipótese poderá ser aceitável para partículas de maior dimensão, mas não deve ser automaticamente estendida às frações mais finas, geralmente obtidas por britagem para cumprimento das especificações granulométricas. A validação desta hipótese exige, por isso, a digitalização direta das partículas de menor dimensão.

Por outro lado, recomenda-se o aperfeiçoamento da rotina de geração de partículas virtuais, de modo a evitar geometrias não representativas das partículas reais. A rotina deverá preservar não apenas os eixos geométricos globais, mas também a angularidade, a microtextura e a ausência de formas lamelares observadas nas amostras reais. Após a validação geométrica das partículas digitais e virtuais para todas as frações granulométricas, a modelação pelo Método dos Elementos Discretos poderá simular o comportamento de camadas de balastro e sub-balastro sob carregamentos cíclicos representativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, C. R. (2021). Caracterização Mecânica e Digitalização Tridimensional na Análise de Partículas Granulares de Geomateriais. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Aggregates Europe - UEPG. (2026). Trends. Acedido a 9/10/2026, de https://www.aggregates-europe.eu/facts-figures/trends/

Alves, R., Ramos, A., Castanheira-Pinto, A., Rios, S., e Fernández-Ruiz, J. (2024). Steel Slag Sub-Ballast for Sustainable Railway Track Infrastructure. Infrastructures, 9(7), 106. Obtido de https://doi.org/10.3390/infrastructures9070106

Alves, R., Rios, S., Fortunato, E., Viana da Fonseca, A., e Delgado, B. G. (2023). Mechanical Behaviour of Steel Slag-Rubber Mixtures: Laboratory Assessment. Sustainability, 15(2), 1563. Obtido de https://doi.org/10.3390/su15021563

Aremu, E. A., Tuzelbayev, D., Kim, J., e Moon, S.-W. (2026). Direct shear–DEM evaluation of basic oxygen furnace (BOF) slag for railway ballast. Transportation Geotechnics, 58, 101938. Obtido de https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2026.101938

Blott, S. J., e Pye, K. (2002). Particle size and shape: A new approach to particle morphology. Sedimentology, 49(1), 119-135.

CEN. (2020). EN 1097-2:2020. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation. European Committee for Standardization.

CEN. (2023). EN 1097-1:2023. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval). European Committee for Standardization.

Correia, A. G., Roque, A. J., Ferreira, S. M. R., Fortunato, E., Edil, T., e Dean, S. W. (2012). Case Study to Promote the Use of Industrial Byproducts: The Relevance of Performance Tests. Journal of ASTM International, 9(1), 1-18.

Delgado, B. G., da Fonseca, A. V., Fortunato, E., e Maia, P. (2019a). Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: Laboratory evaluation. Transportation Geotechnics, 20, 100243. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100243

Delgado, B. G., da Fonseca, A. V., Fortunato, E., e da Motta, L. M. G. (2019b). Particle morphology's influence on the rail ballast behaviour of a steel slag aggregate. Environmental Geotechnics, 1–10. https://doi.org/10.1680/jenge.18.00203

Estradas de Portugal. (2014). Caderno de Encargos Tipo Obra: Volume V, Capítulo 14.03 - Pavimentação, Características dos materiais. Almada: Estradas de Portugal.

Fortunato, E. (2005). Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga. (Tese de Doutoramento). Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Fortunato, E. (2025a). Railway track - Structure. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Fortunato, E. (2025b). Road pavement materials. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Fortunato, E. (2025c). RTR Capping layer. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Fortunato, E. (2025d). Type of road pavements. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Fu, R., Yang, B., Hu, X., Zhou, B., e Coop, M. R. (2023). A Micromechanical Investigation of Sand-Rubber Mixtures Using the Discrete Element Method. Engineering Geology, 318, 107106. Obtido de https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107106

Garboczi, E. J. (2002). Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: Application to aggregates used in concrete. Cement and Concrete Research, 32(10), 1621-1638. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00836-0

IP. (2023). Instrução técnica GR.IT.GEO.006, v02 - Características técnicas do sub-balastro. Infraestruturas de Portugal, Lisboa.

IPQ. (2010a). NP EN 933-5:2010. Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 5: Determinação da percentagem de superfícies esmagadas e partidas nas partículas dos agregados grossos. Instituto Português da Qualidade.

IPQ. (2010b). NP EN 933-9:2010. Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 9: Avaliação dos finos. Ensaio do azul de metileno. Instituto Português da Qualidade.

Jerónimo, P., Resende, R., e Fortunato, E. (2019). An assessment of contact and laser-based scanning of rock particles for railway ballast. Transportation Geotechnics, 100302. Obtido de https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100302

Jia, W., Markine, V. L., e Jing, G. (2021). Analysis of furnace slag in railway sub-ballast based on experimental tests and DEM simulations. Construction and Building Materials, 288, 123114. Obtido de https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123114

Jolliffe, I. T. (2002). Principal Component Analysis. (Springer, Ed.) New York. https://doi.org/10.1007/b98835

Kutay, M. E., Ozturk, H. I., e Gibson, N. (2010). 3D micromechanical simulation of compaction of hot mix asphalt using real aggregate shapes obtained from X-ray CT. Pavements and Materials: Characterization and Modeling Symposium at EMI 2010, 86–98. https://doi.org/10.1061/41129(385)8

Kutay, M. E., Ozturk, H. I., Abbas, A. R., e Hu, C. (2011). Comparison of 2D and 3D image-based aggregate morphological indices. International Journal of Pavement Engineering, 12(4), 421–431. https://doi.org/10.1080/10298436.2011.575137

LNEC. (2009a). Especificação LNEC E 473: Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos. Lisboa: LNEC.

LNEC. (2009b). Especificação LNEC E 474: Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte. Lisboa: LNEC.

Mica, N. G., Rios, S., Viana da Fonseca, A., e Fortunato, E. (2023a). Experimental Investigation to Analyze the Effect of Cementation on the Geomechanical Behavior of Steel Slag Mixtures. Geotechnical Testing Journal, 47(1), 123-139. Obtido de https://doi.org/10.1520/GTJ20220248

Mica, N. G., Rios, S., Viana da Fonseca, A., e Fortunato, E. (2023b). The Use of Steel Slags in Transport Infrastructures: A Critical Review. Geotechnical Testing Journal, 47(1), 425-443. Obtido de https://doi.org/10.1520/GTJ20230297

O'Sullivan, C., Evans, T., e Zhao, J. (2026). The Discrete Element Method in Geomechanics: Advances, Challenges, and Opportunities. Proceedings of the 21st International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (pp. 65-91). Vienna: Austrian Society for Geomechanics (ÖGG). doi:10.53243/ICSMGE2026-8

Paixão, A., e Fortunato, E. (2021). Abrasion Evolution of Steel Furnace Slag Aggregate for Railway Ballast: 3D Morphology Analysis of Scanned Particles by Close-Range Photogrammetry. Construction and Building Materials, 267, 121225. Obtido de https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121225

Wadell, H. (1932). Volume, shape, and roundness of rock particles. The Journal of Geology, 40(5), 443-451.

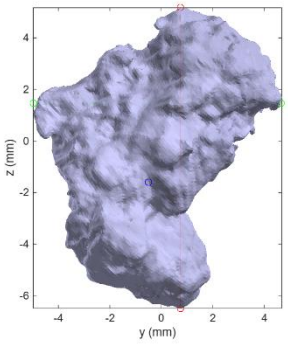
Yao, T., e Li, W. (2023). Quantifying the Particle Shape and Surface Roughness of Sands. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(4). Obtido de https://doi.org/10.1007/s10064-023-03167-7

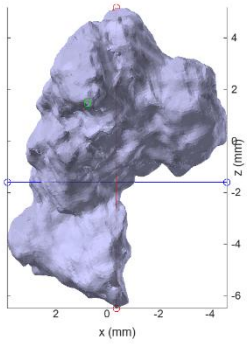
Zhang, J.-Q., Wang, X., e Yin, Z.-Y. (2023). DEM-Based Study on the Mechanical Behaviors of Sand-Rubber Mixture in Critical State. Construction and Building Materials, 370, 130603. Obtido de https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130603

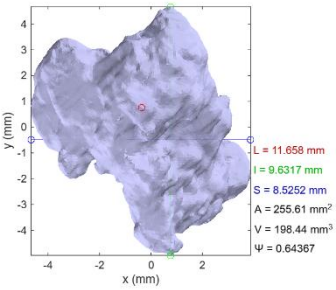
Zingg, T. (1935). Beitrag zur Granulometrie der fluvioglazialen Sedimente. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 15, 39-140.

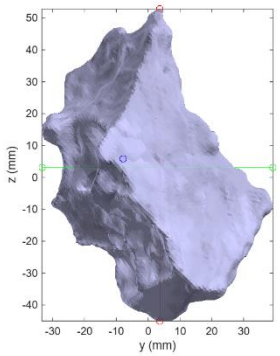
ANEXOS

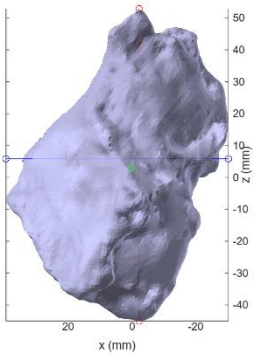
A.1 PARTÍCULAS ORIGINAIS DE ASIC, FRAÇÃO DE 8 MM

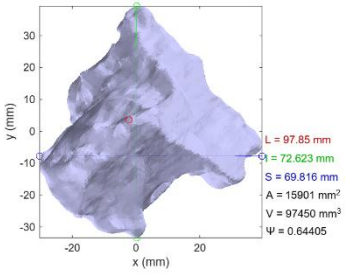


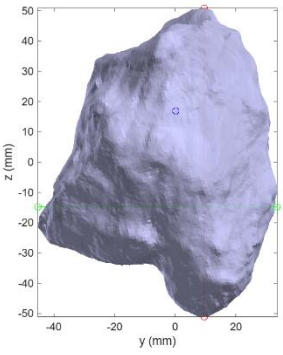


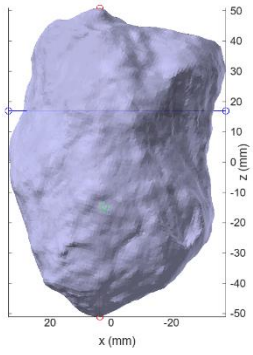


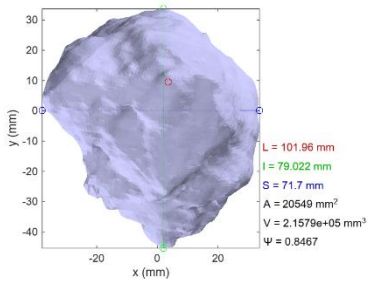


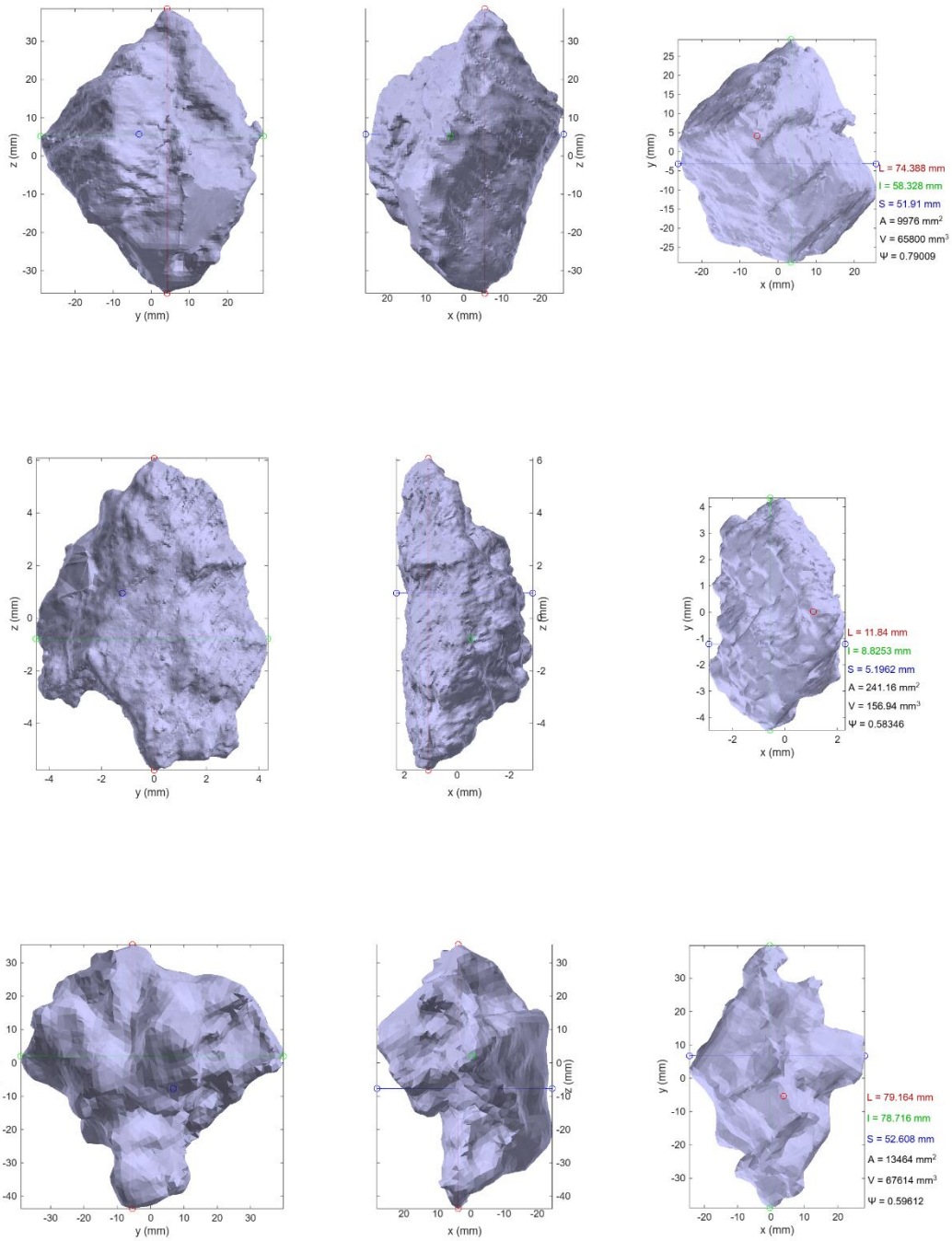


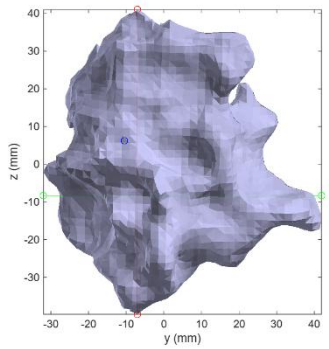


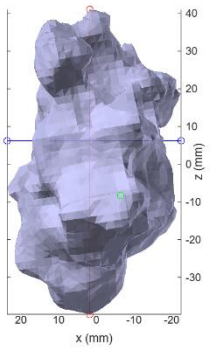


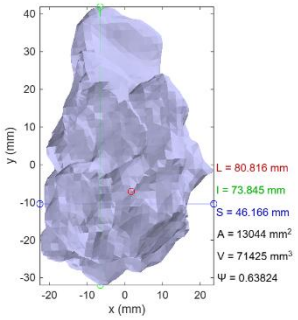


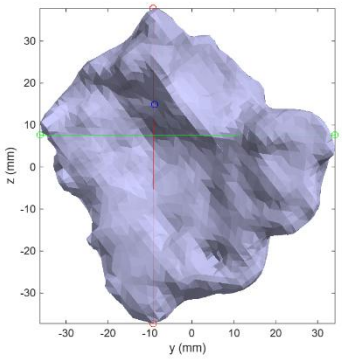


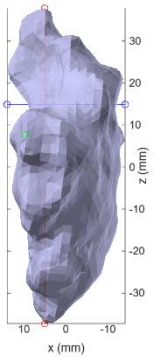

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 74.388 mm
I = 58.328 mm
S = 51.91 mm
A = 9976 mm²
V = 65800 mm³
Ψ = 0.79009
L = 11.84 mm
I = 8.8253 mm
S = 5.1962 mm
A = 241.16 mm²
V = 156.94 mm³
Ψ = 0.58346
L = 79.164 mm
I = 78.716 mm
S = 52.608 mm
A = 13464 mm²
V = 67614 mm³
Ψ = 0.59612

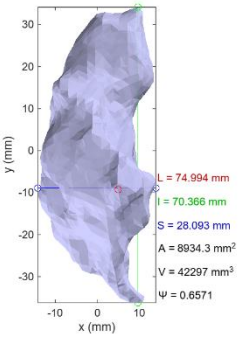

z (mm)
y (mm)

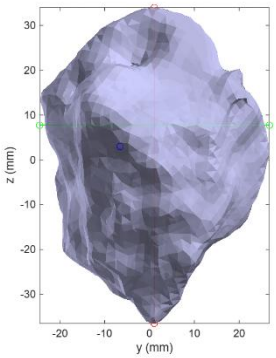

z (mm)
x (mm)

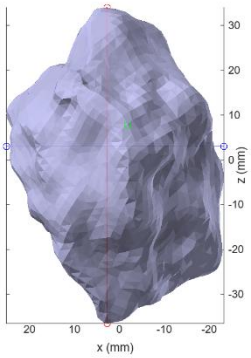

y (mm)
x (mm)
L = 80.816 mm
l = 73.845 mm
S = 46.166 mm
A = 13044 mm²
V = 71425 mm³
Ψ = 0.63824

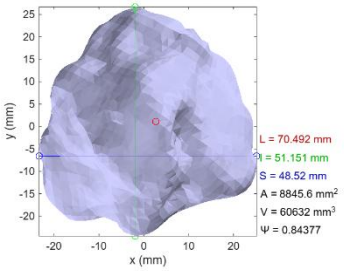

z (mm)
y (mm)

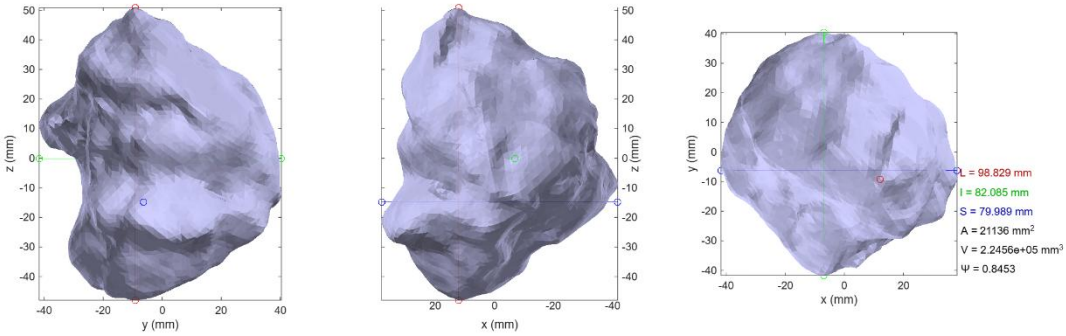

z (mm)
x (mm)

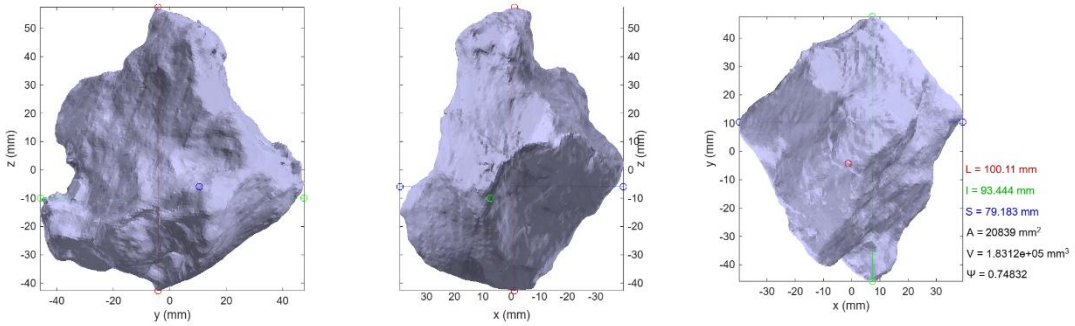

y (mm)
x (mm)
L = 74.994 mm
l = 70.366 mm
S = 28.093 mm
A = 8934.3 mm²
V = 42297 mm³
Ψ = 0.6571

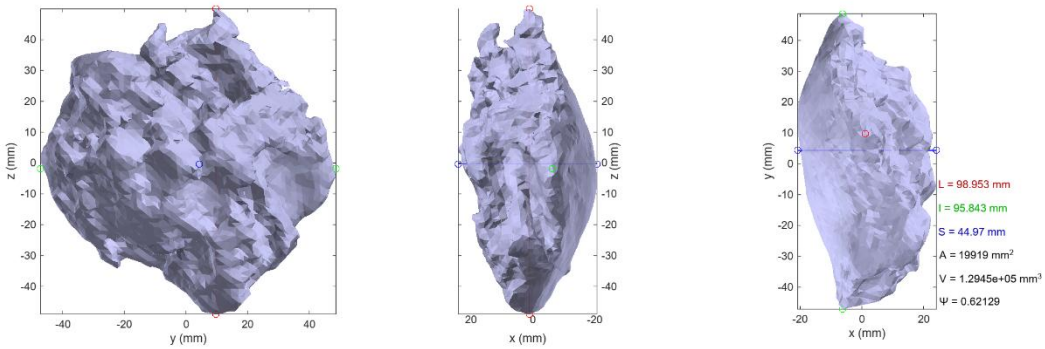

z (mm)
y (mm)

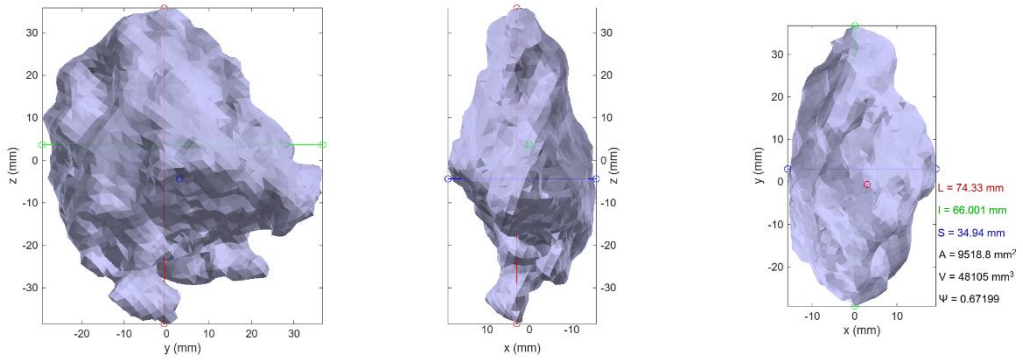

z (mm)
x (mm)

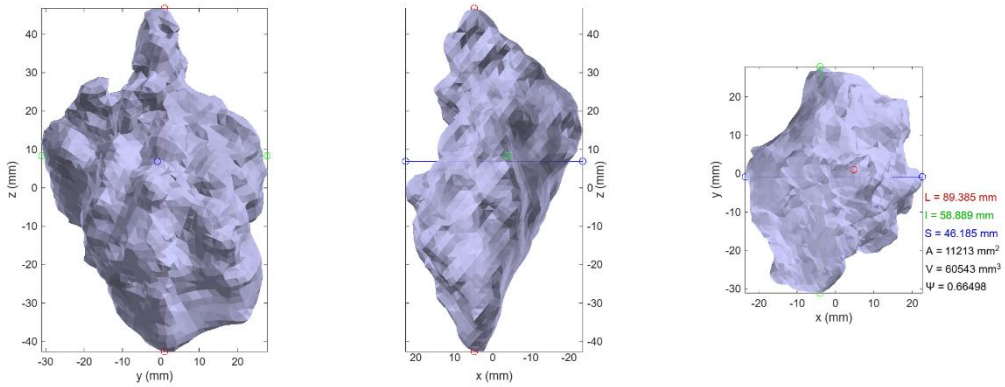

y (mm)
x (mm)
L = 70.492 mm
l = 51.151 mm
S = 48.52 mm
A = 8845.6 mm²
V = 60632 mm³
Ψ = 0.84377

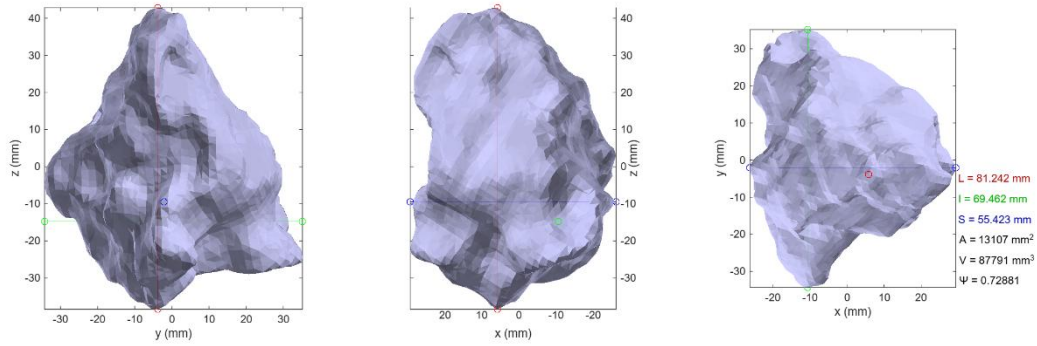

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 98.829 mm
I = 82.085 mm
S = 79.989 mm
A = 21136 mm²
V = 2.2456e+05 mm³
Ψ = 0.8453

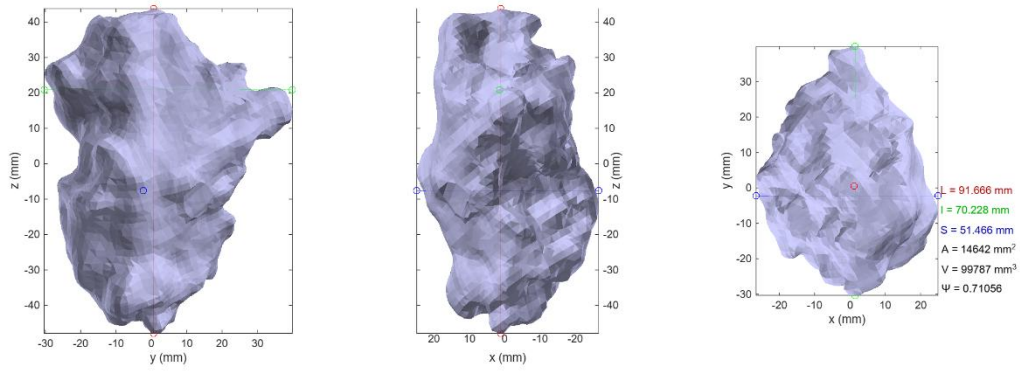

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 100.11 mm
I = 93.444 mm
S = 79.183 mm
A = 20839 mm²
V = 1.8312e+05 mm³
Ψ = 0.74832

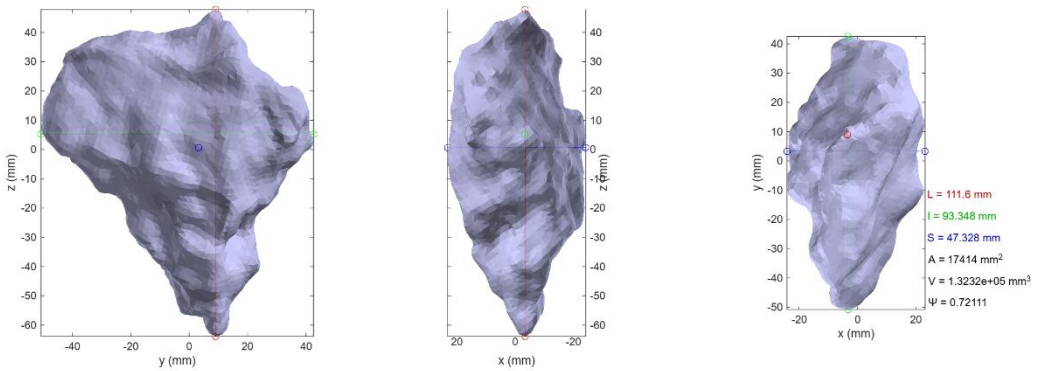

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 98.953 mm
I = 95.843 mm
S = 44.97 mm
A = 19919 mm²
V = 1.2945e+05 mm³
Ψ = 0.62129

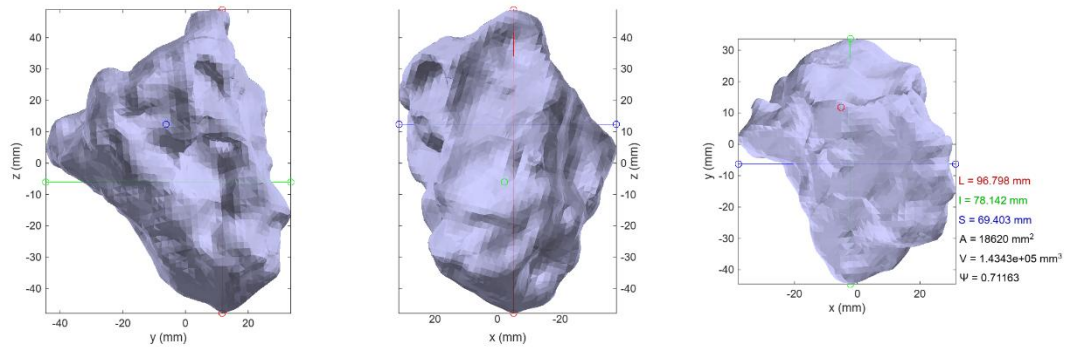

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
L = 74.33 mm
I = 66.001 mm
S = 34.94 mm
A = 9518.8 mm²
V = 48105 mm³
Ψ = 0.67199

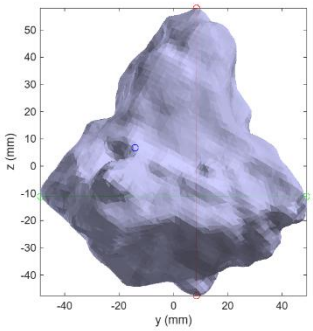

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
L = 89.385 mm
I = 58.889 mm
S = 46.185 mm
A = 11213 mm²
V = 60543 mm³
Ψ = 0.66498

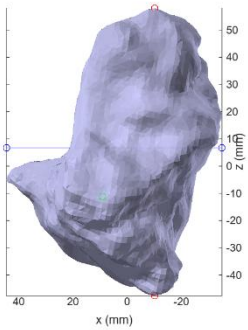

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
L = 81.242 mm
I = 69.462 mm
S = 55.423 mm
A = 13107 mm²
V = 87791 mm³
Ψ = 0.72881

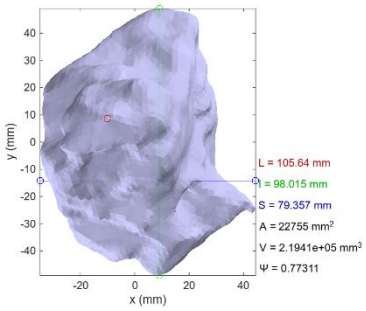

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 91.666 mm
I = 70.228 mm
S = 51.466 mm
A = 14642 mm²
V = 99787 mm³
Ψ = 0.71056

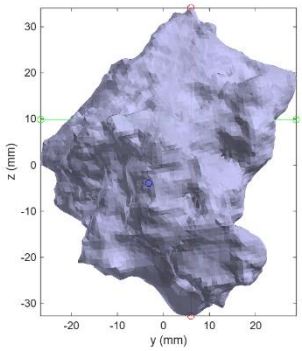

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 111.6 mm
I = 93.348 mm
S = 47.328 mm
A = 17414 mm²
V = 1.3232e+05 mm³
Ψ = 0.72111

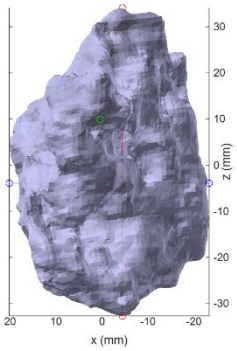

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 96.798 mm
I = 78.142 mm
S = 69.403 mm
A = 18620 mm²
V = 1.4343e+05 mm³
Ψ = 0.71163

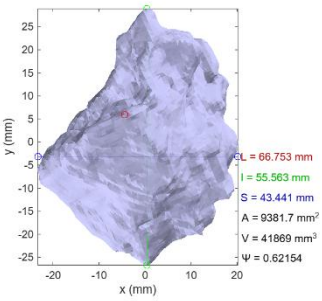

z (mm)
y (mm)

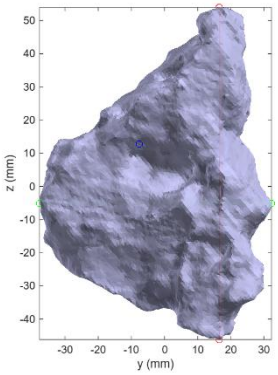

z (mm)
x (mm)

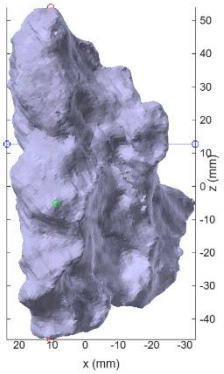

y (mm)
x (mm)
L = 105.64 mm
l = 98.015 mm
S = 79.357 mm
A = 22755 mm²
V = 2.1941e+05 mm³
Ψ = 0.77311

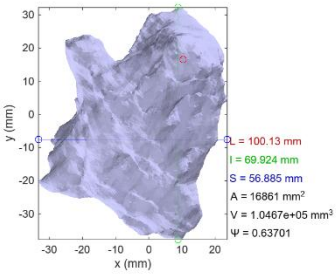

z (mm)
y (mm)

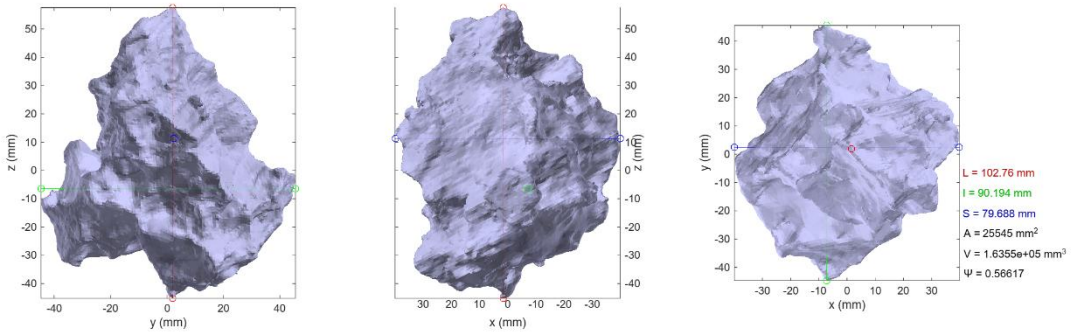

z (mm)
x (mm)

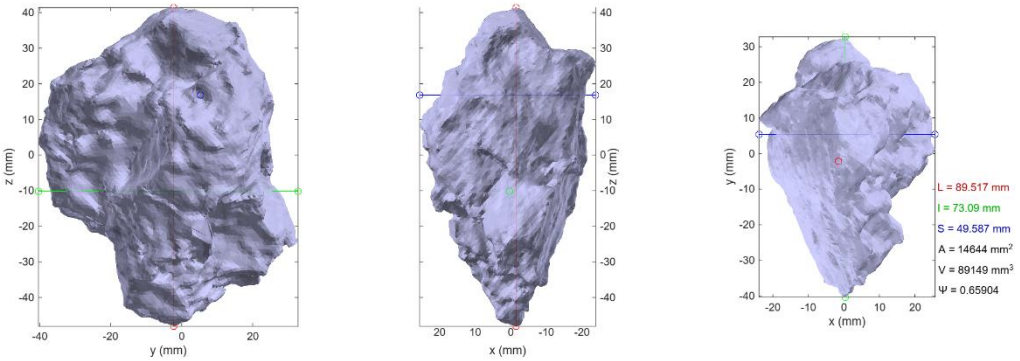

y (mm)
x (mm)
L = 66.753 mm
l = 55.563 mm
S = 43.441 mm
A = 9381.7 mm²
V = 41869 mm³
Ψ = 0.62154

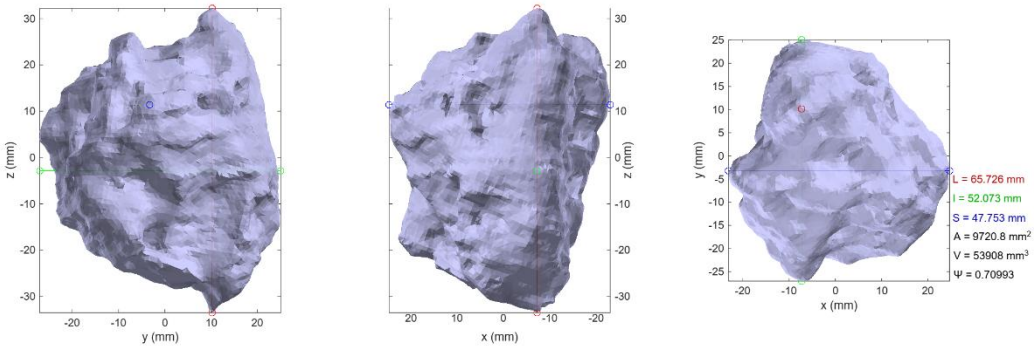

z (mm)
y (mm)

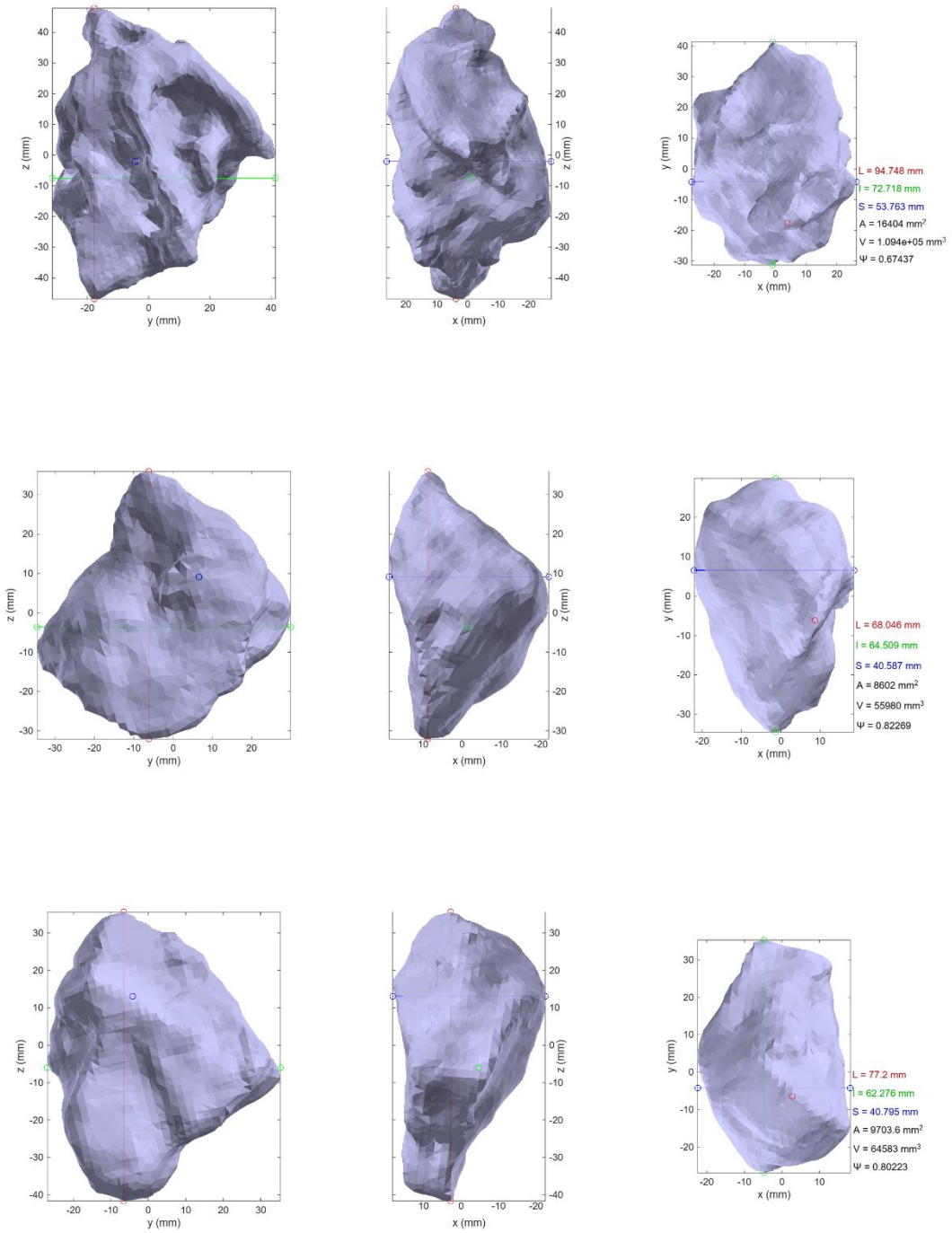

z (mm)
x (mm)

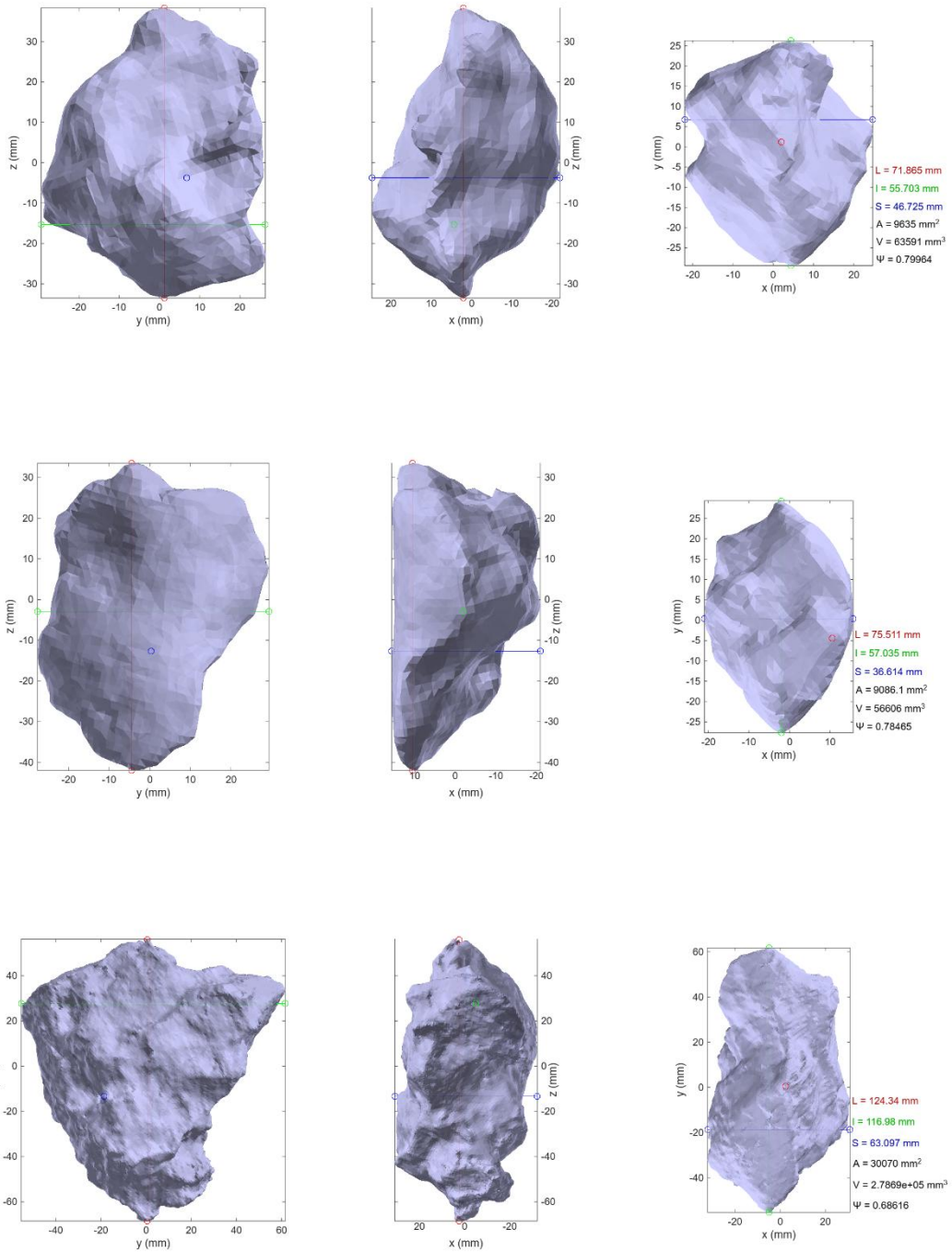

y (mm)
x (mm)
L = 100.13 mm
l = 69.924 mm
S = 56.885 mm
A = 16861 mm²
V = 1.0467e+05 mm³
Ψ = 0.63701

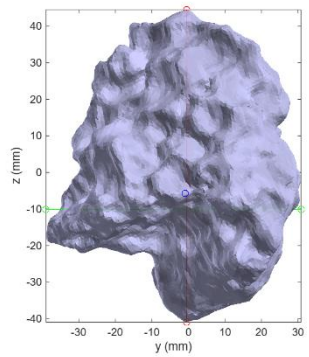

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 102.76 mm
I = 90.194 mm
S = 79.688 mm
A = 25545 mm²
V = 1.6355e+05 mm³
Ψ = 0.56617

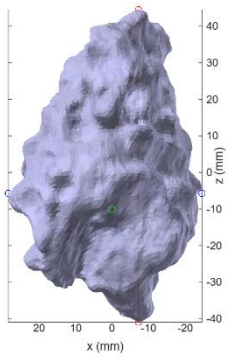

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 89.517 mm
I = 73.09 mm
S = 49.587 mm
A = 14644 mm²
V = 89149 mm³
Ψ = 0.65904

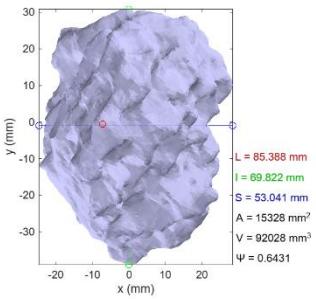

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 65.726 mm
I = 52.073 mm
S = 47.753 mm
A = 9720.8 mm²
V = 53908 mm³
Ψ = 0.70993

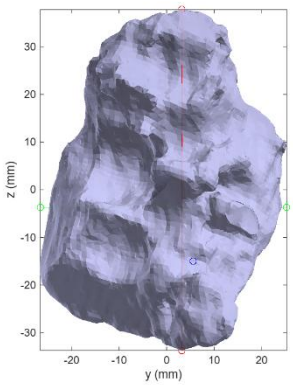

z (mm)
y (mm)
z (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 94.748 mm
I = 72.718 mm
S = 53.763 mm
A = 16404 mm²
V = 1.094e+05 mm³
Ψ = 0.67437
z (mm)
y (mm)
z (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 68.046 mm
I = 64.509 mm
S = 40.587 mm
A = 8602 mm²
V = 55980 mm³
Ψ = 0.82269
z (mm)
y (mm)
z (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 77.2 mm
I = 62.276 mm
S = 40.795 mm
A = 9703.6 mm²
V = 64583 mm³
Ψ = 0.80223

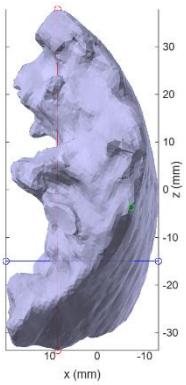

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 71.865 mm
I = 55.703 mm
S = 46.725 mm
A = 9635 mm²
V = 63591 mm³
Ψ = 0.79964
L = 75.511 mm
I = 57.035 mm
S = 36.614 mm
A = 9086.1 mm²
V = 56606 mm³
Ψ = 0.78465
L = 124.34 mm
I = 116.98 mm
S = 63.097 mm
A = 30070 mm²
V = 2.7869e+05 mm³
Ψ = 0.68616

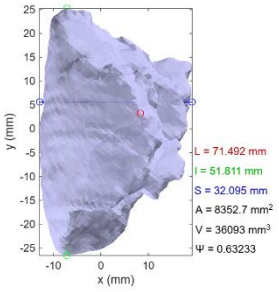

z (mm)
y (mm)

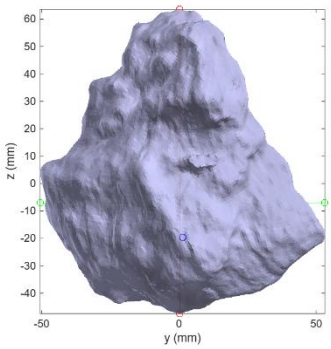

z (mm)
x (mm)

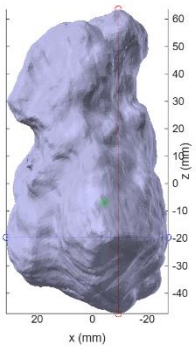

y (mm)
x (mm)
L = 85.388 mm
I = 69.822 mm
S = 53.041 mm
A = 15328 mm²
V = 92028 mm³
Ψ = 0.6431

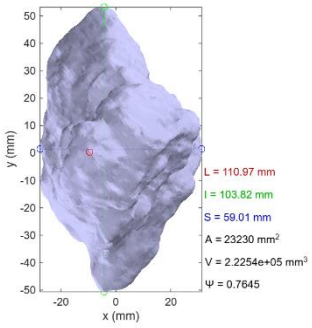

z (mm)
y (mm)

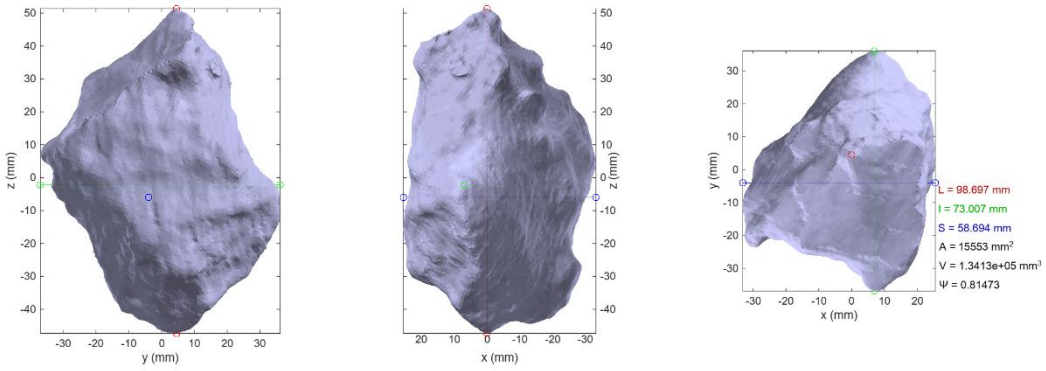

z (mm)
x (mm)

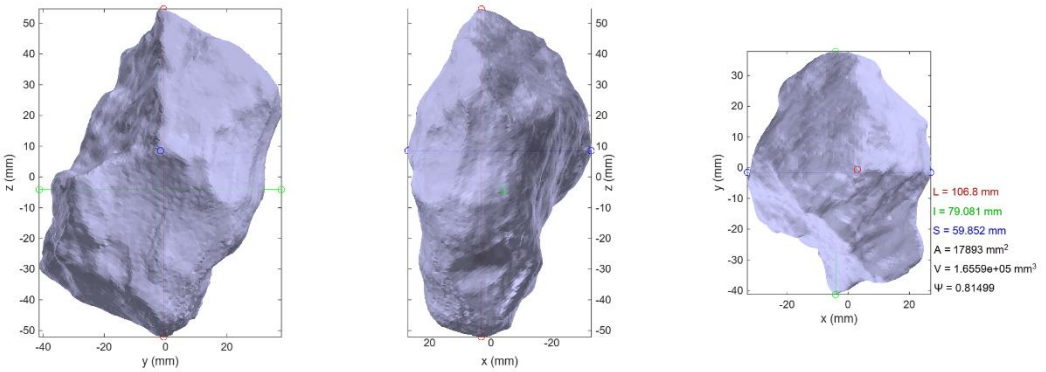

y (mm)
x (mm)
L = 71.492 mm
I = 51.811 mm
S = 32.095 mm
A = 8352.7 mm²
V = 36093 mm³
Ψ = 0.63233

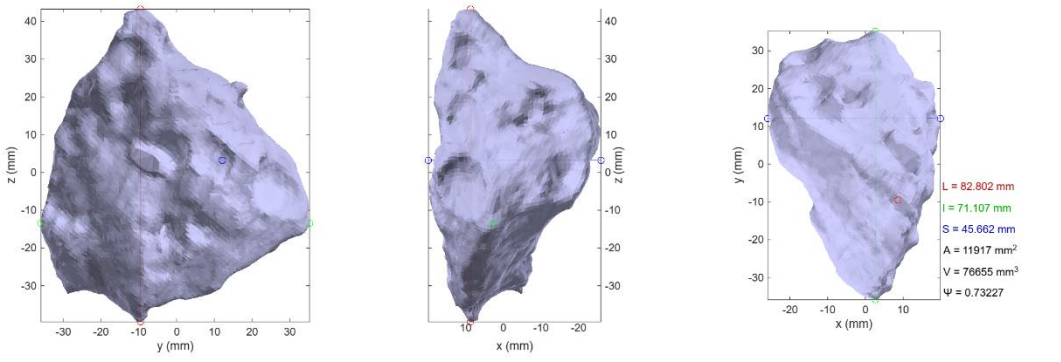

z (mm)
y (mm)

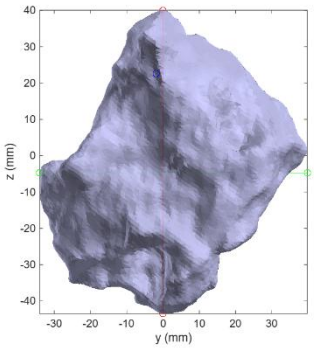

z (mm)
x (mm)

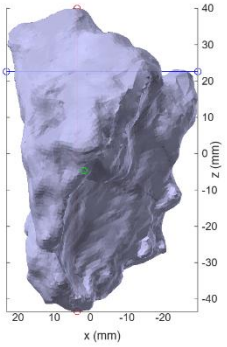

y (mm)
x (mm)
L = 110.97 mm
I = 103.82 mm
S = 59.01 mm
A = 23230 mm²
V = 2.2254e+05 mm³
Ψ = 0.7645

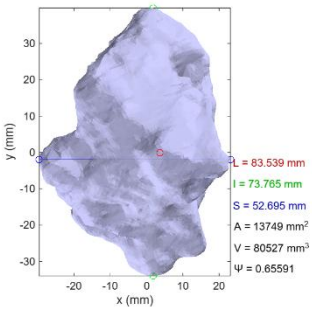

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 98.697 mm
I = 73.007 mm
S = 58.694 mm
A = 15553 mm²
V = 1.3413e+05 mm³
Ψ = 0.81473

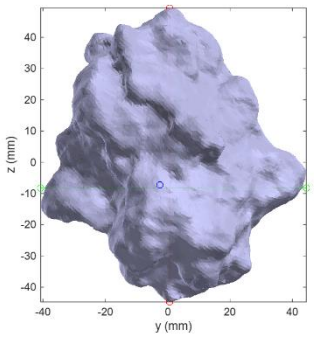

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 106.8 mm
I = 79.081 mm
S = 59.852 mm
A = 17893 mm²
V = 1.6559e+05 mm³
Ψ = 0.81499

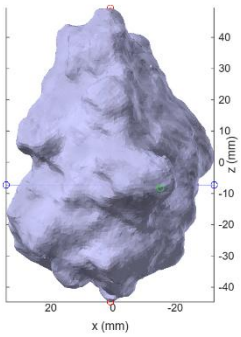

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 82.802 mm
I = 71.107 mm
S = 45.662 mm
A = 11917 mm²
V = 76655 mm³
Ψ = 0.73227

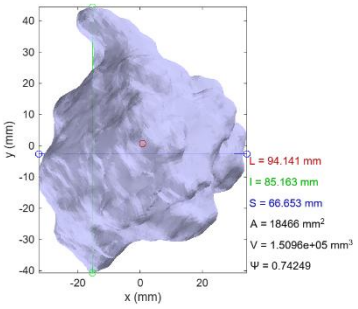

z (mm)
y (mm)

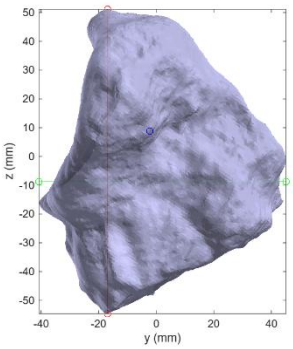

z (mm)
x (mm)

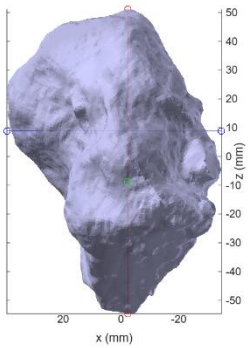

y (mm)
x (mm)
L = 83.539 mm
l = 73.765 mm
S = 52.695 mm
A = 13749 mm²
V = 80527 mm³
Ψ = 0.65591

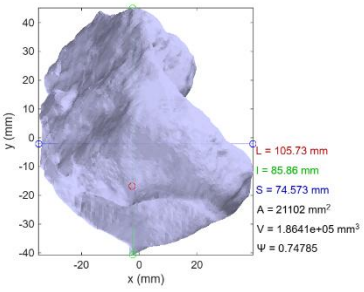

z (mm)
y (mm)

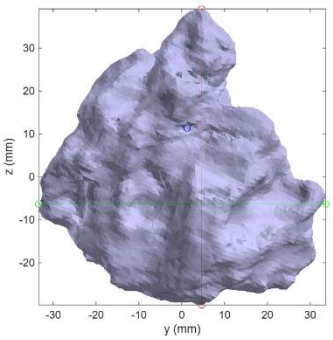

z (mm)
x (mm)

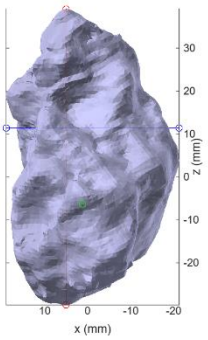

y (mm)
x (mm)
L = 94.141 mm
l = 85.163 mm
S = 66.653 mm
A = 18466 mm²
V = 1.5096e+05 mm³
Ψ = 0.74249

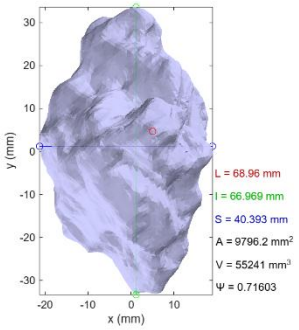

z (mm)
y (mm)

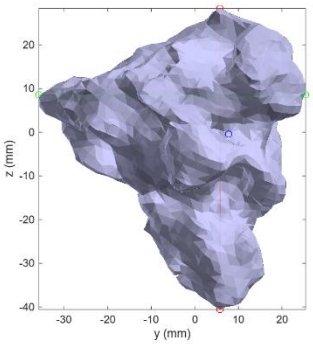

z (mm)
x (mm)

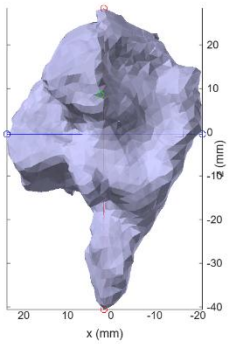

y (mm)
x (mm)
L = 105.73 mm
l = 85.86 mm
S = 74.573 mm
A = 21102 mm²
V = 1.8641e+05 mm³
Ψ = 0.74785

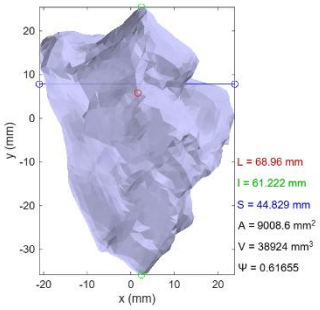

z (mm)
y (mm)

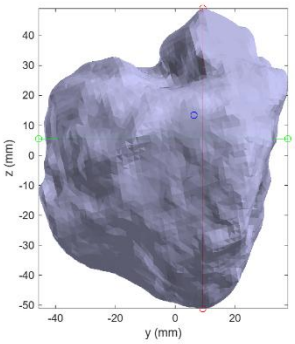

z (mm)
x (mm)

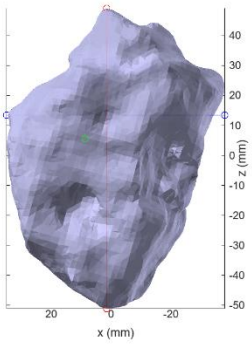

y (mm)
x (mm)
L = 68.96 mm
I = 66.969 mm
S = 40.393 mm
A = 9796.2 mm²
V = 55241 mm³
Ψ = 0.71603

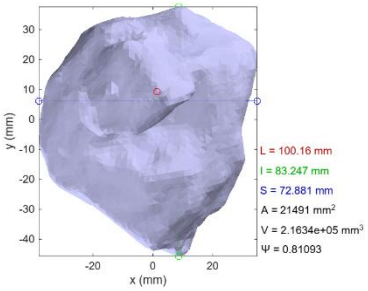

z (mm)
y (mm)

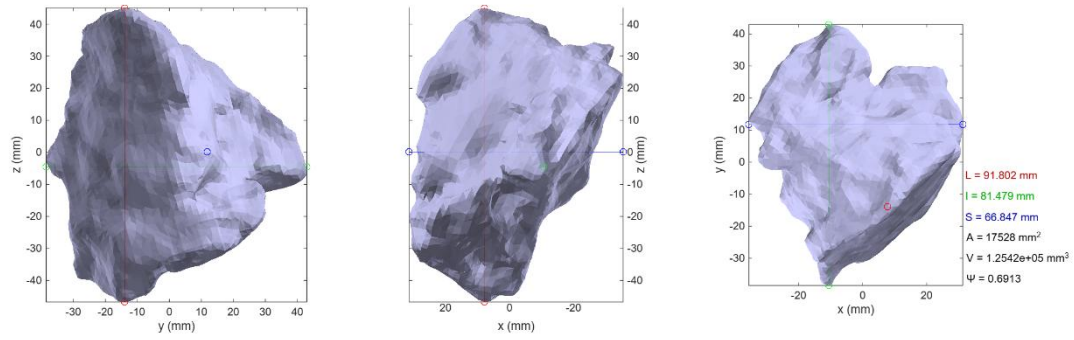

z (mm)
x (mm)

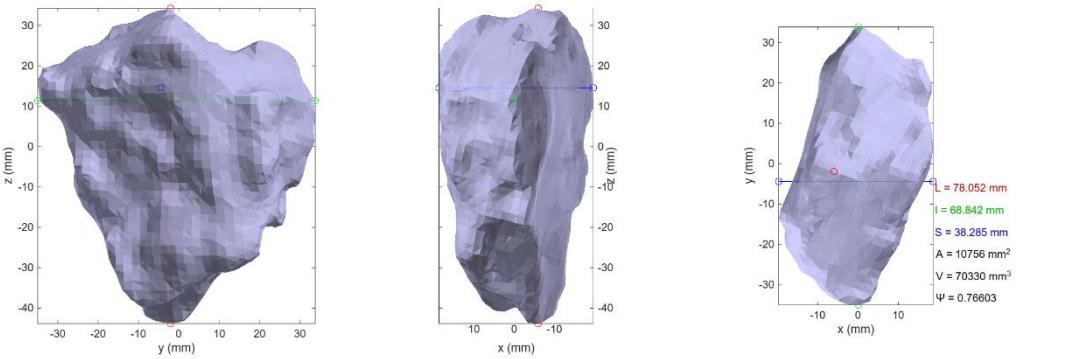

y (mm)
x (mm)
L = 68.96 mm
I = 61.222 mm
S = 44.829 mm
A = 9008.6 mm²
V = 38924 mm³
Ψ = 0.61655

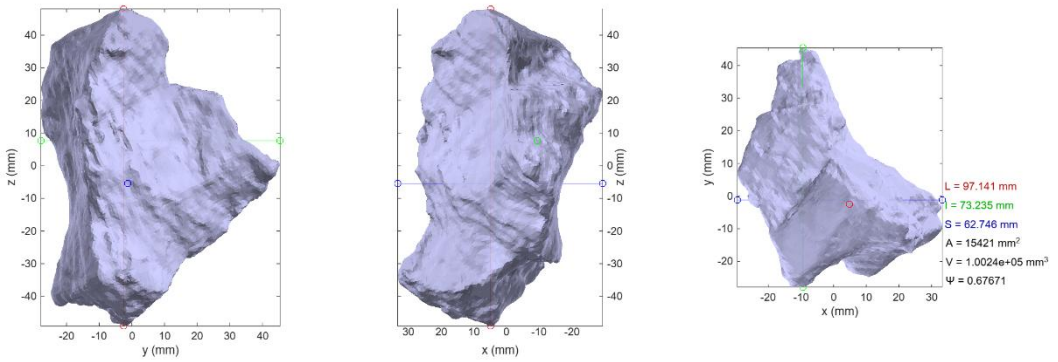

z (mm)
y (mm)

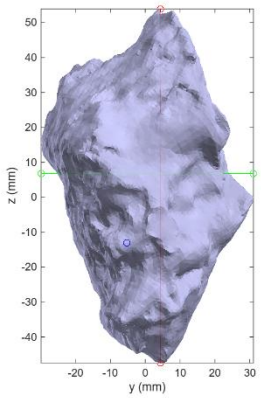

z (mm)
x (mm)

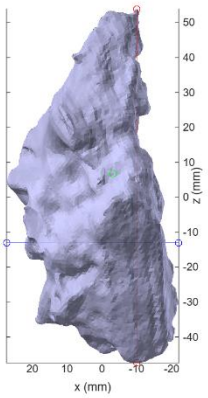

y (mm)
x (mm)
L = 100.16 mm
I = 83.247 mm
S = 72.881 mm
A = 21491 mm²
V = 2.1634e+05 mm³
Ψ = 0.81093

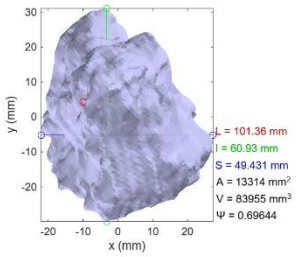

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 91.802 mm
I = 81.479 mm
S = 66.847 mm
A = 17528 mm²
V = 1.2542e+05 mm³
Ψ = 0.6913

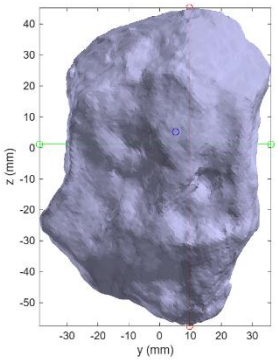

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 78.052 mm
I = 68.842 mm
S = 38.285 mm
A = 10756 mm²
V = 70330 mm³
Ψ = 0.76603

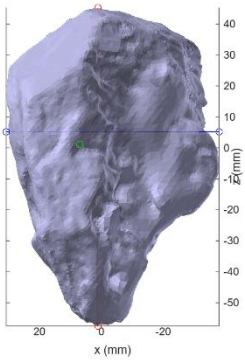

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 97.141 mm
I = 73.235 mm
S = 62.746 mm
A = 15421 mm²
V = 1.0024e+05 mm³
Ψ = 0.67671

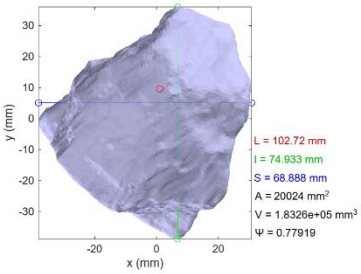

z (mm)
y (mm)

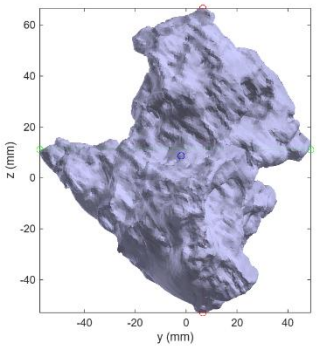

z (mm)
x (mm)

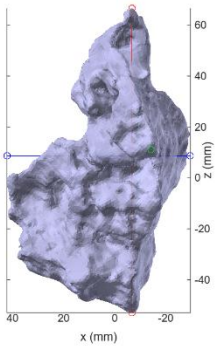

y (mm)
x (mm)
L = 101.36 mm
I = 60.93 mm
S = 49.431 mm
A = 13314 mm²
V = 83955 mm³
Ψ = 0.69644

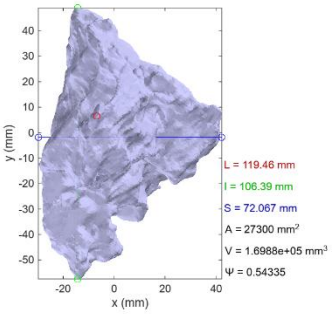

z (mm)
y (mm)

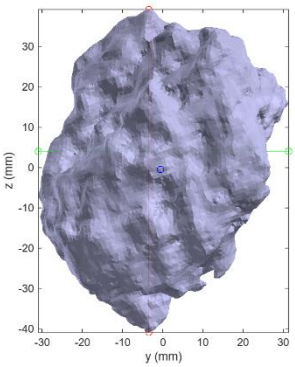

z (mm)
x (mm)

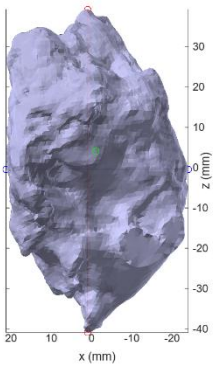

y (mm)
x (mm)
L = 102.72 mm
I = 74.933 mm
S = 68.888 mm
A = 20024 mm²
V = 1.8326e+05 mm³
Ψ = 0.77919

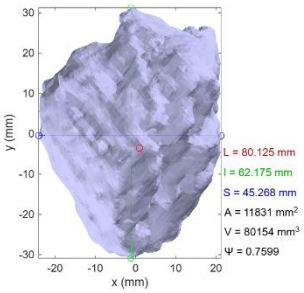

z (mm)
y (mm)

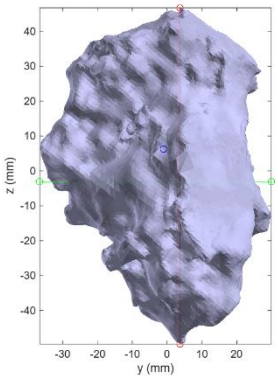

z (mm)
x (mm)

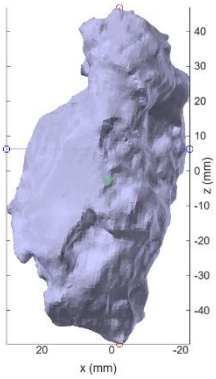

y (mm)
x (mm)
L = 119.46 mm
I = 106.39 mm
S = 72.067 mm
A = 27300 mm²
V = 1.6988e+05 mm³
Ψ = 0.54335

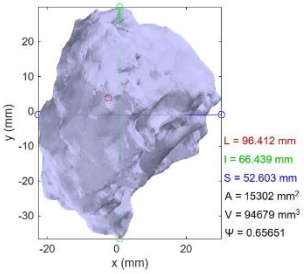

z (mm)
y (mm)


z (mm)
x (mm)

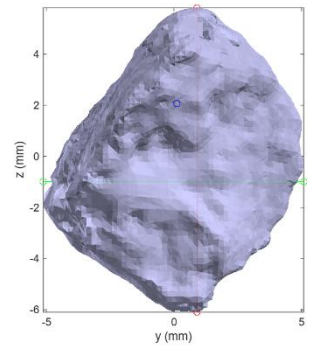

y (mm)
x (mm)
L = 80.125 mm
l = 62.175 mm
S = 45.268 mm
A = 11831 mm²
V = 80154 mm³
Ψ = 0.7599

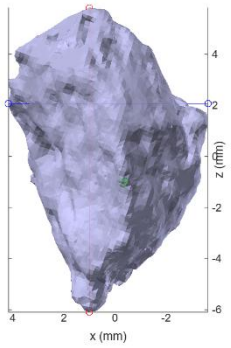

z (mm)
y (mm)

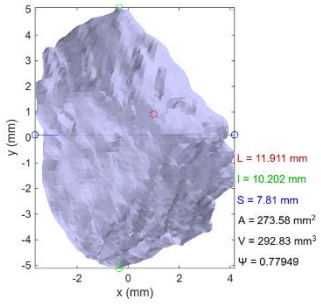

z (mm)
x (mm)

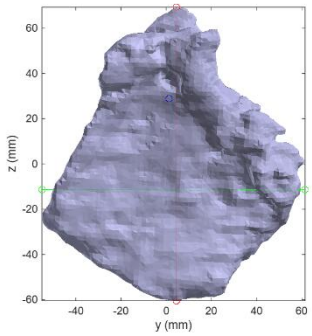

y (mm)
x (mm)
L = 96.412 mm
l = 66.439 mm
S = 52.603 mm
A = 15302 mm²
V = 94679 mm³
Ψ = 0.65651

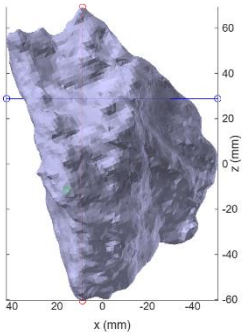
A.2 PARTÍCULAS ORIGINAIS DE ASIC, FRAÇÃO DE 12 MM

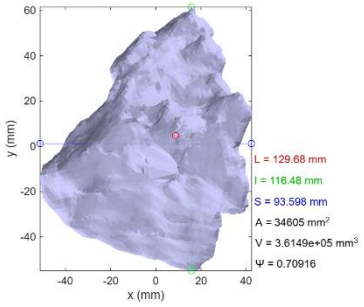


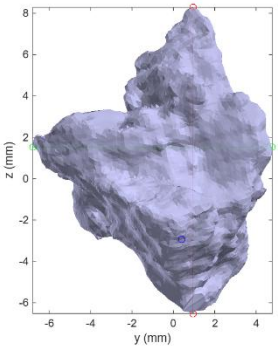


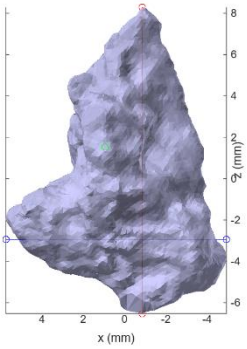


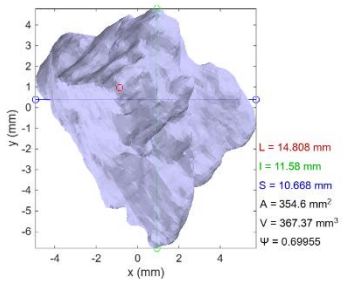


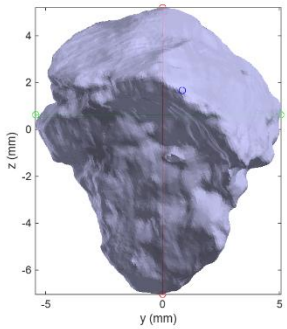


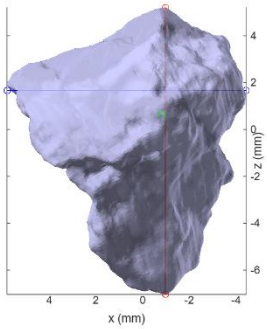


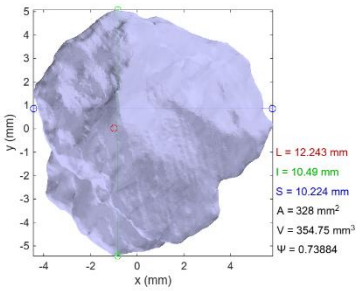


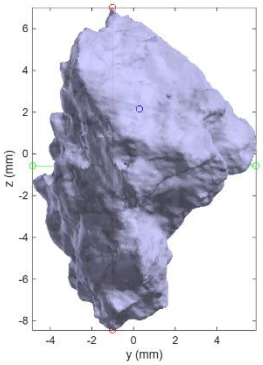


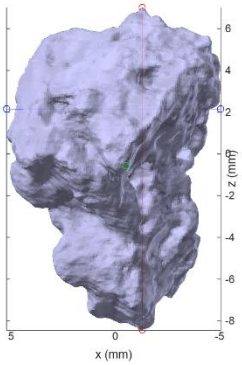


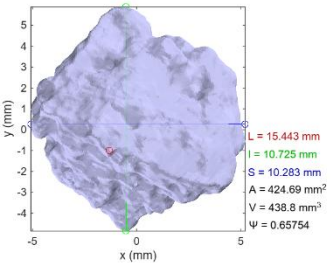

z (mm)
y (mm)

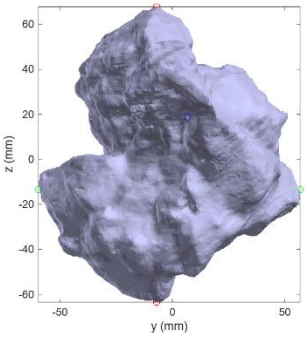

z (mm)
x (mm)

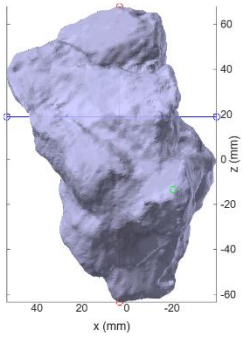

y (mm)
x (mm)
L = 12.243 mm
I = 10.49 mm
S = 10.224 mm
A = 328 mm²
V = 354.75 mm³
Ψ = 0.73884

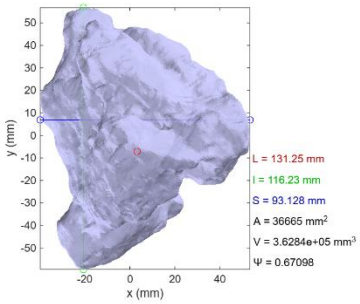

z (mm)
y (mm)

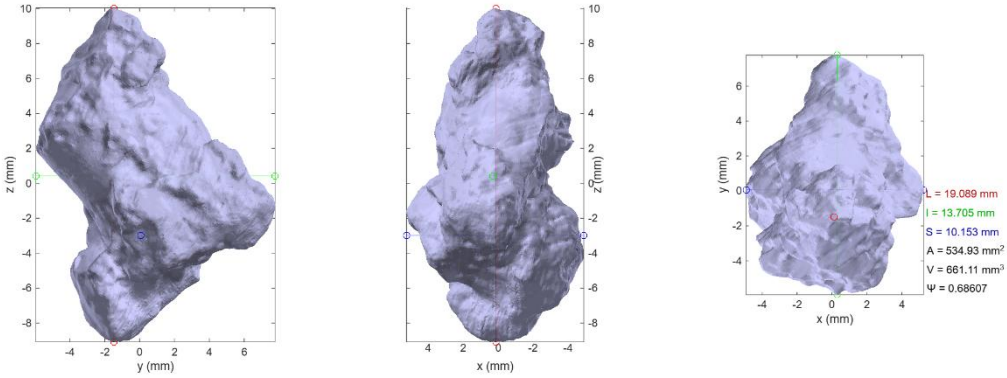

z (mm)
x (mm)

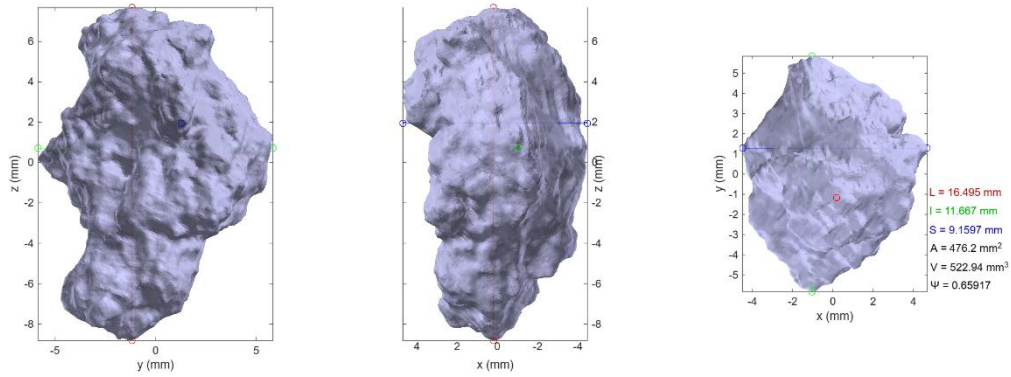

y (mm)
x (mm)
L = 15.443 mm
I = 10.725 mm
S = 10.283 mm
A = 424.69 mm²
V = 438.8 mm³
Ψ = 0.65754

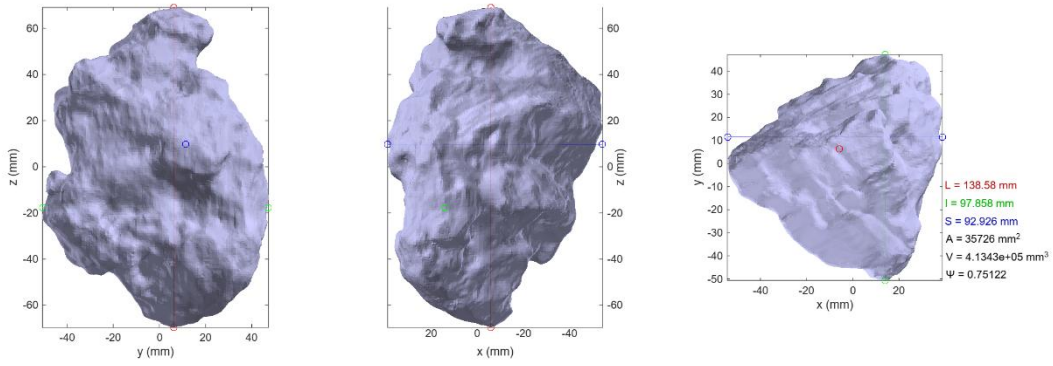

z (mm)
y (mm)

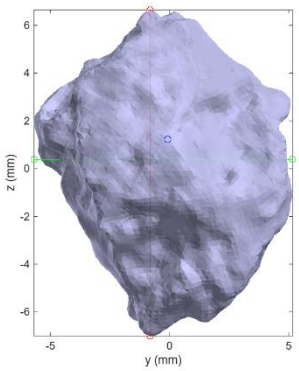

z (mm)
x (mm)

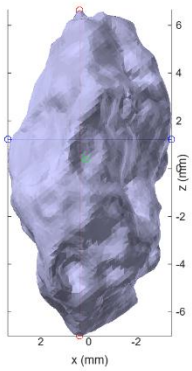

y (mm)
x (mm)
L = 131.25 mm
I = 116.23 mm
S = 93.128 mm
A = 36665 mm²
V = 3.6284e+05 mm³
Ψ = 0.67098

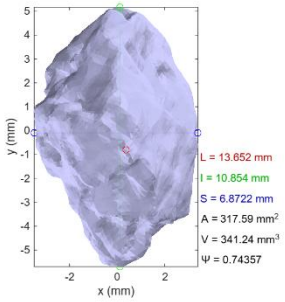

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 19.089 mm
I = 13.705 mm
S = 10.153 mm
A = 534.93 mm²
V = 661.11 mm³
Ψ = 0.68607

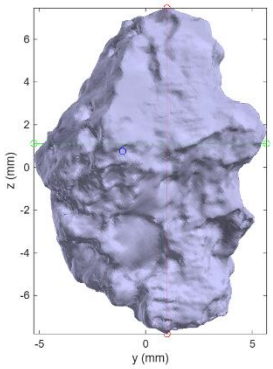

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 16.495 mm
I = 11.667 mm
S = 9.1597 mm
A = 476.2 mm²
V = 522.94 mm³
Ψ = 0.65917

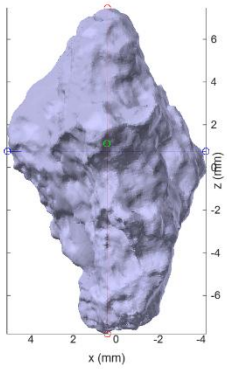

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 138.58 mm
I = 97.858 mm
S = 92.926 mm
A = 35726 mm²
V = 4.1343e+05 mm³
Ψ = 0.75122

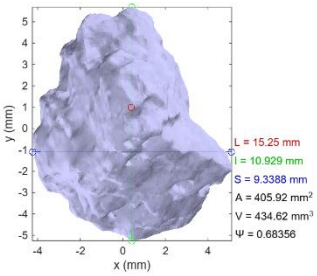

z (mm)
y (mm)

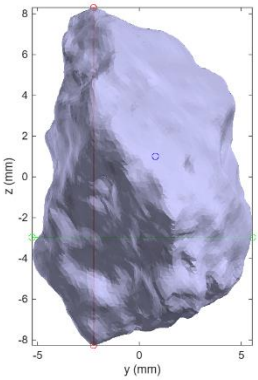

z (mm)
x (mm)

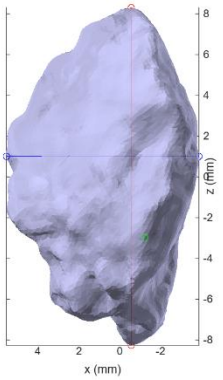

y (mm)
x (mm)
L = 13.652 mm
l = 10.854 mm
S = 6.8722 mm
A = 317.59 mm²
V = 341.24 mm³
Ψ = 0.74357

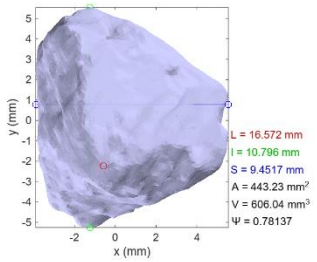

z (mm)
y (mm)

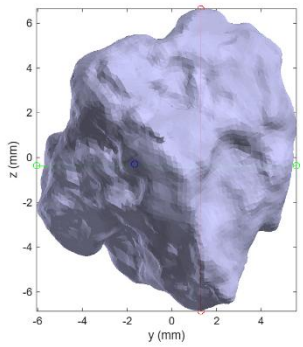

z (mm)
x (mm)

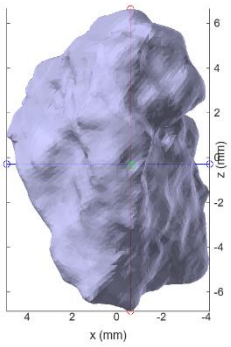

y (mm)
x (mm)
L = 15.25 mm
l = 10.929 mm
S = 9.3388 mm
A = 405.92 mm²
V = 434.62 mm³
Ψ = 0.68356

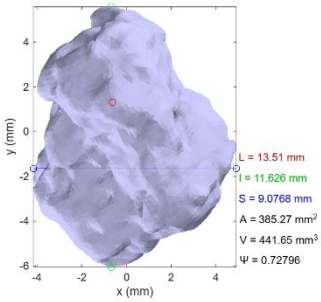

z (mm)
y (mm)

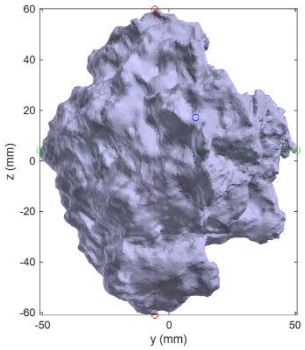

z (mm)
x (mm)

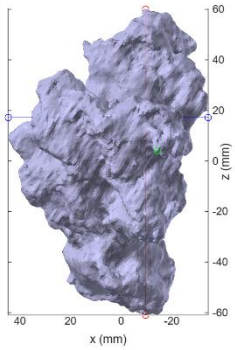

y (mm)
x (mm)
L = 16.572 mm
l = 10.796 mm
S = 9.4517 mm
A = 443.23 mm²
V = 606.04 mm³
Ψ = 0.78137

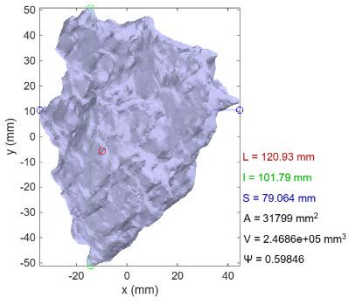

z (mm)
y (mm)

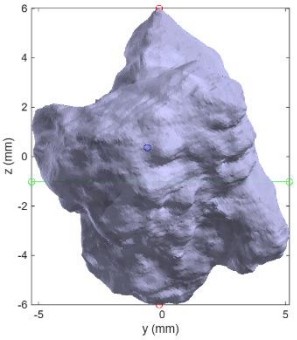

z (mm)
x (mm)

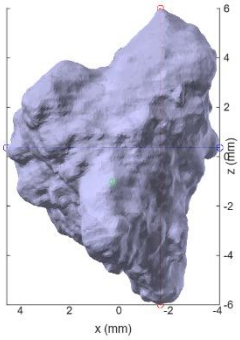

y (mm)
x (mm)
L = 13.51 mm
l = 11.626 mm
S = 9.0768 mm
A = 385.27 mm²
V = 441.65 mm³
Ψ = 0.72796

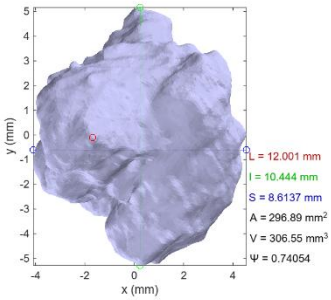

z (mm)
y (mm)

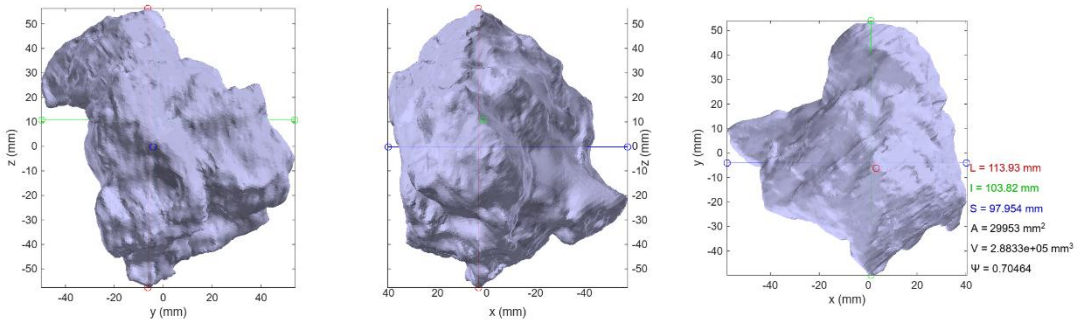

z (mm)
x (mm)

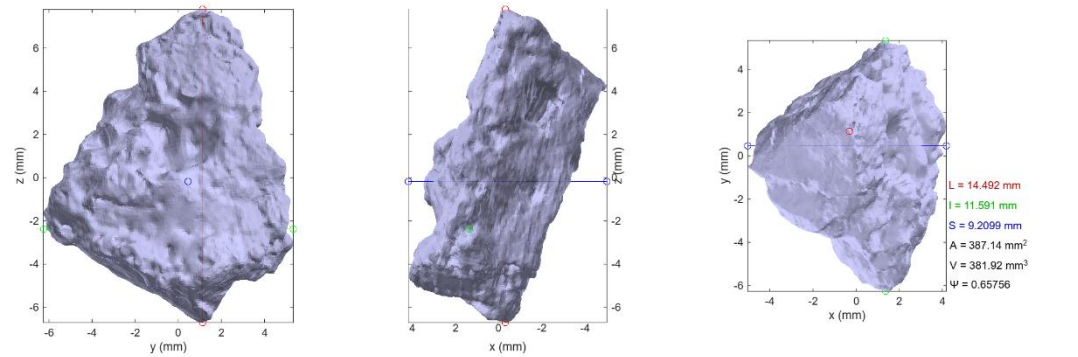

y (mm)
x (mm)
L = 120.93 mm
l = 101.79 mm
S = 79.064 mm
A = 31799 mm²
V = 2.4686e+05 mm³
Ψ = 0.59846

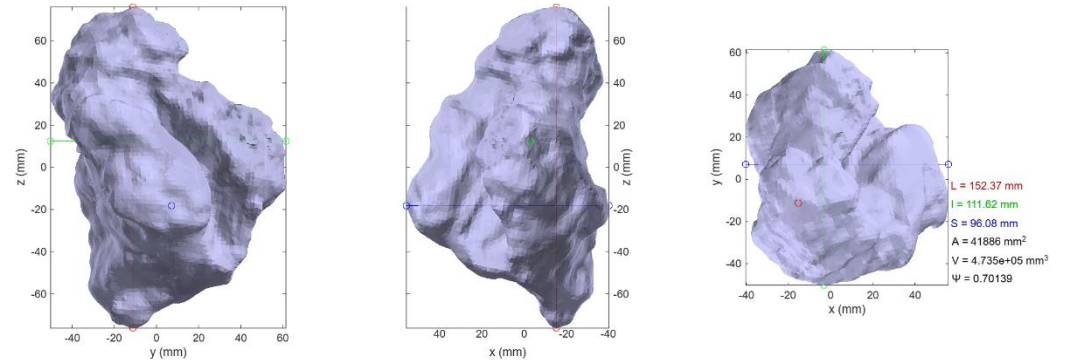

z (mm)
y (mm)

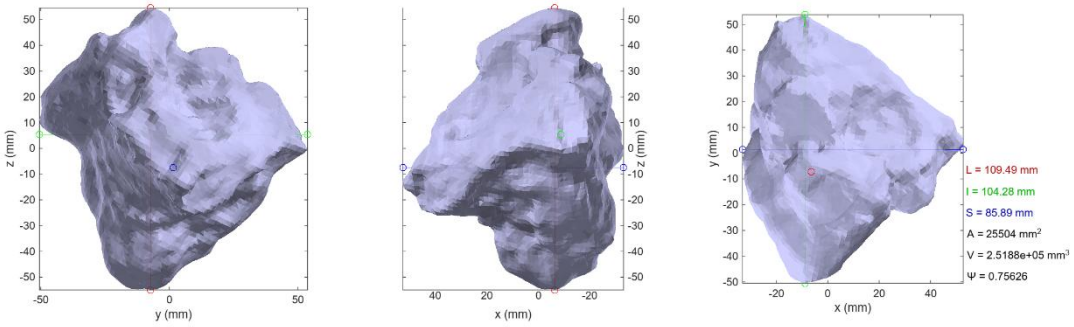

z (mm)
x (mm)

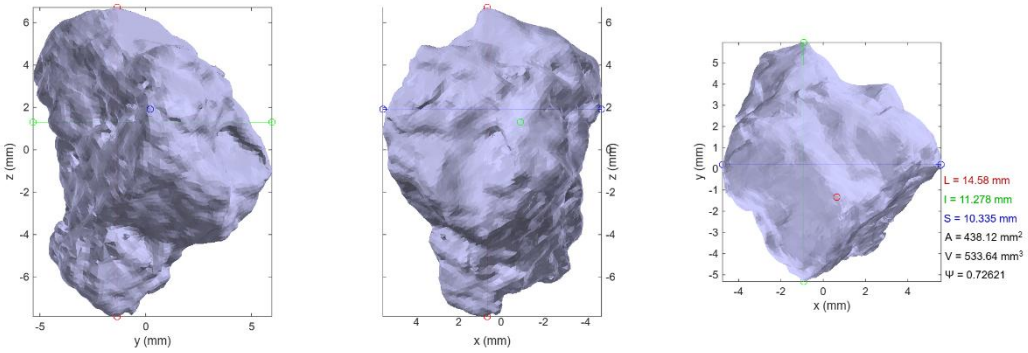

y (mm)
x (mm)
L = 12.001 mm
l = 10.444 mm
S = 8.6137 mm
A = 296.89 mm²
V = 306.55 mm³
Ψ = 0.74054

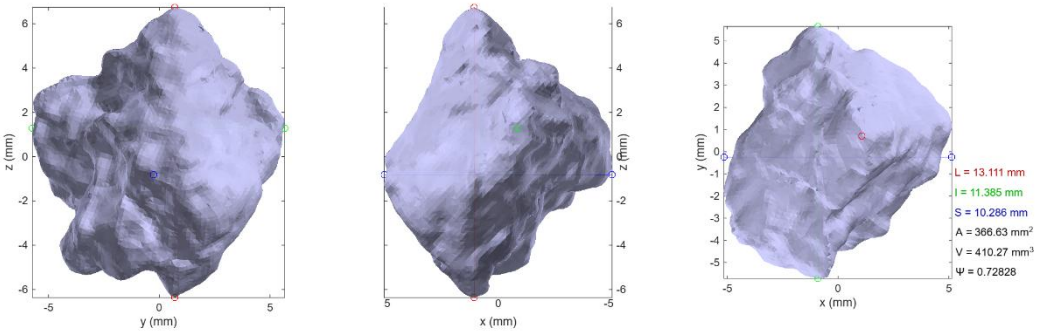

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 113.93 mm
I = 103.82 mm
S = 97.954 mm
A = 29953 mm²
V = 2.8833e+05 mm³
Ψ = 0.70464

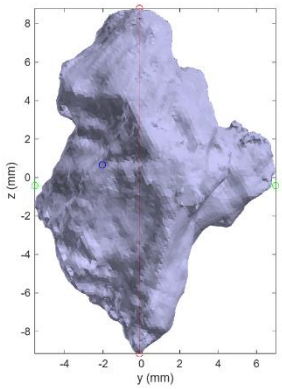

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 14.492 mm
I = 11.591 mm
S = 9.2099 mm
A = 387.14 mm²
V = 381.92 mm³
Ψ = 0.65756

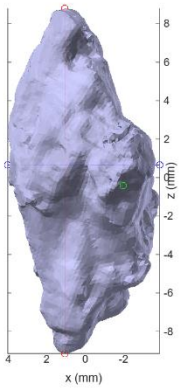

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 152.37 mm
I = 111.62 mm
S = 96.08 mm
A = 41886 mm²
V = 4.735e+05 mm³
Ψ = 0.70139

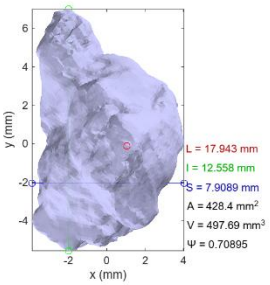

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 109.49 mm
I = 104.28 mm
S = 85.89 mm
A = 25504 mm²
V = 2.5188e+05 mm³
Ψ = 0.75626

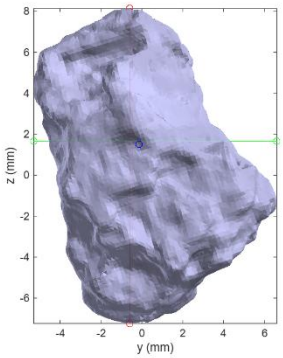

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 14.58 mm
I = 11.278 mm
S = 10.335 mm
A = 438.12 mm²
V = 533.64 mm³
Ψ = 0.72621

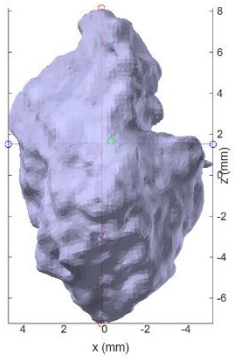

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 13.111 mm
I = 11.385 mm
S = 10.286 mm
A = 366.63 mm²
V = 410.27 mm³
Ψ = 0.72828

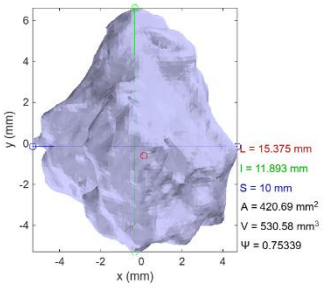

z (mm)
y (mm)

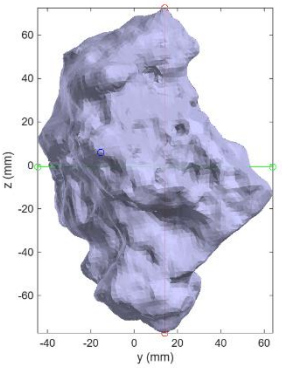

z (mm)
x (mm)

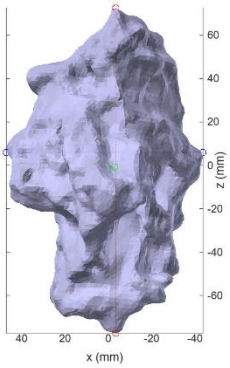

y (mm)
x (mm)
L = 17.943 mm
I = 12.558 mm
S = 7.9089 mm
A = 428.4 mm²
V = 497.69 mm³
Ψ = 0.70895

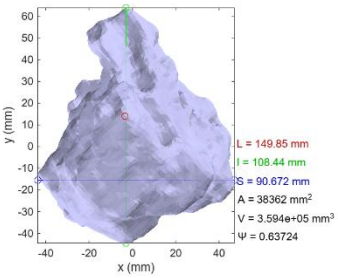

z (mm)
y (mm)

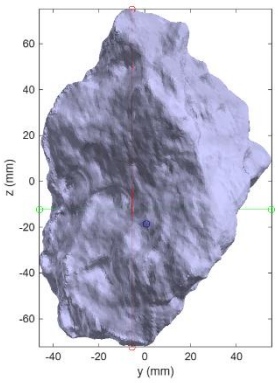

z (mm)
x (mm)

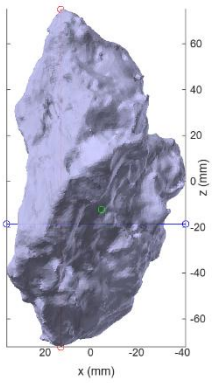

y (mm)
x (mm)
L = 15.375 mm
I = 11.893 mm
S = 10 mm
A = 420.69 mm²
V = 530.58 mm³
Ψ = 0.75339

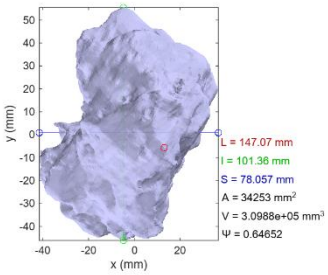

z (mm)
y (mm)

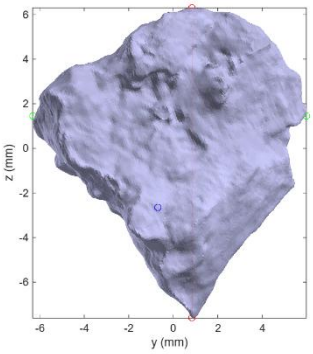

z (mm)
x (mm)

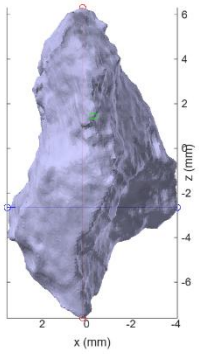

y (mm)
x (mm)
L = 149.85 mm
I = 108.44 mm
S = 90.672 mm
A = 38362 mm²
V = 3.594e+05 mm³
Ψ = 0.63724

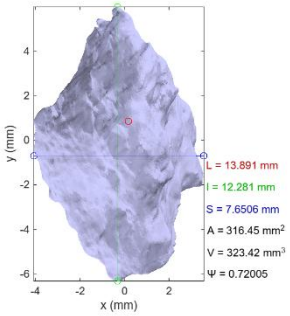

z (mm)
y (mm)

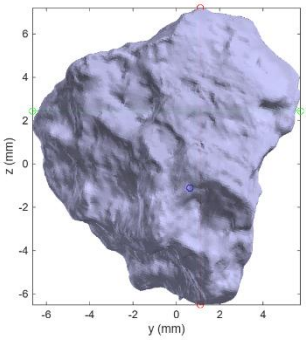

z (mm)
x (mm)

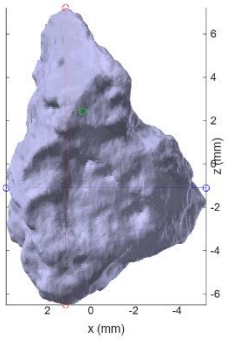

y (mm)
x (mm)
L = 147.07 mm
I = 101.36 mm
S = 78.057 mm
A = 34253 mm²
V = 3.0988e+05 mm³
Ψ = 0.64652

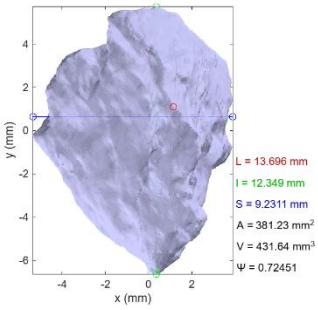

z (mm)
y (mm)

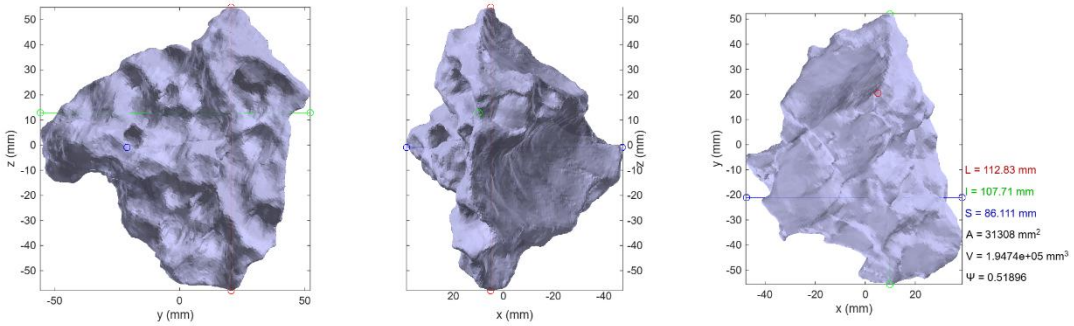

z (mm)
x (mm)

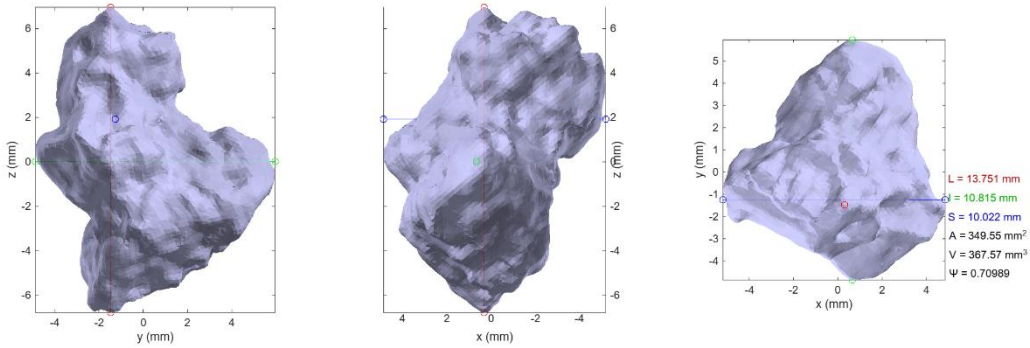

y (mm)
x (mm)
L = 13.891 mm
I = 12.281 mm
S = 7.6506 mm
A = 316.45 mm²
V = 323.42 mm³
Ψ = 0.72005

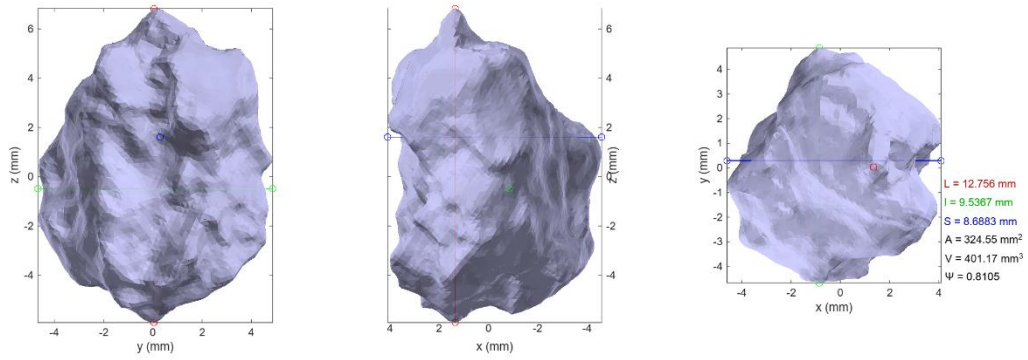

z (mm)
y (mm)

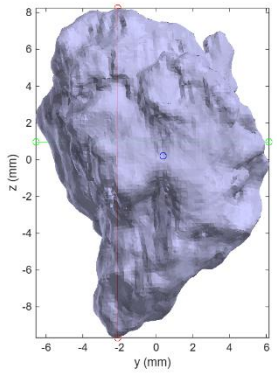

z (mm)
x (mm)

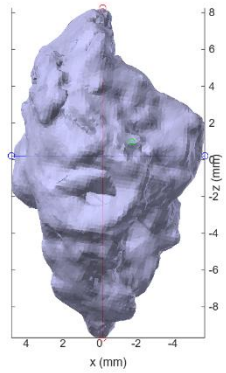

y (mm)
x (mm)
L = 13.696 mm
I = 12.349 mm
S = 9.2311 mm
A = 381.23 mm²
V = 431.64 mm³
Ψ = 0.72451

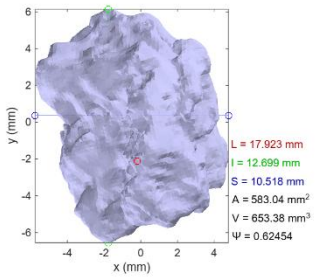

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 112.83 mm
I = 107.71 mm
S = 86.111 mm
A = 31308 mm²
V = 1.9474e+05 mm³
Ψ = 0.51896

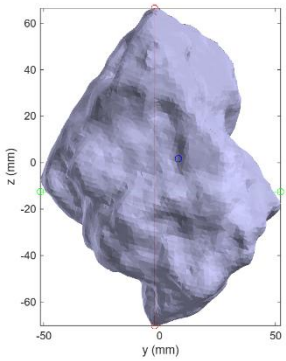

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 13.751 mm
I = 10.815 mm
S = 10.022 mm
A = 349.55 mm²
V = 367.57 mm³
Ψ = 0.70989

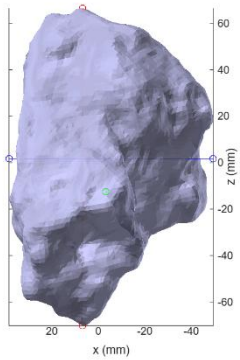

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 12.756 mm
I = 9.5367 mm
S = 8.6883 mm
A = 324.55 mm²
V = 401.17 mm³
Ψ = 0.8105

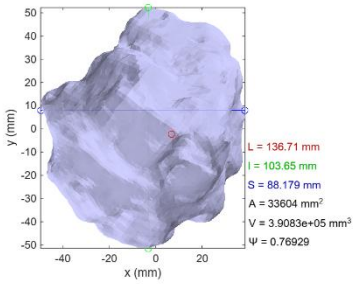

z (mm)
y (mm)

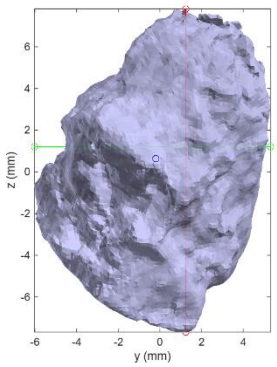

z (mm)
x (mm)

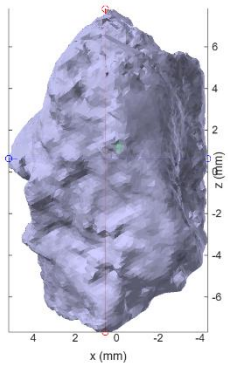

y (mm)
x (mm)
L = 17.923 mm
I = 12.699 mm
S = 10.518 mm
A = 583.04 mm²
V = 653.38 mm³
Ψ = 0.62454

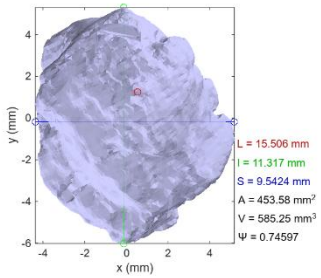

z (mm)
y (mm)

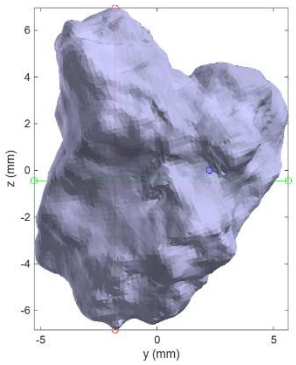

z (mm)
x (mm)

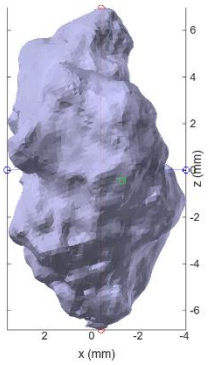

y (mm)
x (mm)
L = 136.71 mm
I = 103.65 mm
S = 88.179 mm
A = 33604 mm²
V = 3.9083e+05 mm³
Ψ = 0.76929

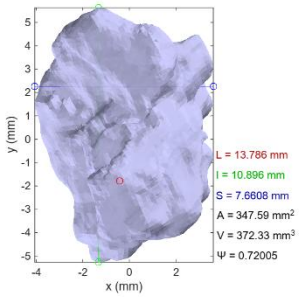

z (mm)
y (mm)

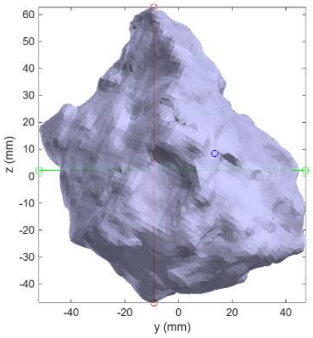

z (mm)
x (mm)

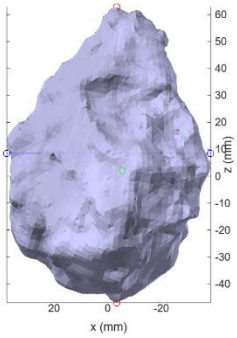

y (mm)
x (mm)
L = 15.506 mm
I = 11.317 mm
S = 9.5424 mm
A = 453.58 mm²
V = 585.25 mm³
Ψ = 0.74597

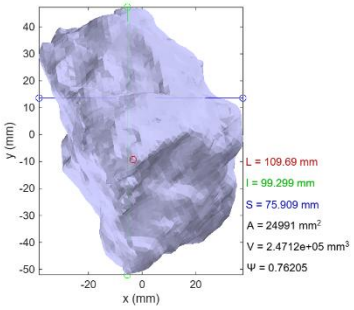

z (mm)
y (mm)

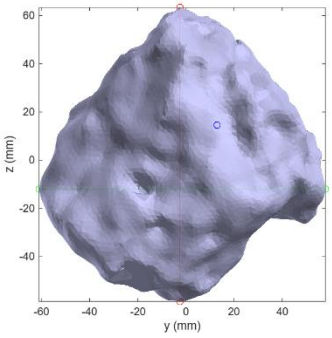

z (mm)
x (mm)

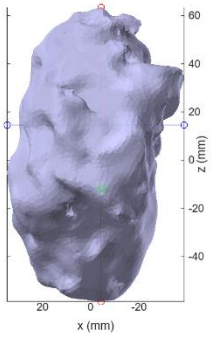

y (mm)
x (mm)
L = 13.786 mm
l = 10.896 mm
S = 7.6608 mm
A = 347.59 mm²
V = 372.33 mm³
Ψ = 0.72005

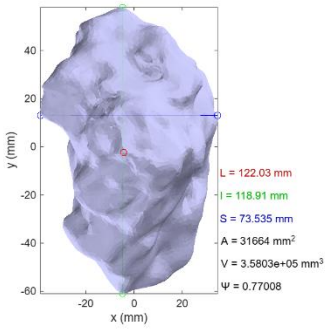

z (mm)
y (mm)

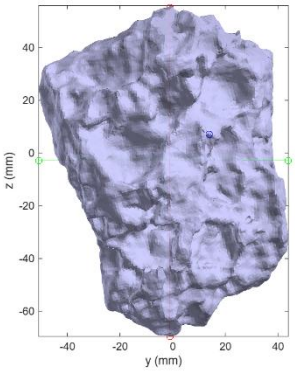

z (mm)
x (mm)

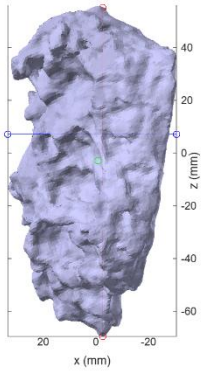

y (mm)
x (mm)
L = 109.69 mm
l = 99.299 mm
S = 75.909 mm
A = 24991 mm²
V = 2.4712e+05 mm³
Ψ = 0.76205

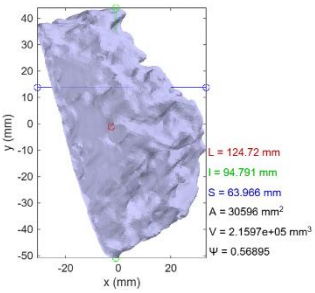

z (mm)
y (mm)

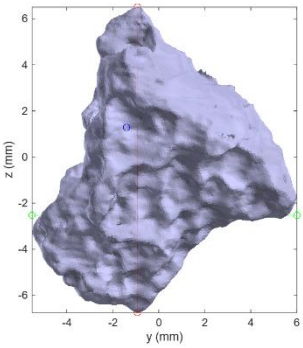

z (mm)
x (mm)

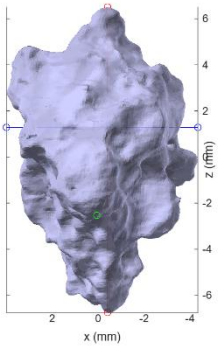

y (mm)
x (mm)
L = 122.03 mm
l = 118.91 mm
S = 73.535 mm
A = 31664 mm²
V = 3.5803e+05 mm³
Ψ = 0.77008

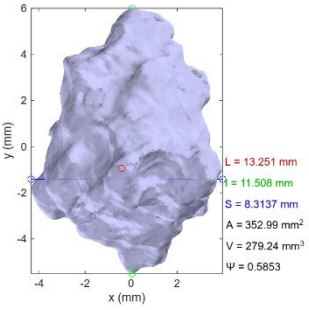

z (mm)
y (mm)

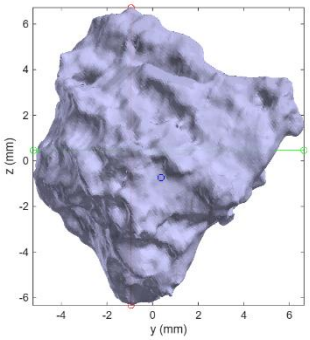

z (mm)
x (mm)

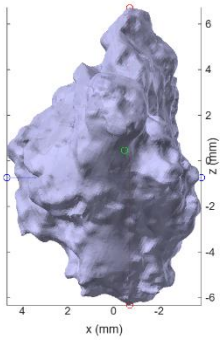

y (mm)
x (mm)
L = 124.72 mm
I = 94.791 mm
S = 63.966 mm
A = 30596 mm²
V = 2.1597e+05 mm³
Ψ = 0.56895

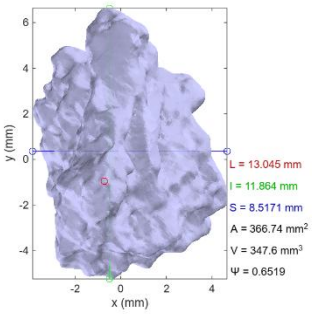

z (mm)
y (mm)

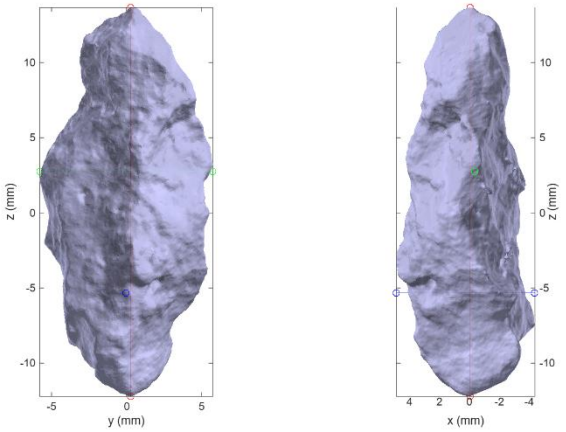

z (mm)
x (mm)

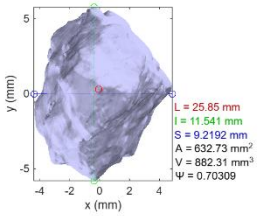

y (mm)
x (mm)
L = 13.251 mm
I = 11.508 mm
S = 8.3137 mm
A = 352.99 mm²
V = 279.24 mm³
Ψ = 0.5853

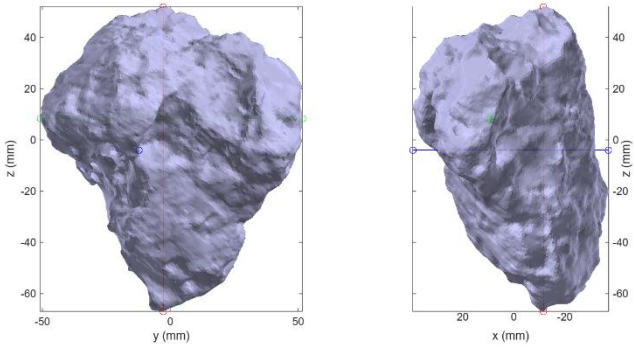

z (mm)
y (mm)

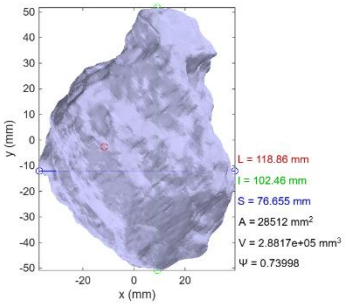

z (mm)
x (mm)

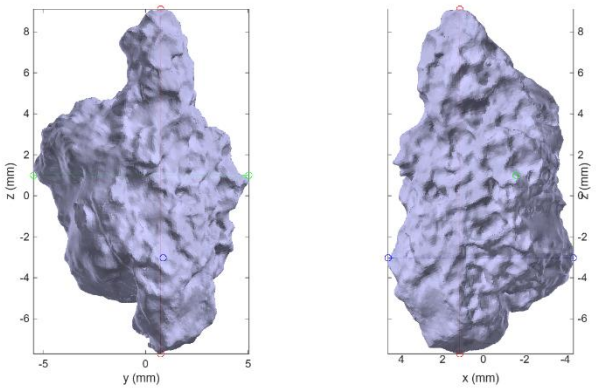

y (mm)
x (mm)
L = 13.045 mm
I = 11.864 mm
S = 8.5171 mm
A = 366.74 mm²
V = 347.6 mm³
Ψ = 0.6519

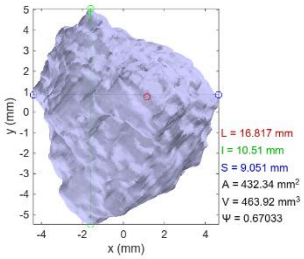

z (mm)
y (mm)
x (mm)

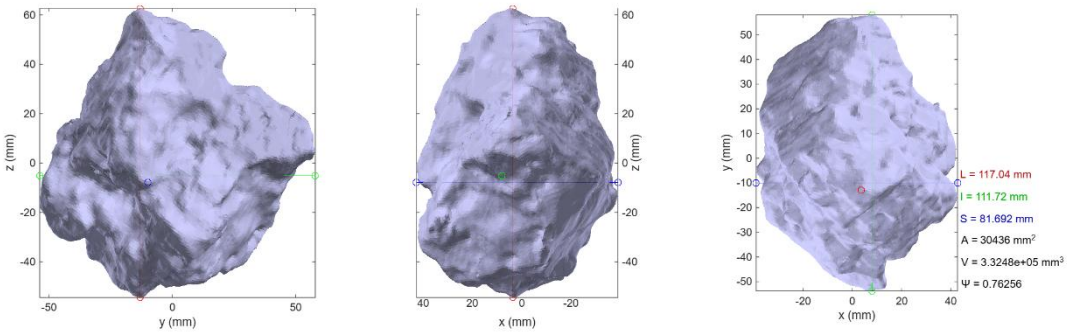

y (mm)
x (mm)
L = 25.85 mm
l = 11.541 mm
S = 9.2192 mm
A = 632.73 mm²
V = 882.31 mm³
Ψ = 0.70309

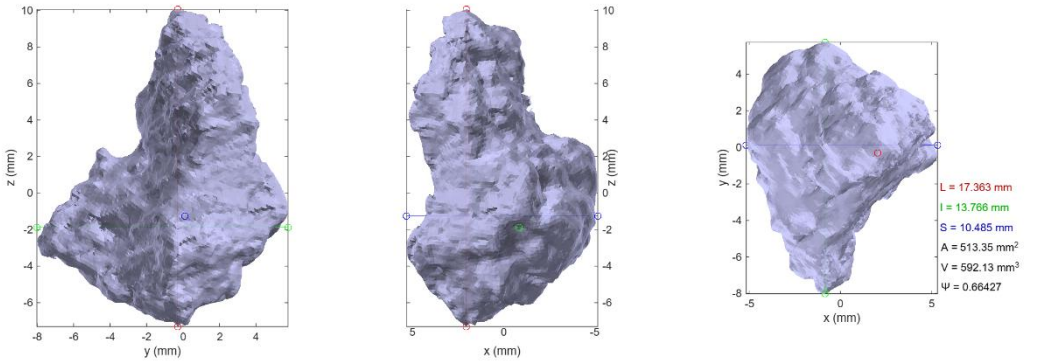

z (mm)
y (mm)
x (mm)

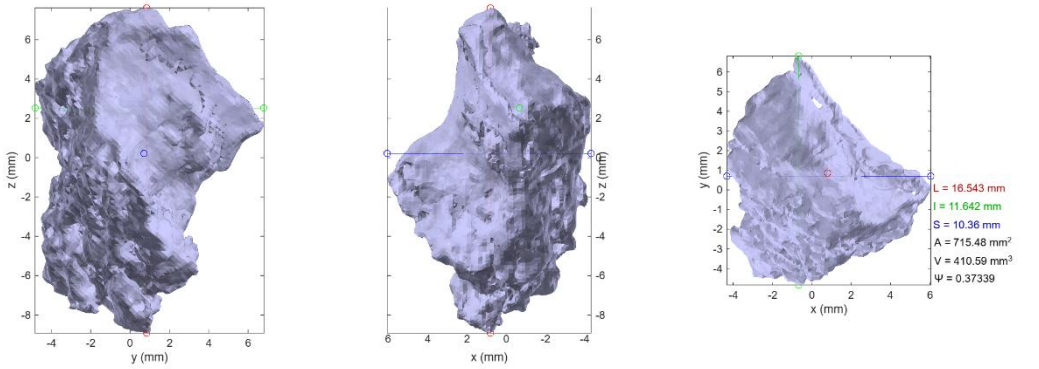

y (mm)
x (mm)
L = 118.86 mm
l = 102.46 mm
S = 76.655 mm
A = 28512 mm²
V = 2.8817e+05 mm³
Ψ = 0.73998

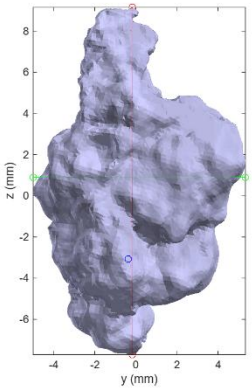

z (mm)
y (mm)
x (mm)

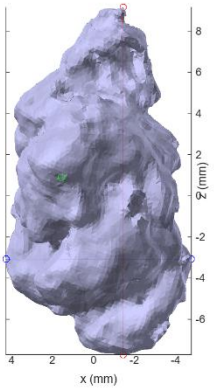

y (mm)
x (mm)
L = 16.817 mm
l = 10.51 mm
S = 9.051 mm
A = 432.34 mm²
V = 463.92 mm³
Ψ = 0.67033

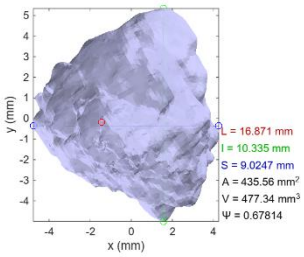

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 117.04 mm
I = 111.72 mm
S = 81.692 mm
A = 30436 mm²
V = 3.3248e+05 mm³
Ψ = 0.76256

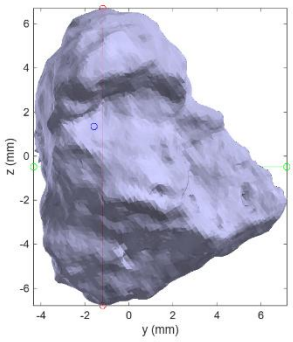

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 17.363 mm
I = 13.766 mm
S = 10.485 mm
A = 513.35 mm²
V = 592.13 mm³
Ψ = 0.66427

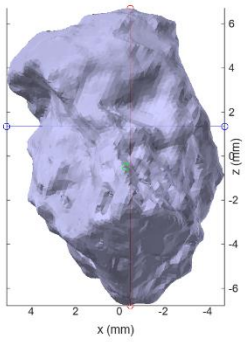

z (mm)
y (mm)
x (mm)
L = 16.543 mm
I = 11.642 mm
S = 10.36 mm
A = 715.48 mm²
V = 410.59 mm³
Ψ = 0.37339

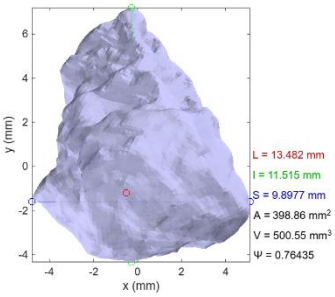

z (mm)
y (mm)

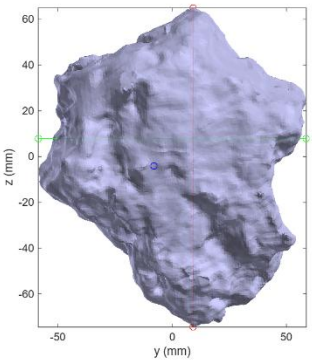

z (mm)
x (mm)

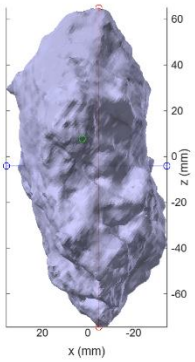

y (mm)
x (mm)
L = 16.871 mm
I = 10.335 mm
S = 9.0247 mm
A = 435.56 mm²
V = 477.34 mm³
Ψ = 0.67814

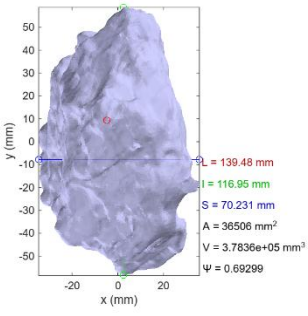

z (mm)
y (mm)

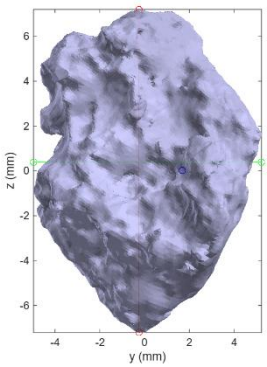

z (mm)
x (mm)

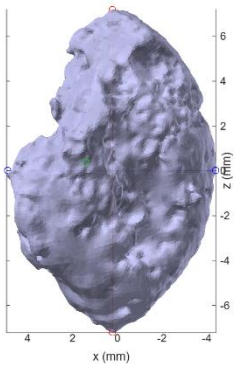

y (mm)
x (mm)
L = 13.482 mm
I = 11.515 mm
S = 9.8977 mm
A = 398.86 mm²
V = 500.55 mm³
Ψ = 0.76435

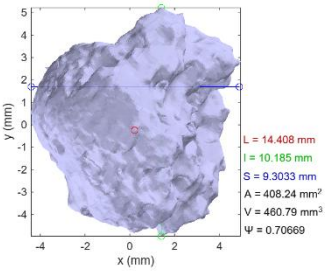

z (mm)
y (mm)

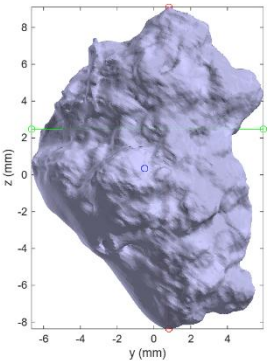

z (mm)
x (mm)

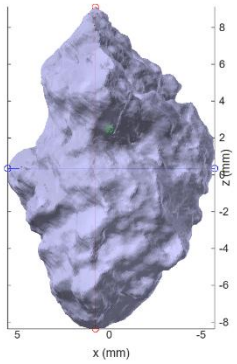

y (mm)
x (mm)
L = 139.48 mm
I = 116.95 mm
S = 70.231 mm
A = 36506 mm²
V = 3.7836e+05 mm³
Ψ = 0.69299

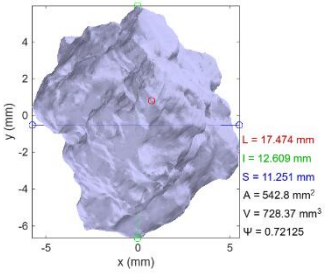

z (mm)
y (mm)

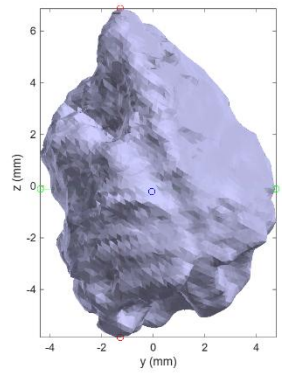

z (mm)
x (mm)

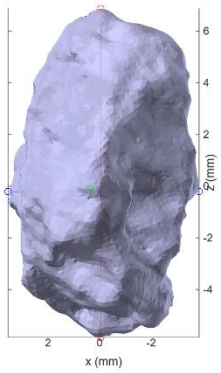

y (mm)
x (mm)
L = 14.408 mm
I = 10.185 mm
S = 9.3033 mm
A = 408.24 mm²
V = 460.79 mm³
Ψ = 0.70669

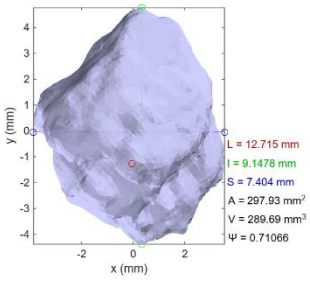

z (mm)
y (mm)

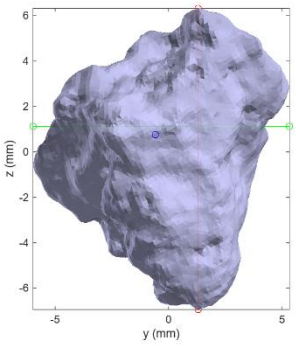

z (mm)
x (mm)

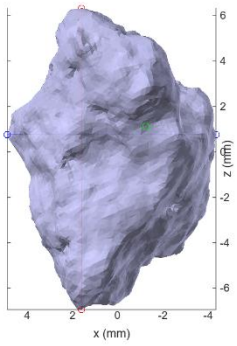

y (mm)
x (mm)
L = 17.474 mm
I = 12.609 mm
S = 11.251 mm
A = 542.8 mm²
V = 728.37 mm³
Ψ = 0.72125

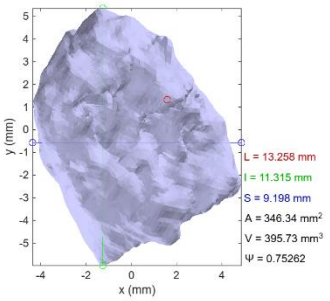

z (mm)
y (mm)


z (mm)
x (mm)

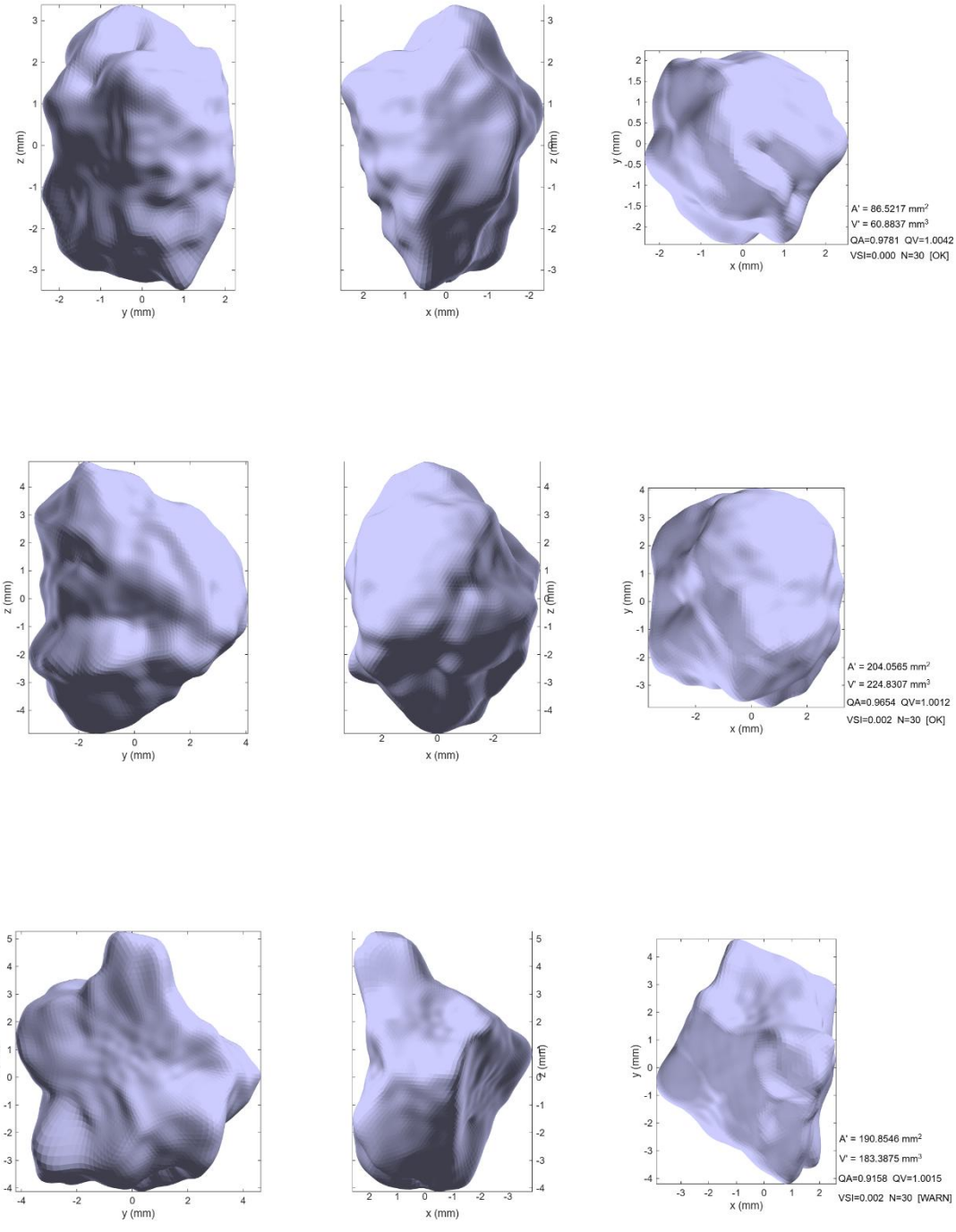

y (mm)
x (mm)
L = 12.715 mm
I = 9.1478 mm
S = 7.404 mm
A = 297.93 mm²
V = 289.69 mm³
Ψ = 0.71066

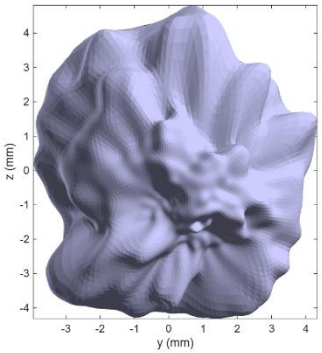

z (mm)
y (mm)

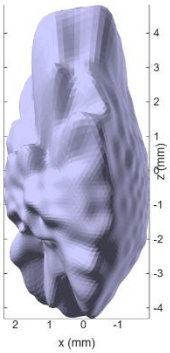

z (mm)
x (mm)

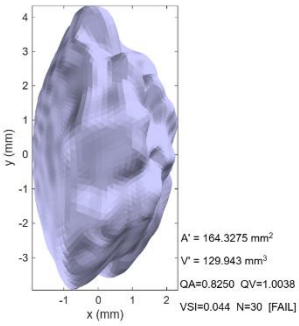

y (mm)
x (mm)
L = 13.258 mm
I = 11.315 mm
S = 9.198 mm
A = 346.34 mm²
V = 395.73 mm³
Ψ = 0.75262

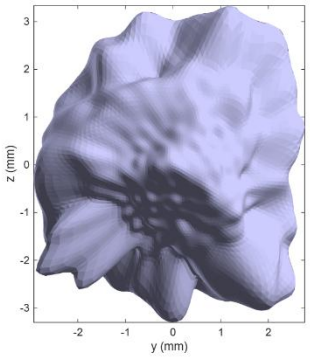
A.3 PARTÍCULAS DE ASIC RECONSTRUÍDAS POR HARMÓNICAS ESFÉRICAS, FRAÇÃO DE 8 MM

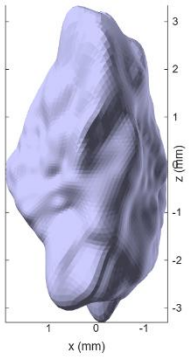


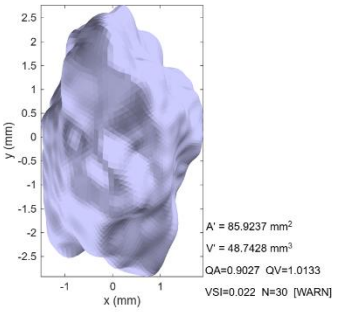

z (mm)
y (mm)

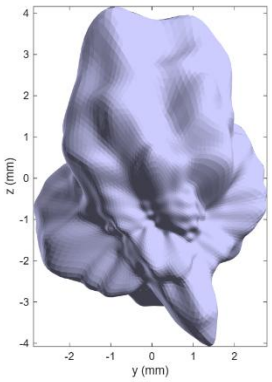

z (mm)
x (mm)

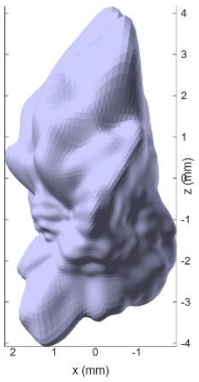

y (mm)
x (mm)
A' = 164.3275 mm²
V' = 129.943 mm³
QA=0.8250 QV=1.0038
VSI=0.044 N=30 [FAIL]

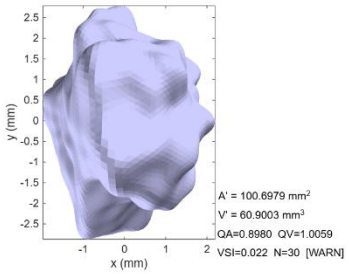

z (mm)
y (mm)

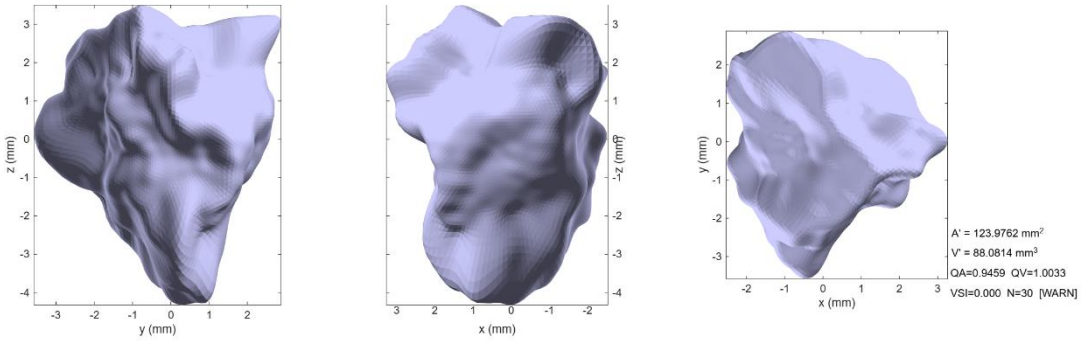

z (mm)
x (mm)

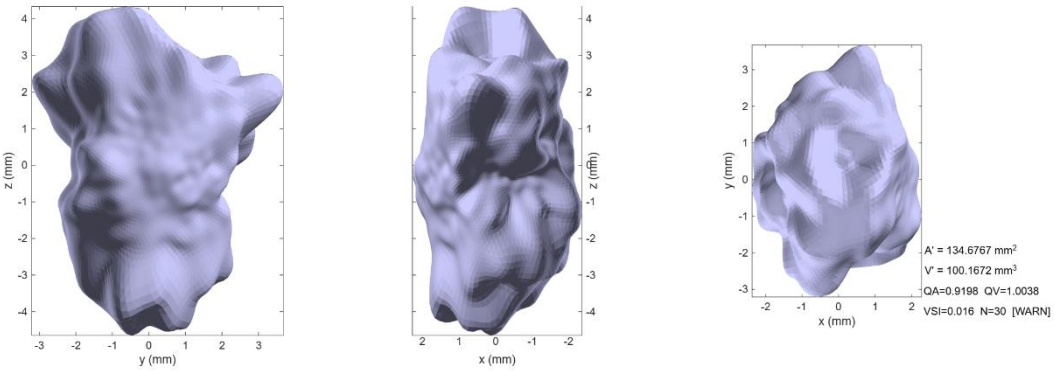

y (mm)
x (mm)
A' = 85.9237 mm²
V' = 48.7428 mm³
QA=0.9027 QV=1.0133
VSI=0.022 N=30 [WARN]

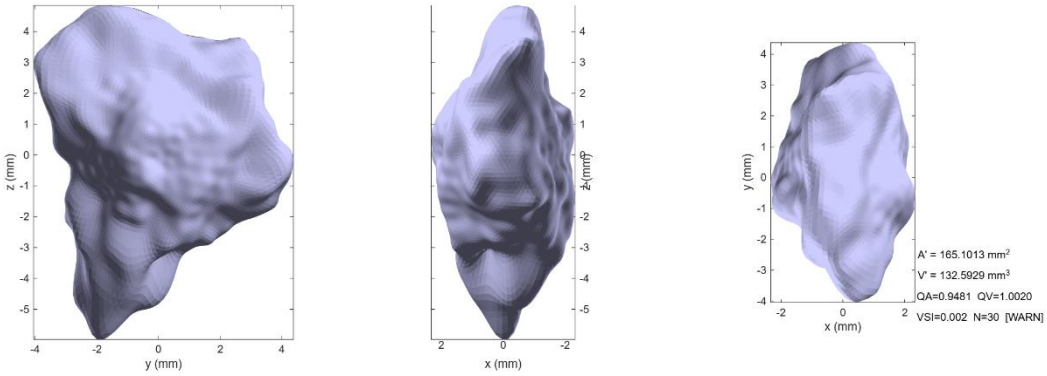

z (mm)
y (mm)

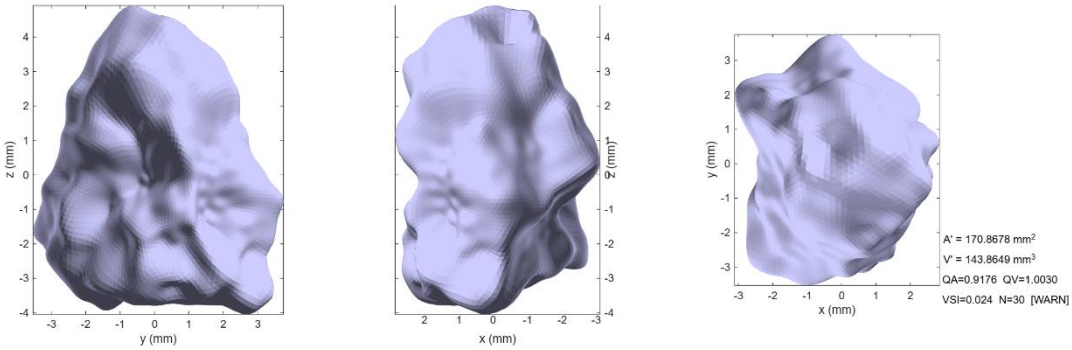

z (mm)
x (mm)

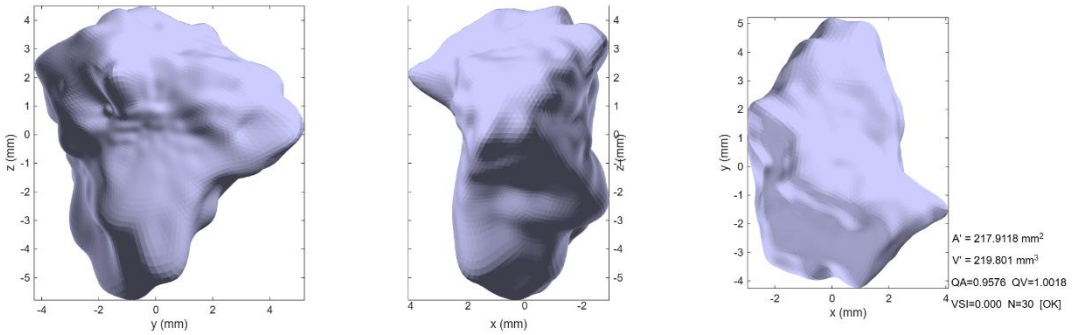

y (mm)
x (mm)
A' = 100.6979 mm²
V' = 60.9003 mm³
QA=0.8980 QV=1.0059
VSI=0.022 N=30 [WARN]

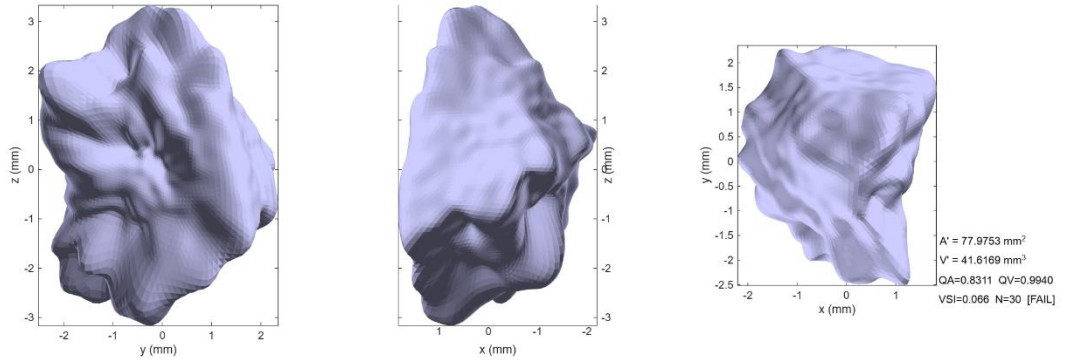

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 123.9762 mm²
V' = 88.0814 mm³
QA=0.9459 QV=1.0033
VSI=0.000 N=30 [WARN]

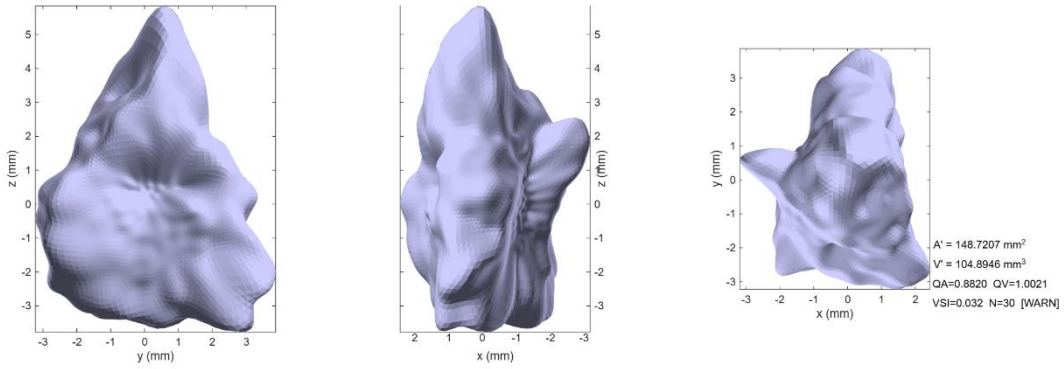

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 134.6767 mm²
V' = 100.1672 mm³
QA=0.9198 QV=1.0038
VSI=0.016 N=30 [WARN]

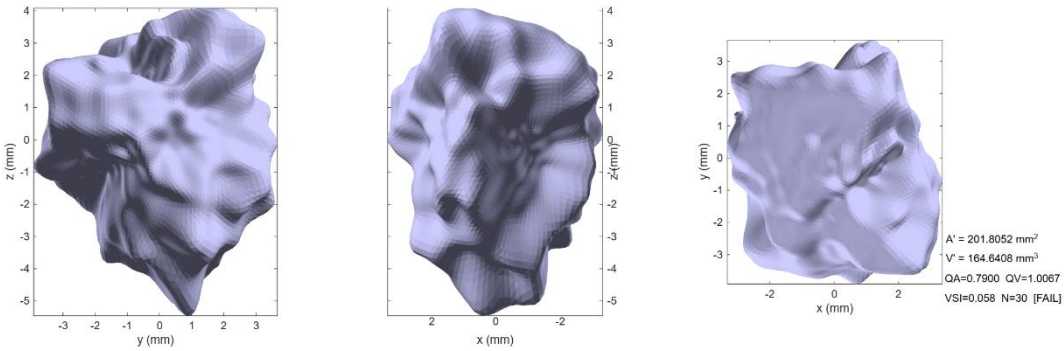

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 165.1013 mm²
V' = 132.5929 mm³
QA=0.9481 QV=1.0020
VSI=0.002 N=30 [WARN]

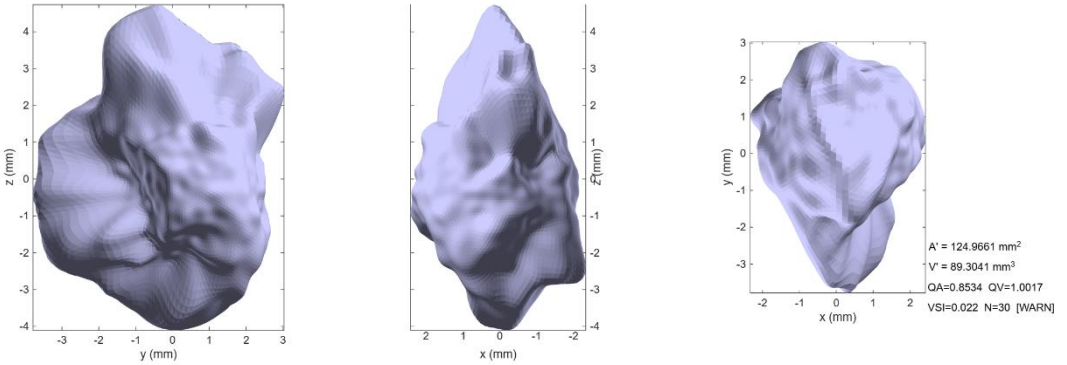

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 170.8678 mm²
V' = 143.8649 mm³
QA=0.9176 QV=1.0030
VSI=0.024 N=30 [WARN]

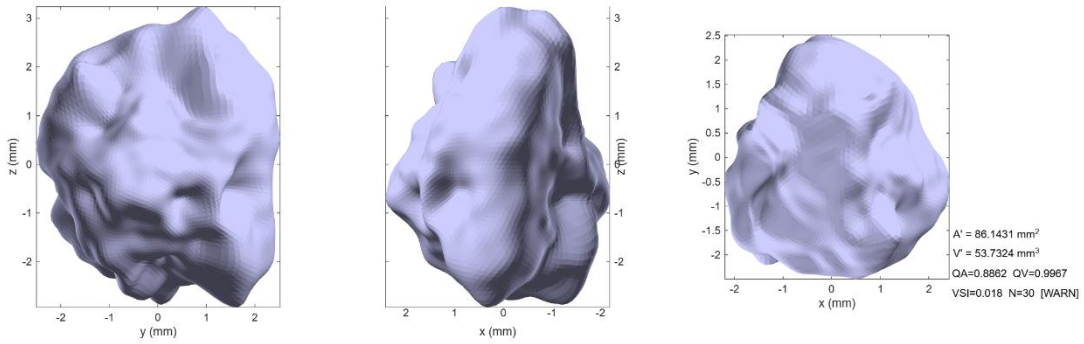

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 217.9118 mm²
V' = 219.801 mm³
QA=0.9576 QV=1.0018
VSI=0.000 N=30 [OK]

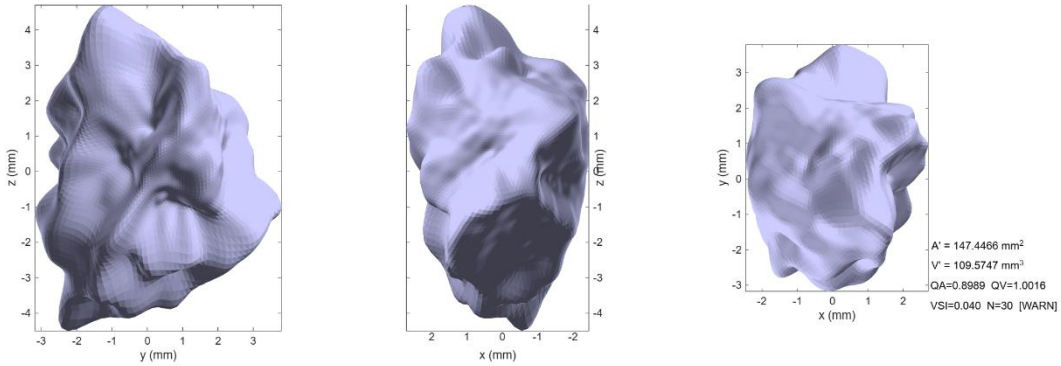

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 77.9753 mm²
V' = 41.6169 mm³
QA=0.8311 QV=0.9940
VSI=0.066 N=30 [FAIL]

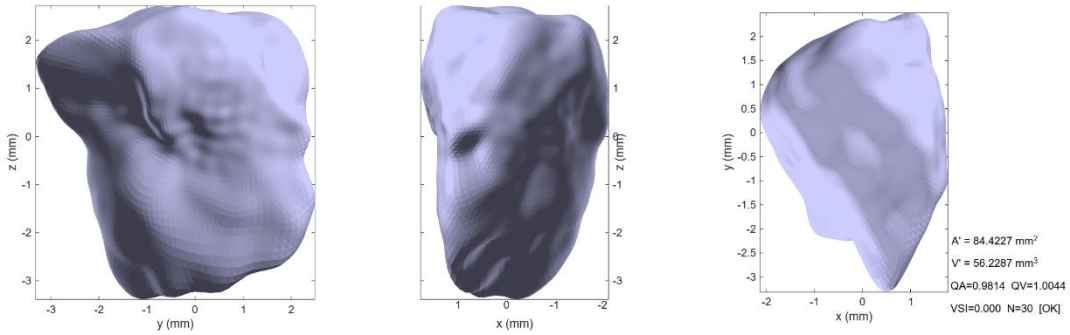

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 148.7207 mm²
V' = 104.8946 mm³
QA=0.8820 QV=1.0021
VSI=0.032 N=30 [WARN]

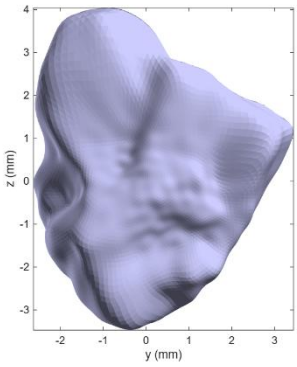

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 201.8052 mm²
V' = 164.6408 mm³
QA=0.7900 QV=1.0067
VSI=0.058 N=30 [FAIL]

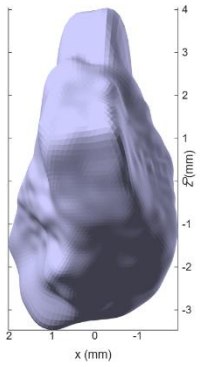

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 124.9661 mm²
V' = 89.3041 mm³
QA=0.8534 QV=1.0017
VSI=0.022 N=30 [WARN]

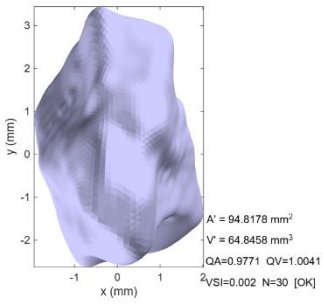

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 86.1431 mm²
V' = 53.7324 mm³
QA=0.8862 QV=0.9967
VSI=0.018 N=30 [WARN]

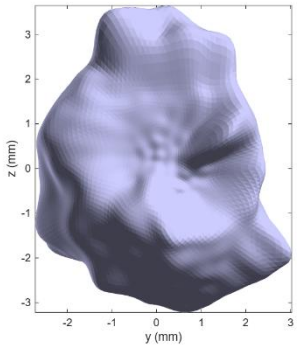

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 147.4466 mm²
V' = 109.5747 mm³
QA=0.8989 QV=1.0016
VSI=0.040 N=30 [WARN]

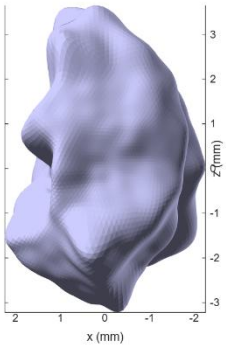

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 84.4227 mm²
V' = 56.2287 mm³
QA=0.9814 QV=1.0044
VSI=0.000 N=30 [OK]

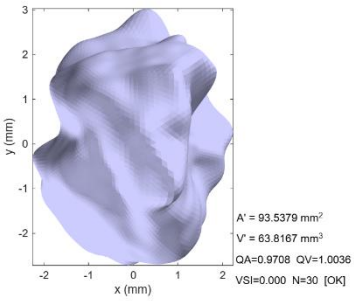

z (mm)
y (mm)

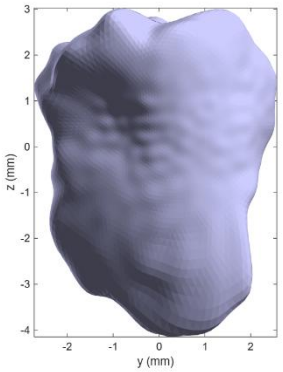

z (mm)
x (mm)

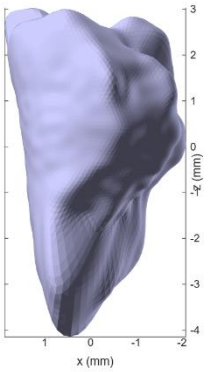

y (mm)
x (mm)
A' = 94.8178 mm²
V' = 64.8458 mm³
QA=0.9771 QV=1.0041
VSI=0.002 N=30 [OK]

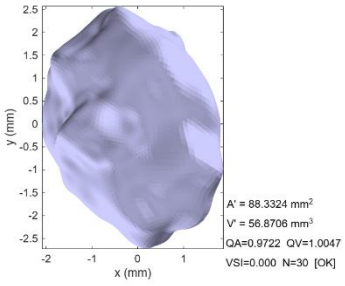

z (mm)
y (mm)

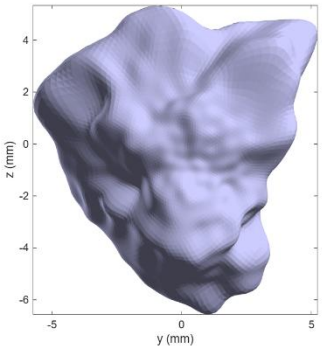

z (mm)
x (mm)

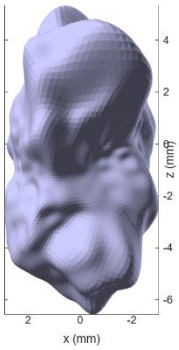

y (mm)
x (mm)
A' = 93.5379 mm²
V' = 63.8167 mm³
QA=0.9708 QV=1.0036
VSI=0.000 N=30 [OK]

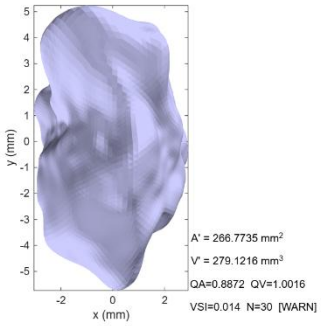

z (mm)
y (mm)

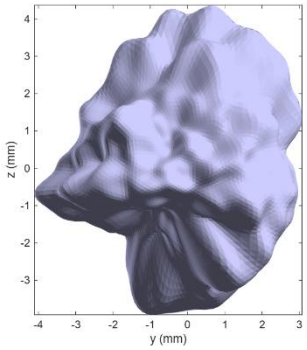

z (mm)
x (mm)

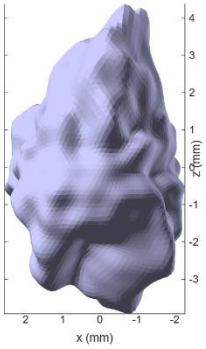

y (mm)
x (mm)
A' = 88.3324 mm²
V' = 56.8706 mm³
QA=0.9722 QV=1.0047
VSI=0.000 N=30 [OK]

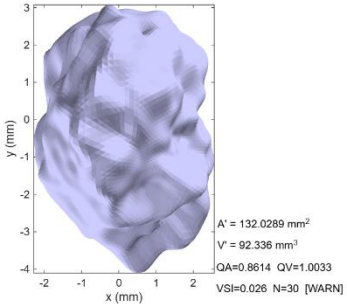

z (mm)
y (mm)

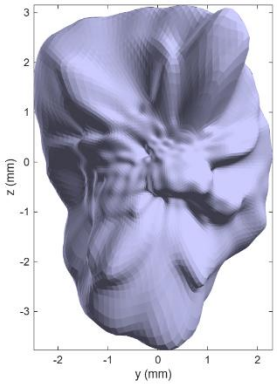

z (mm)
x (mm)

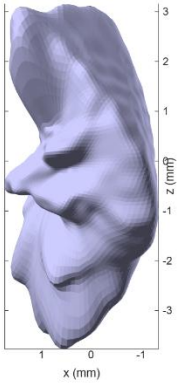

y (mm)
x (mm)
A' = 266.7735 mm²
V' = 279.1216 mm³
QA=0.8872 QV=1.0016
VSI=0.014 N=30 [WARN]

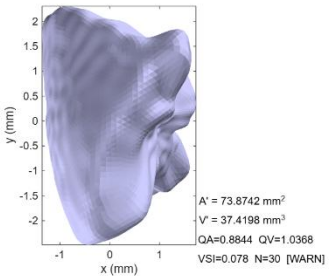

z (mm)
y (mm)

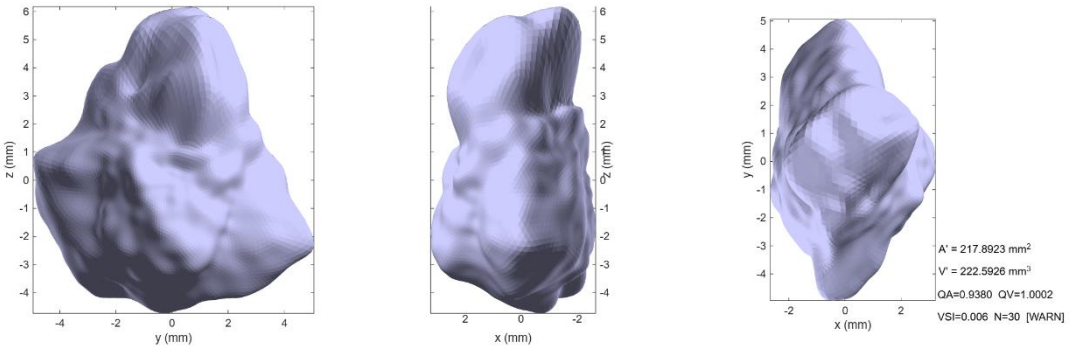

z (mm)
x (mm)

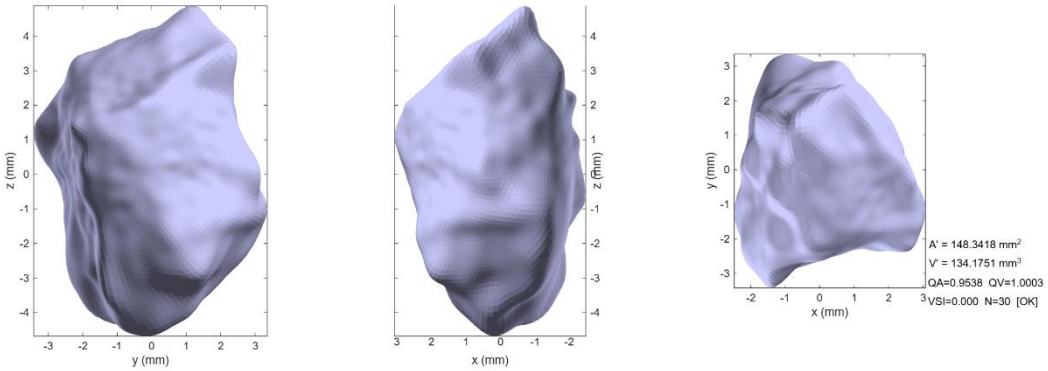

y (mm)
x (mm)
A' = 132.0289 mm²
V' = 92.336 mm³
QA=0.8614 QV=1.0033
VSI=0.026 N=30 [WARN]

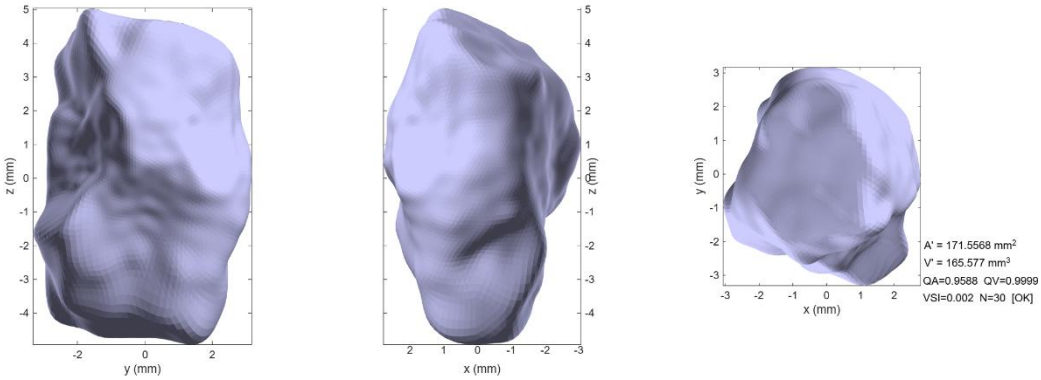

z (mm)
y (mm)

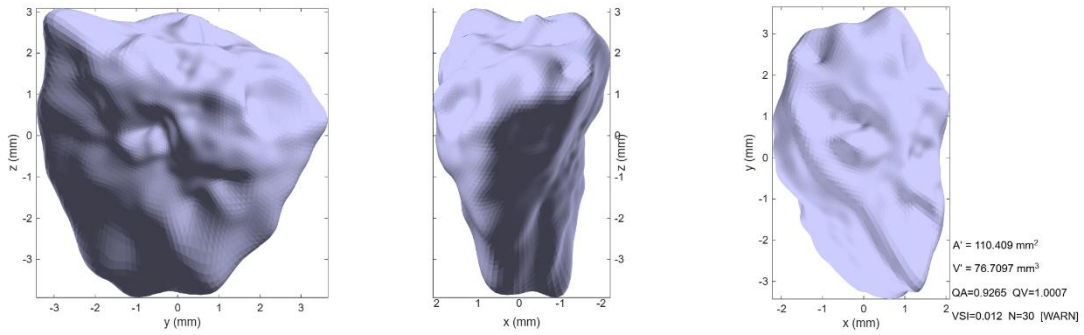

z (mm)
x (mm)

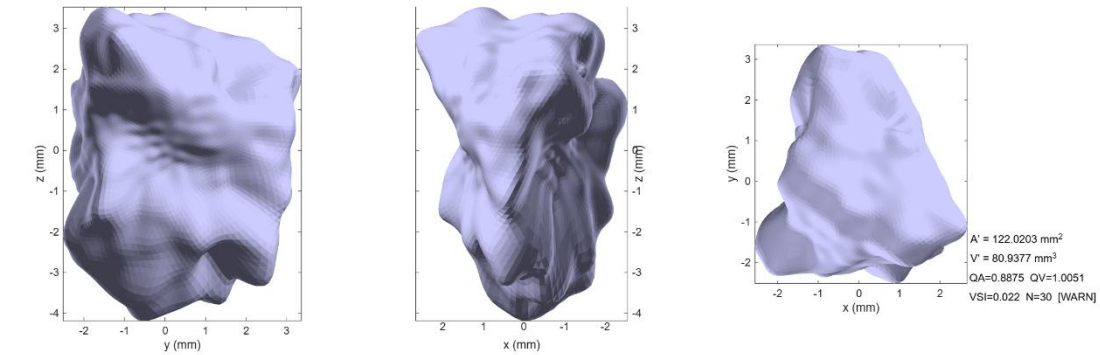

y (mm)
x (mm)
A' = 73.8742 mm²
V' = 37.4198 mm³
QA=0.8844 QV=1.0368
VSI=0.078 N=30 [WARN]

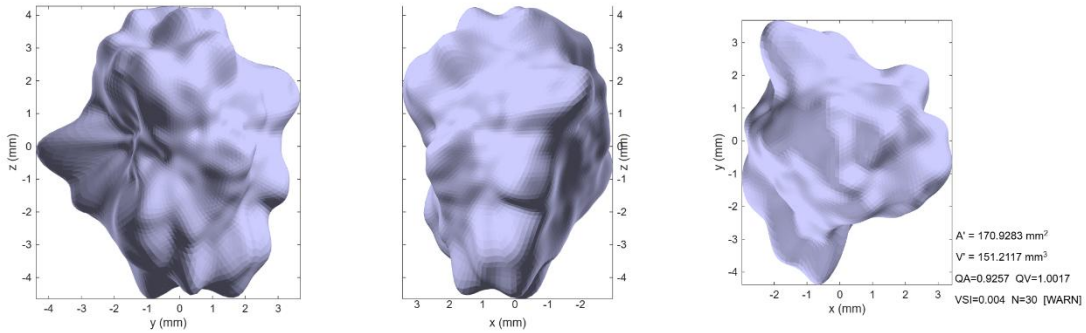

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 217.8923 mm²
V' = 222.5926 mm³
QA=0.9380 QV=1.0002
VSI=0.006 N=30 [WARN]

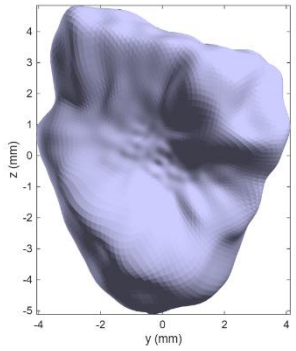

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 148.3418 mm²
V' = 134.1751 mm³
QA=0.9538 QV=1.0003
VSI=0.000 N=30 [OK]

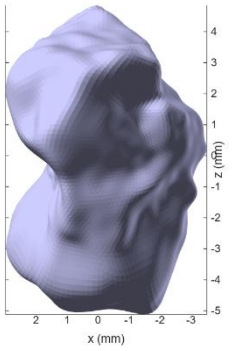

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 171.5568 mm²
V' = 165.577 mm³
QA=0.9588 QV=0.9999
VSI=0.002 N=30 [OK]

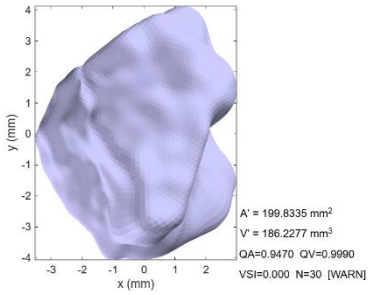

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 110.409 mm²
V' = 76.7097 mm³
QA=0.9265 QV=1.0007
VSI=0.012 N=30 [WARN]

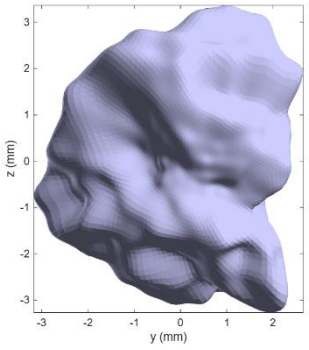

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 122.0203 mm²
V' = 80.9377 mm³
QA=0.8875 QV=1.0051
VSI=0.022 N=30 [WARN]

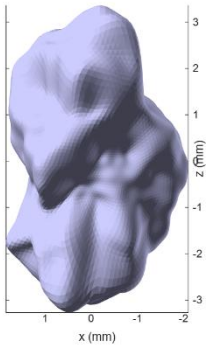

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 170.9283 mm²
V' = 151.2117 mm³
QA=0.9257 QV=1.0017
VSI=0.004 N=30 [WARN]

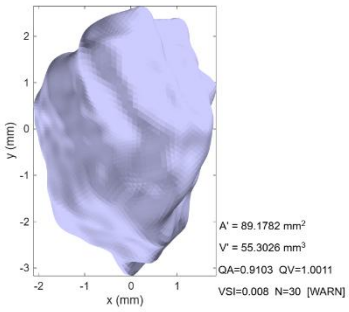

z (mm)
y (mm)

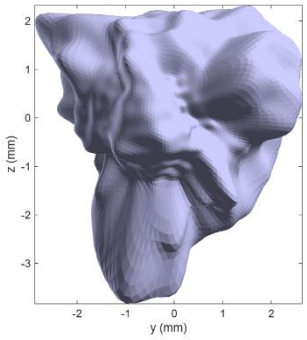

z (mm)
x (mm)

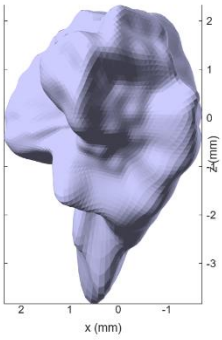

y (mm)
x (mm)
A' = 199.8335 mm²
V' = 186.2277 mm³
QA=0.9470 QV=0.9990
VSI=0.000 N=30 [WARN]

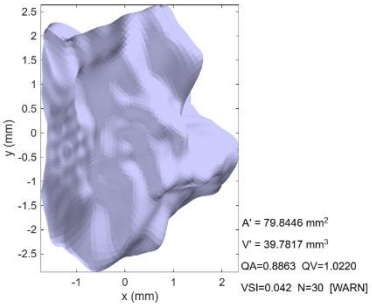

z (mm)
y (mm)

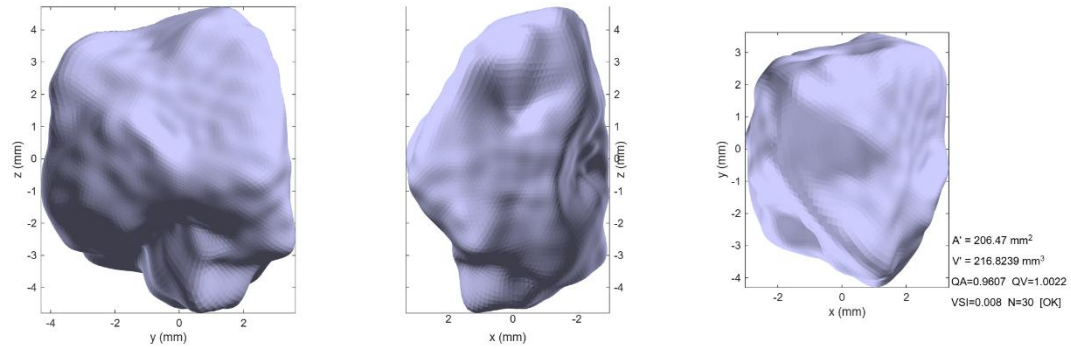

z (mm)
x (mm)

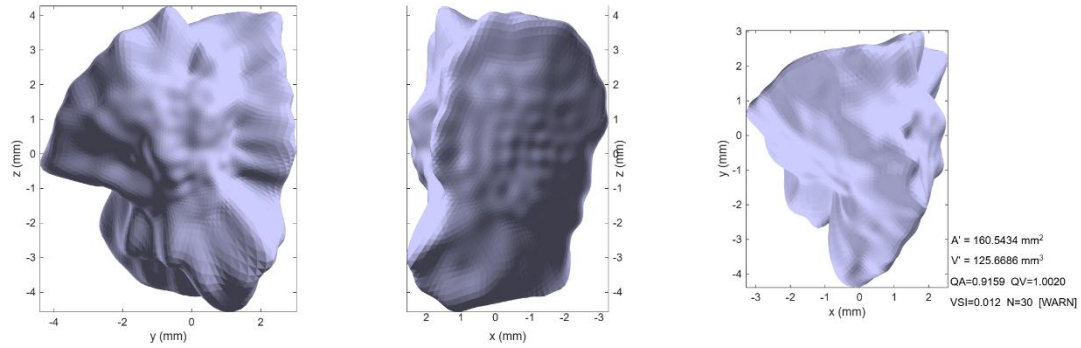

y (mm)
x (mm)
A' = 89.1782 mm²
V' = 55.3026 mm³
QA=0.9103 QV=1.0011
VSI=0.008 N=30 [WARN]

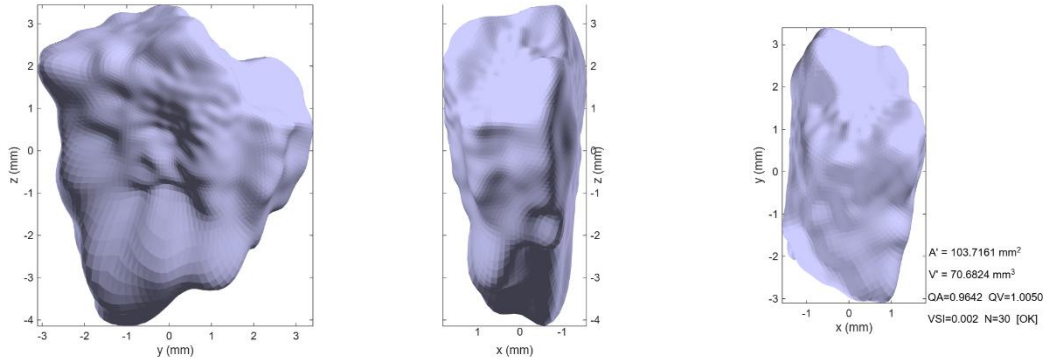

z (mm)
y (mm)

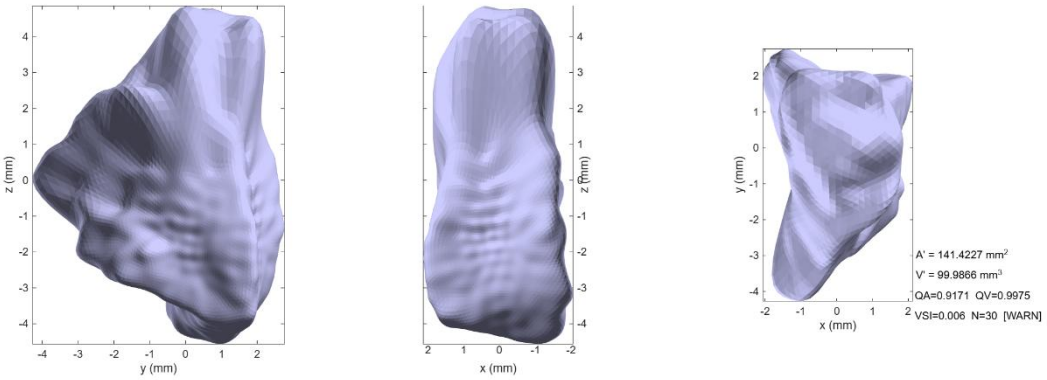

z (mm)
x (mm)

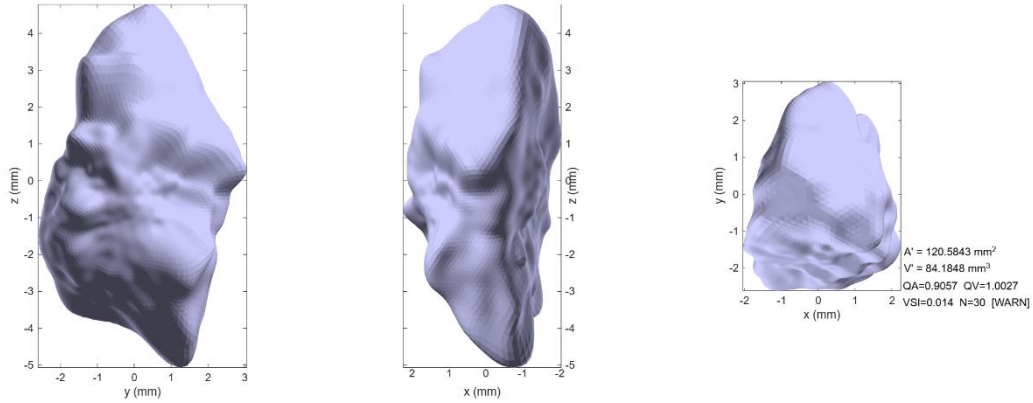

y (mm)
x (mm)
A' = 79.8446 mm²
V' = 39.7817 mm³
QA=0.8863 QV=1.0220
VSI=0.042 N=30 [WARN]

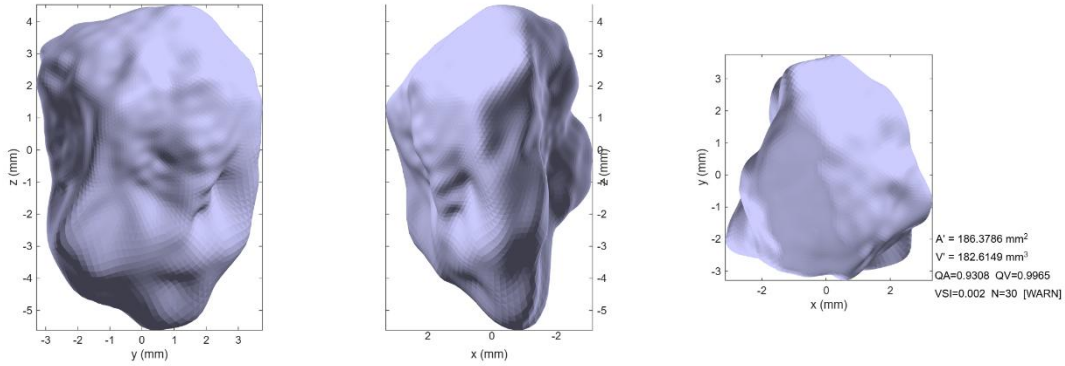

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 206.47 mm²
V' = 216.8239 mm³
QA=0.9607 QV=1.0022
VSI=0.008 N=30 [OK]

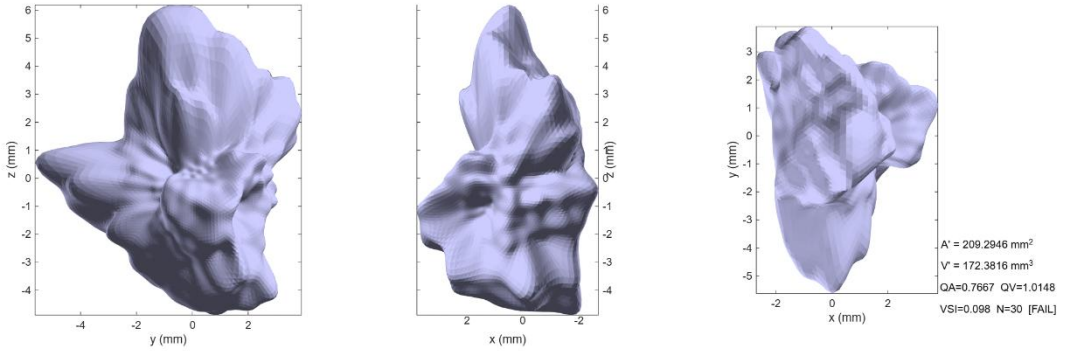

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 160.5434 mm²
V' = 125.6686 mm³
QA=0.9159 QV=1.0020
VSI=0.012 N=30 [WARN]

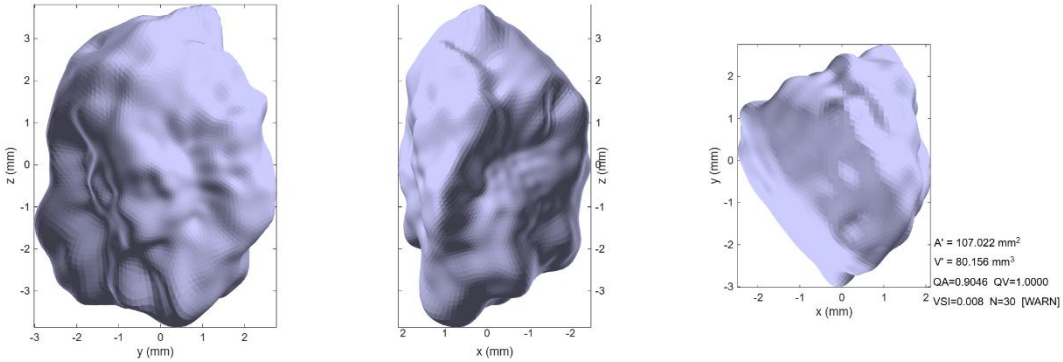

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 103.7161 mm²
V' = 70.6824 mm³
QA=0.9642 QV=1.0050
VSI=0.002 N=30 [OK]

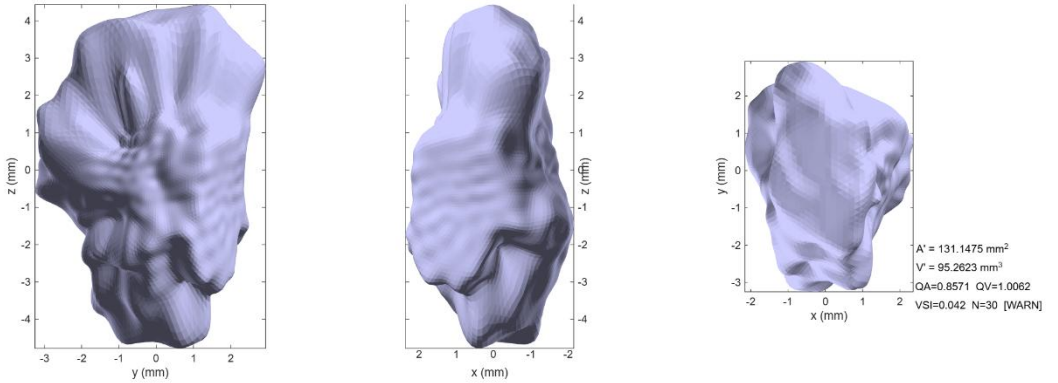

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 141.4227 mm²
V' = 99.9866 mm³
QA=0.9171 QV=0.9975
VSI=0.006 N=30 [WARN]

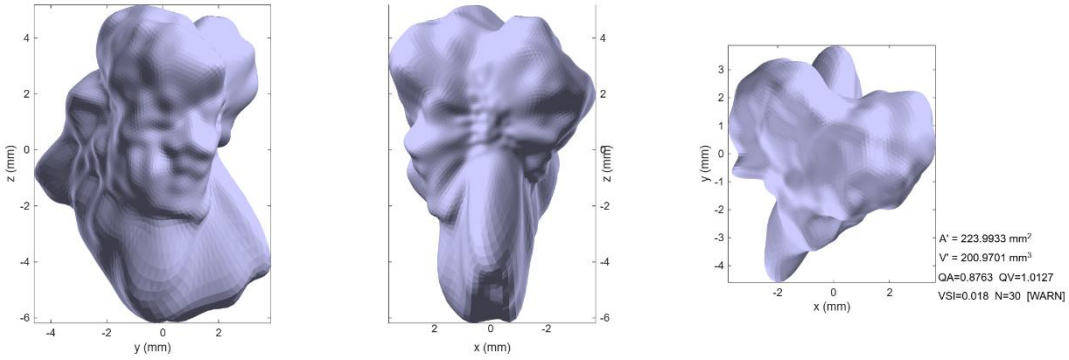

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 120.5843 mm²
V' = 84.1848 mm³
QA=0.9057 QV=1.0027
VSI=0.014 N=30 [WARN]

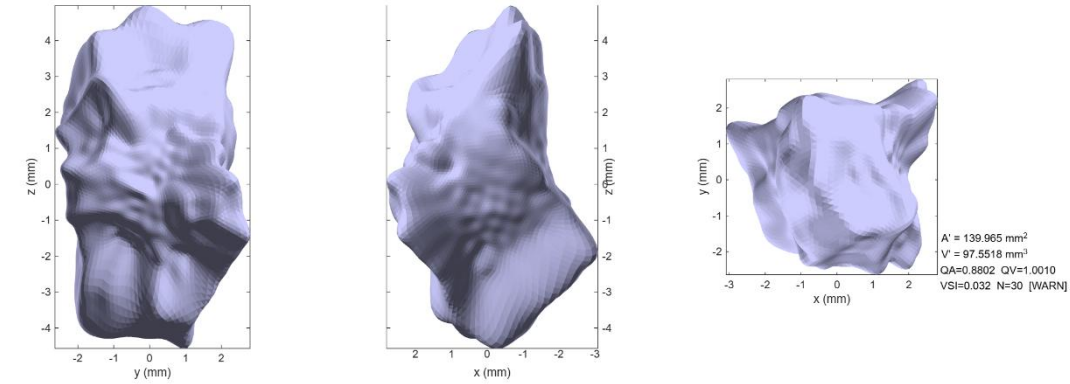

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 186.3786 mm²
V' = 182.6149 mm³
QA=0.9308 QV=0.9965
VSI=0.002 N=30 [WARN]

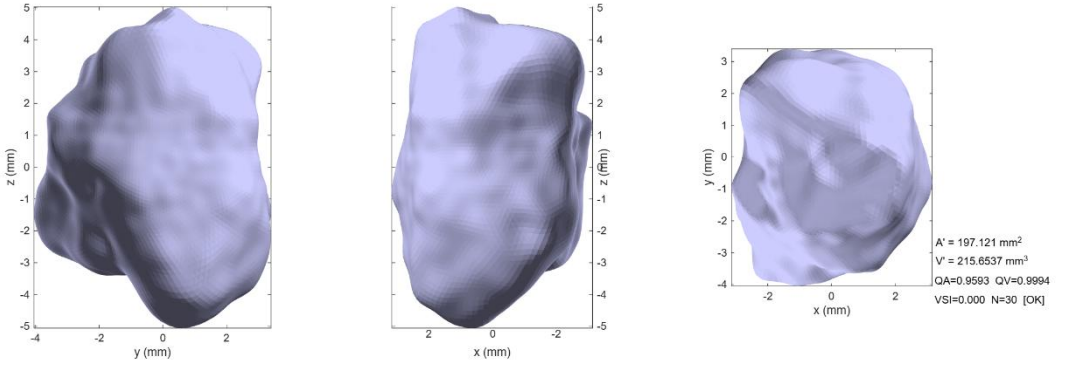

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 209.2946 mm²
V' = 172.3816 mm³
QA=0.7667 QV=1.0148
VSI=0.098 N=30 [FAIL]

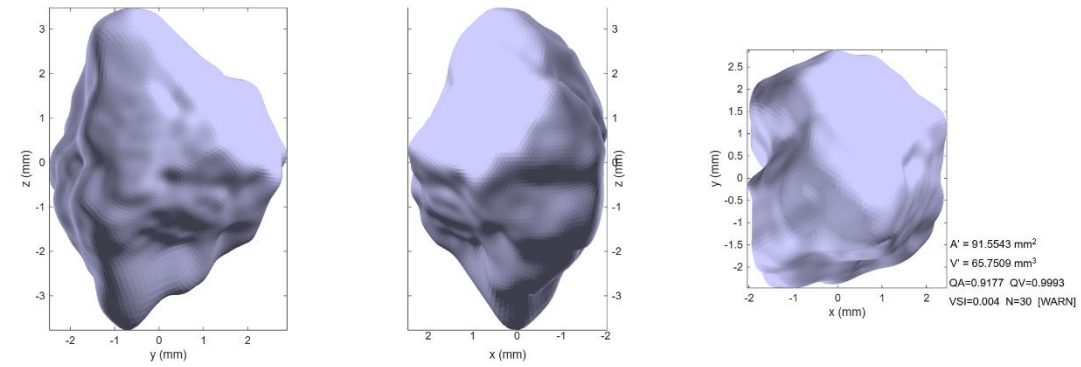

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 107.022 mm²
V' = 80.156 mm³
QA=0.9046 QV=1.0000
VSI=0.008 N=30 [WARN]

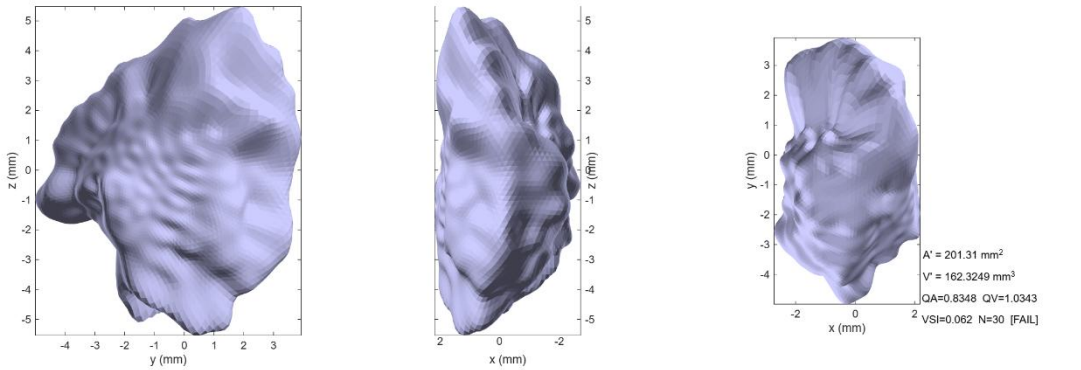

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 131.1475 mm²
V' = 95.2623 mm³
QA=0.8571 QV=1.0062
VSI=0.042 N=30 [WARN]

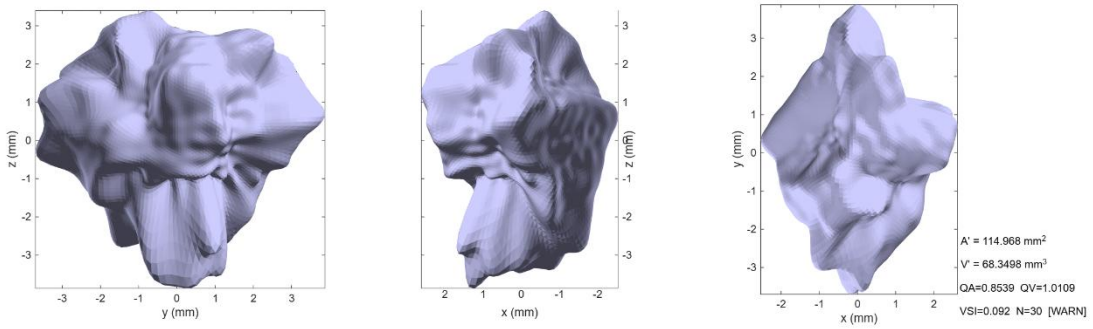

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 223.9933 mm²
V' = 200.9701 mm³
QA=0.8763 QV=1.0127
VSI=0.018 N=30 [WARN]

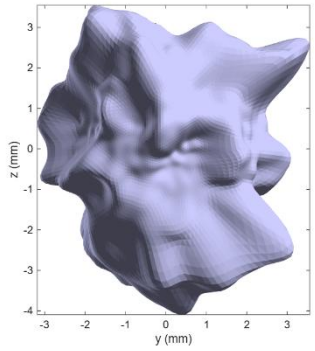

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 139.965 mm²
V' = 97.5518 mm³
QA=0.8802 QV=1.0010
VSI=0.032 N=30 [WARN]

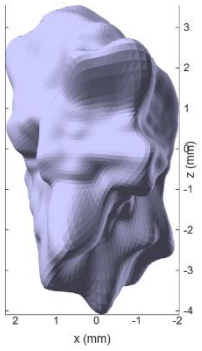

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 197.121 mm²
V' = 215.6537 mm³
QA=0.9593 QV=0.9994
VSI=0.000 N=30 [OK]

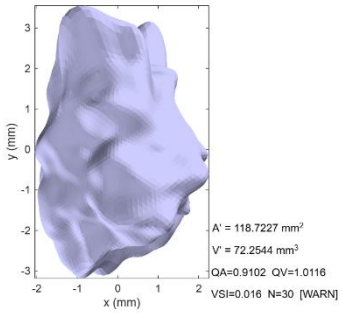

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 91.5543 mm²
V' = 65.7509 mm³
QA=0.9177 QV=0.9993
VSI=0.004 N=30 [WARN]

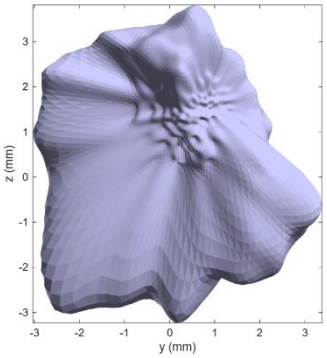

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 201.31 mm²
V' = 162.3249 mm³
QA=0.8348 QV=1.0343
VSI=0.062 N=30 [FAIL]

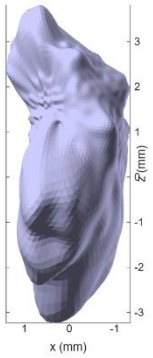

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 114.968 mm²
V' = 68.3498 mm³
QA=0.8539 QV=1.0109
VSI=0.092 N=30 [WARN]

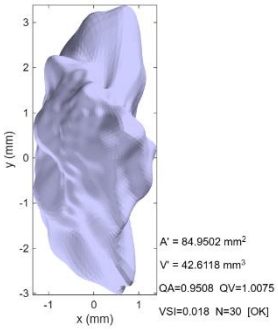

z (mm)
y (mm)


z (mm)
x (mm)

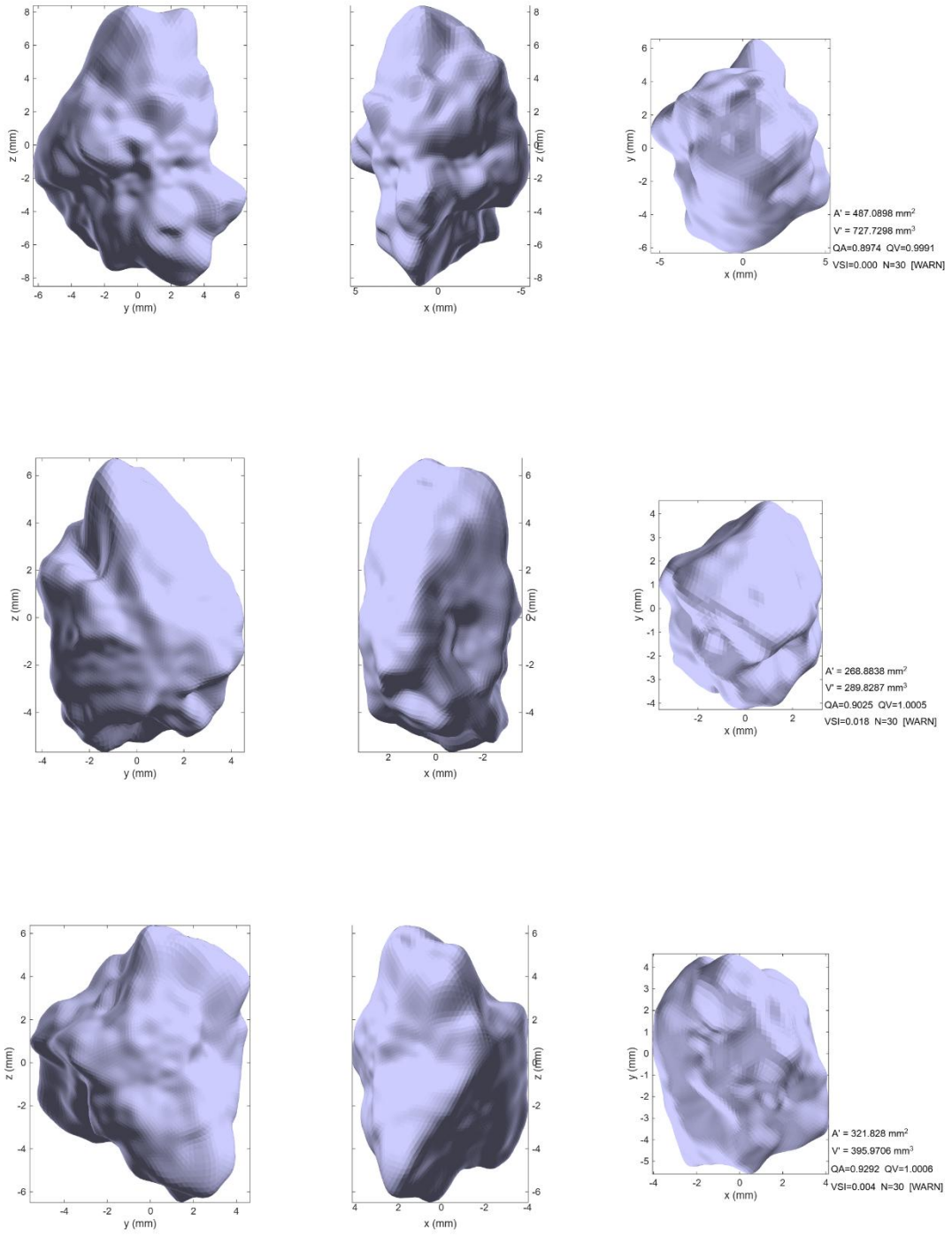

y (mm)
x (mm)
A' = 118.7227 mm²
V' = 72.2544 mm³
QA=0.9102 QV=1.0116
VSI=0.016 N=30 [WARN]

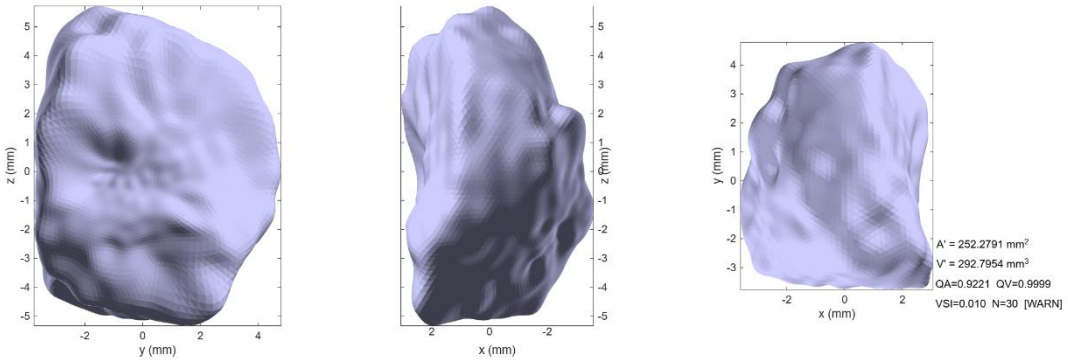

z (mm)
y (mm)

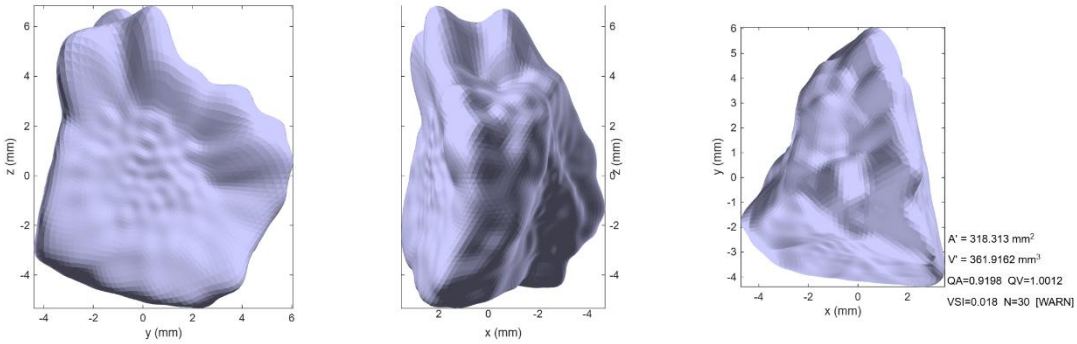

z (mm)
x (mm)

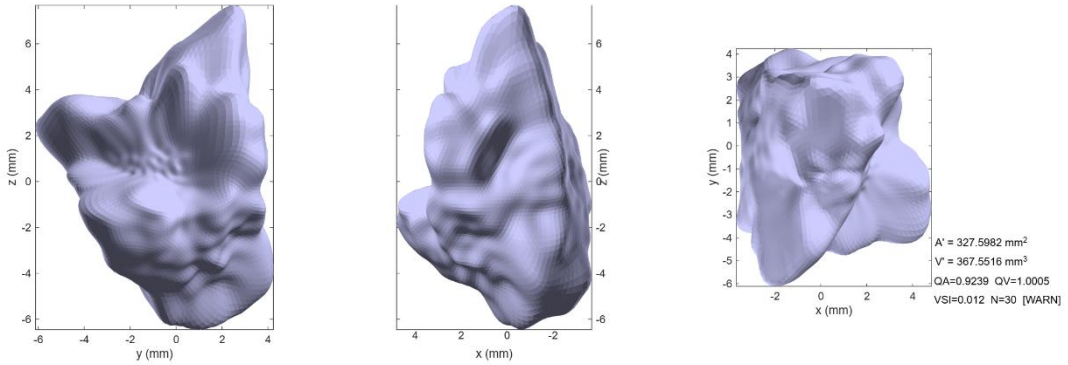

y (mm)
x (mm)
A' = 84.9502 mm²
V' = 42.6118 mm³
QA=0.9508 QV=1.0075
VSI=0.018 N=30 [OK]

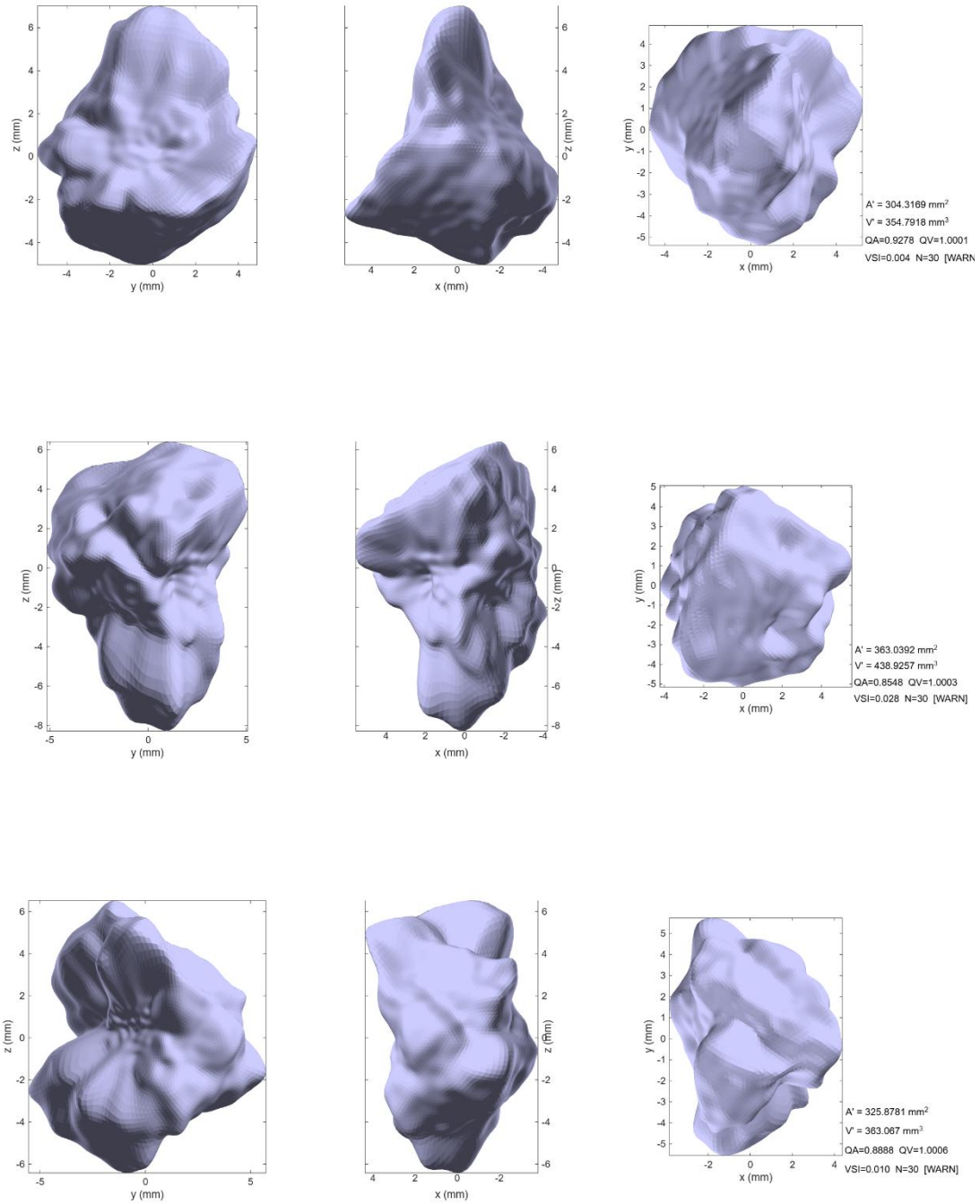
A.4 PARTÍCULAS DE ASIC RECONSTRUÍDAS POR HARMÓNICAS ESFÉRICAS, FRAÇÃO DE 12 MM

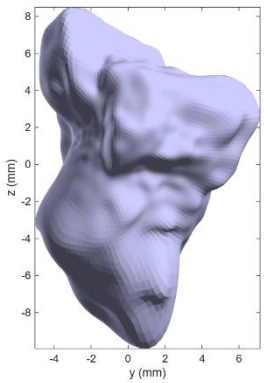


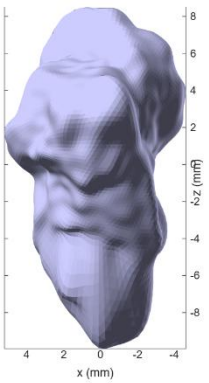

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 252.2791 mm²
V' = 292.7954 mm³
QA=0.9221 QV=0.9999
VSI=0.010 N=30 [WARN]

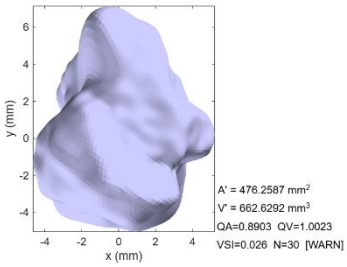

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 318.313 mm²
V' = 361.9162 mm³
QA=0.9198 QV=1.0012
VSI=0.018 N=30 [WARN]

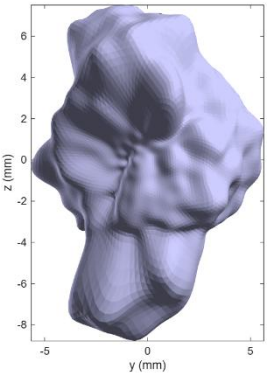

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 327.5982 mm²
V' = 367.5516 mm³
QA=0.9239 QV=1.0005
VSI=0.012 N=30 [WARN]

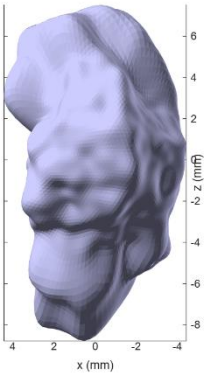

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 304.3169 mm²
V' = 354.7918 mm³
QA=0.9278 QV=1.0001
VSI=0.004 N=30 [WARN
A' = 363.0392 mm²
V' = 438.9257 mm³
QA=0.8548 QV=1.0003
VSI=0.028 N=30 [WARN]
A' = 325.8781 mm²
V' = 363.067 mm³
QA=0.8888 QV=1.0006
VSI=0.010 N=30 [WARN]

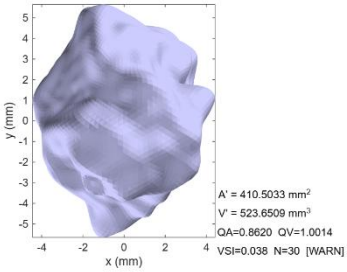

z (mm)
y (mm)

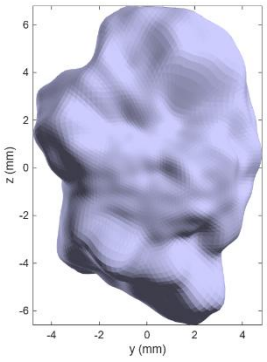

z (mm)
x (mm)

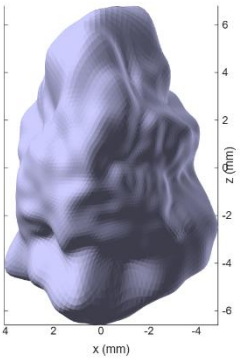

y (mm)
x (mm)
A' = 476.2587 mm²
V' = 662.6292 mm³
QA=0.8903 QV=1.0023
VSI=0.026 N=30 [WARN]

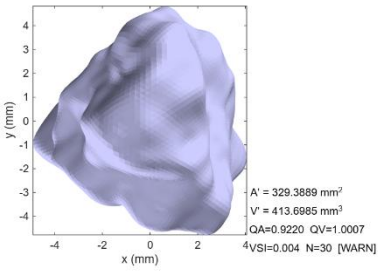

z (mm)
y (mm)

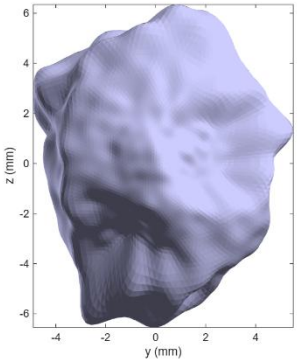

z (mm)
x (mm)

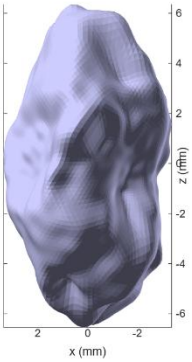

y (mm)
x (mm)
A' = 410.5033 mm²
V' = 523.6509 mm³
QA=0.8620 QV=1.0014
VSI=0.038 N=30 [WARN]

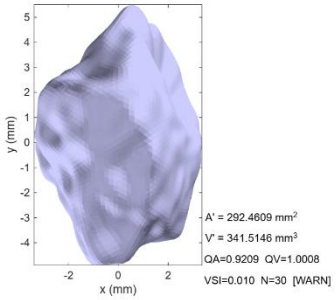

z (mm)
y (mm)

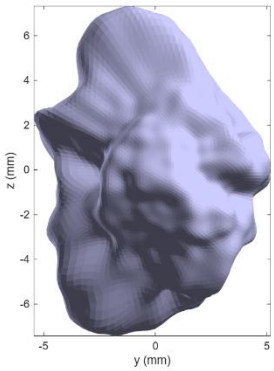

z (mm)
x (mm)

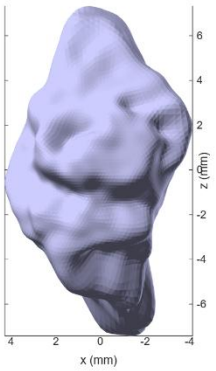

y (mm)
x (mm)
A' = 329.3889 mm²
V' = 413.6985 mm³
QA=0.9220 QV=1.0007
VSI=0.004 N=30 [WARN]

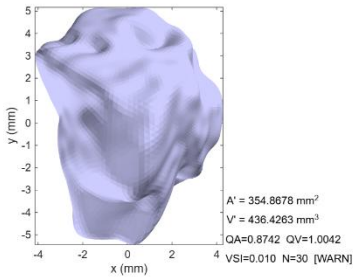

z (mm)
y (mm)

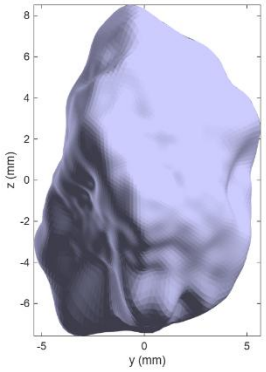

z (mm)
x (mm)

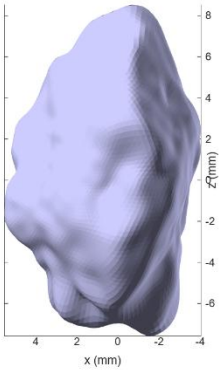

y (mm)
x (mm)
A' = 292.4609 mm²
V' = 341.5146 mm³
QA=0.9209 QV=1.0008
VSI=0.010 N=30 [WARN]

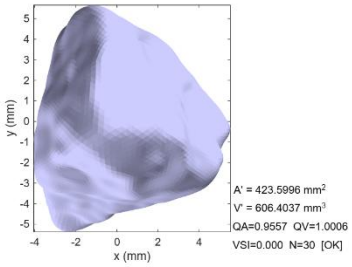

z (mm)
y (mm)

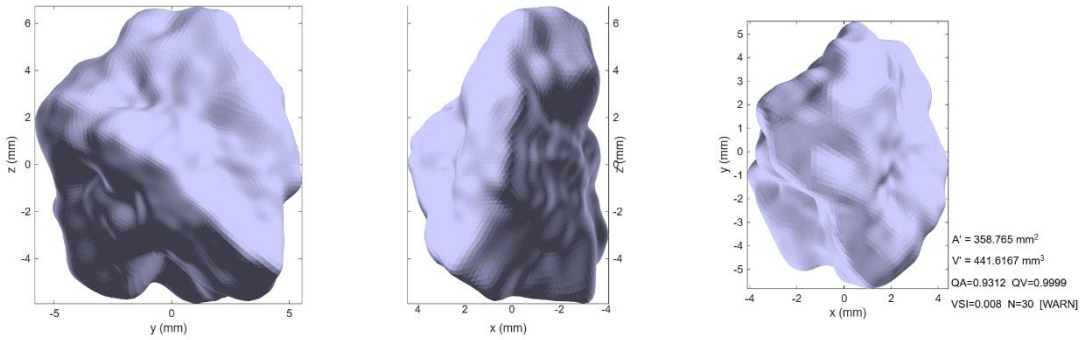

z (mm)
x (mm)

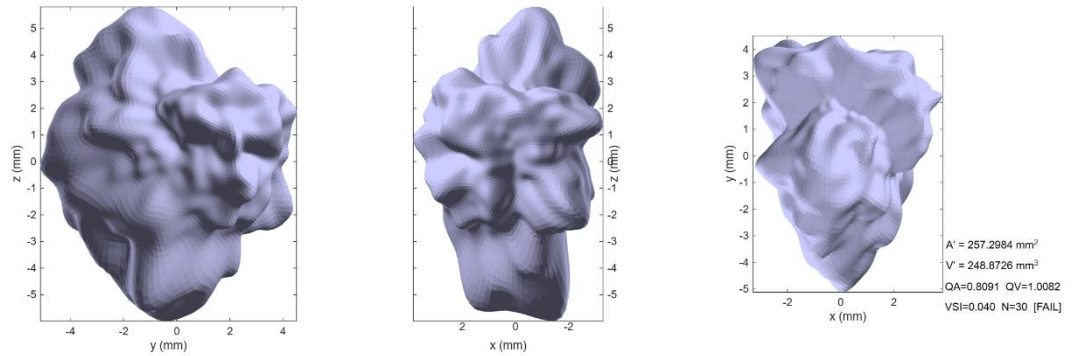

y (mm)
x (mm)
A' = 354.8678 mm²
V' = 436.4263 mm³
QA=0.8742 QV=1.0042
VSI=0.010 N=30 [WARN]

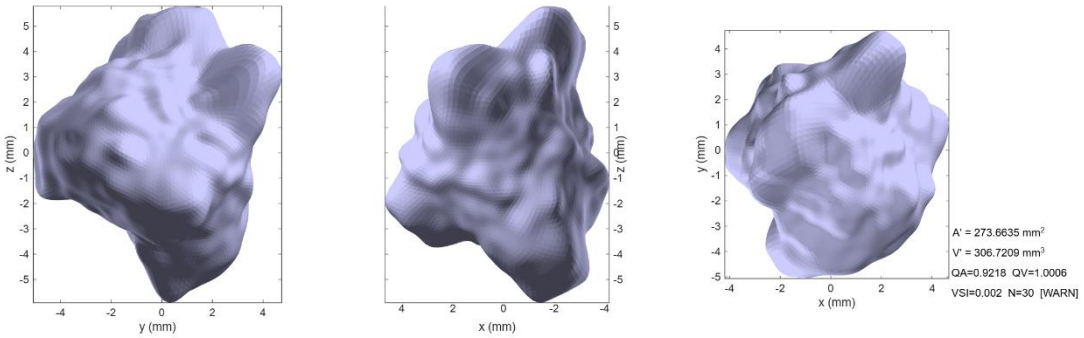

z (mm)
y (mm)

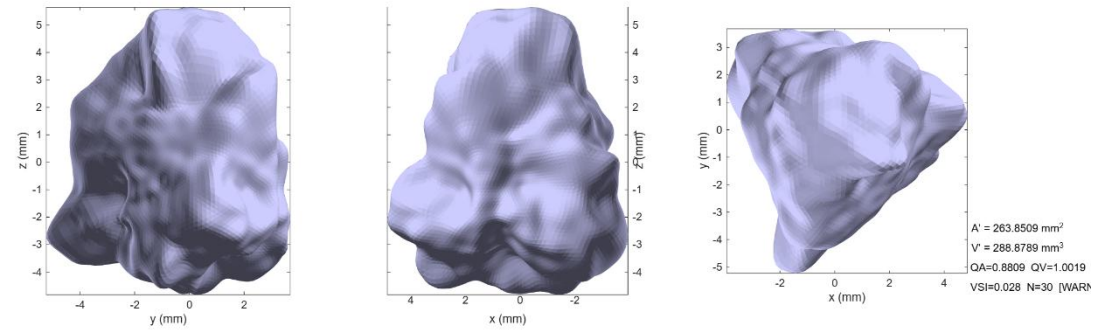

z (mm)
x (mm)

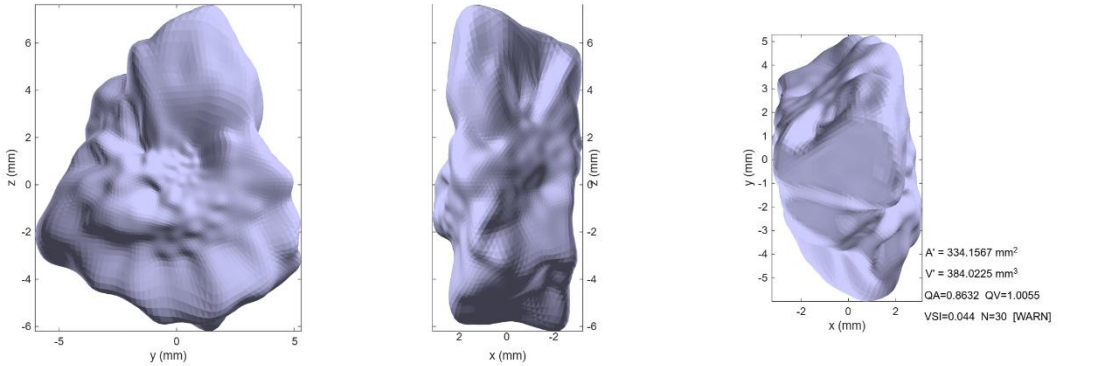

y (mm)
x (mm)
A' = 423.5996 mm²
V' = 606.4037 mm³
QA=0.9557 QV=1.0006
VSI=0.000 N=30 [OK]

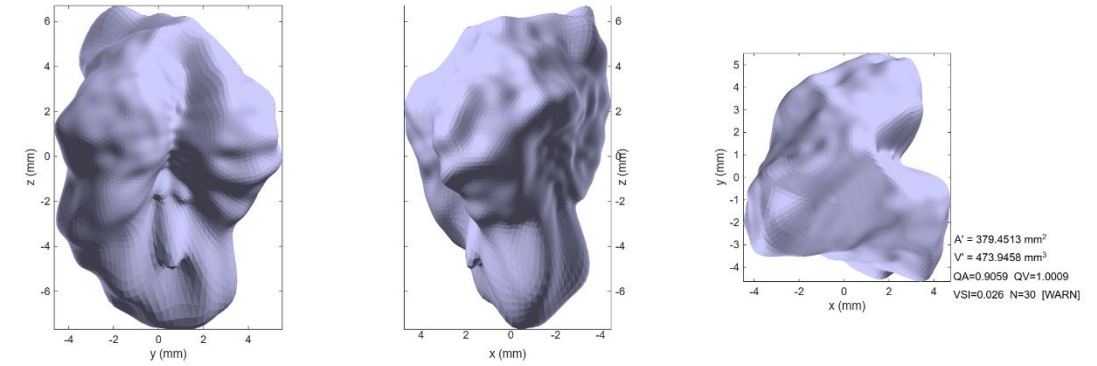

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 358.765 mm²
V' = 441.6167 mm³
QA=0.9312 QV=0.9999
VSI=0.008 N=30 [WARN]

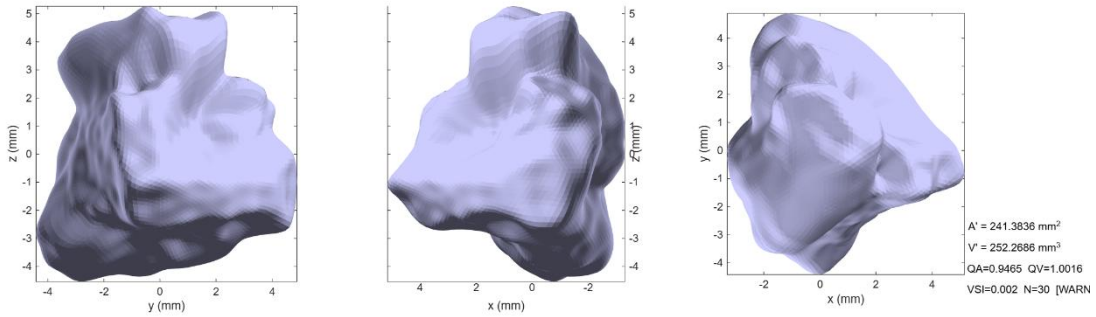

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 257.2984 mm²
V' = 248.8726 mm³
QA=0.8091 QV=1.0082
VSI=0.040 N=30 [FAIL]

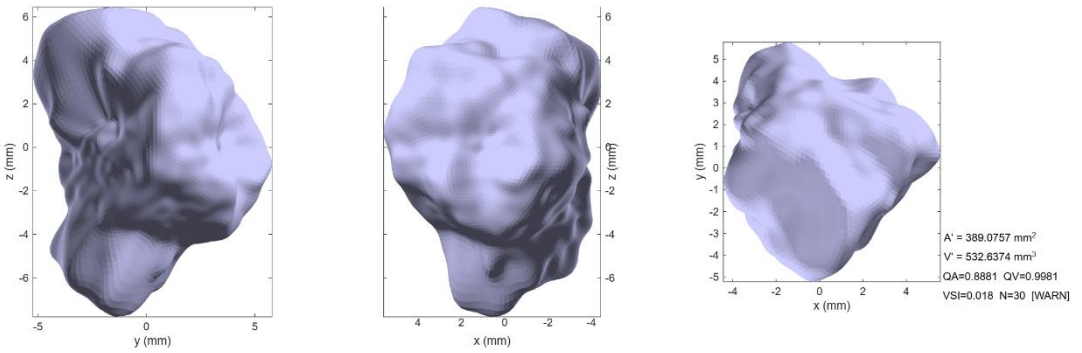

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 273.6635 mm²
V' = 306.7209 mm³
QA=0.9218 QV=1.0006
VSI=0.002 N=30 [WARN]

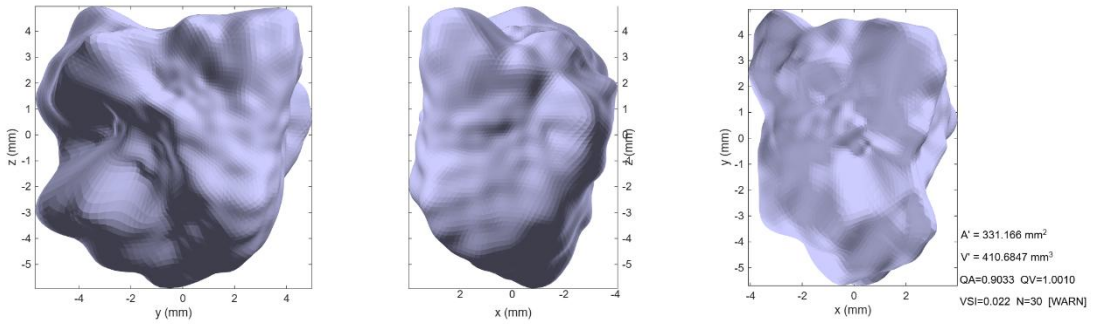

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 263.8509 mm²
V' = 288.8789 mm³
QA=0.8809 QV=1.0019
VSI=0.028 N=30 [WARN

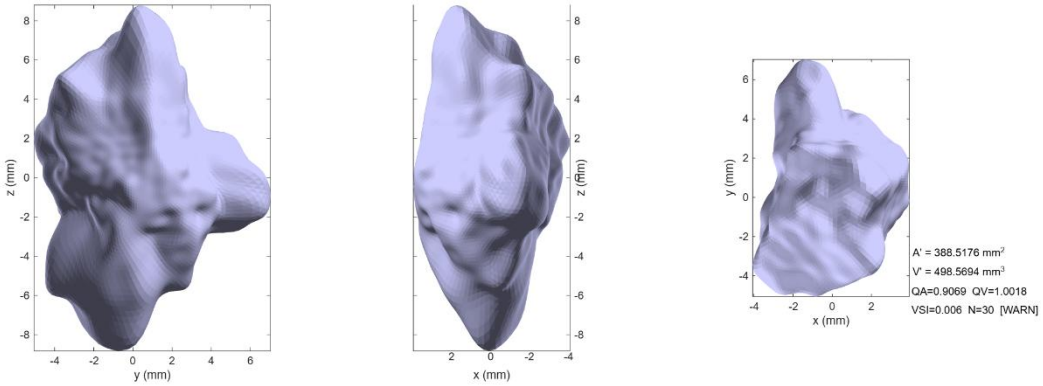

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 334.1567 mm²
V' = 384.0225 mm³
QA=0.8632 QV=1.0055
VSI=0.044 N=30 [WARN]

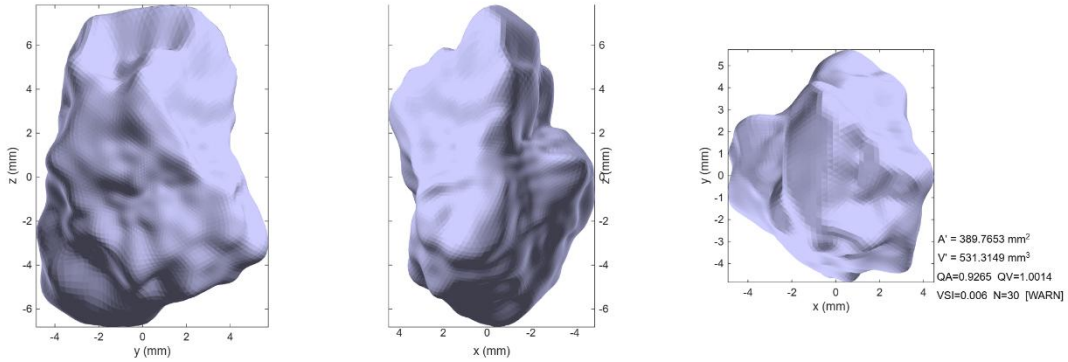

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 379.4513 mm²
V' = 473.9458 mm³
QA=0.9059 QV=1.0009
VSI=0.026 N=30 [WARN]

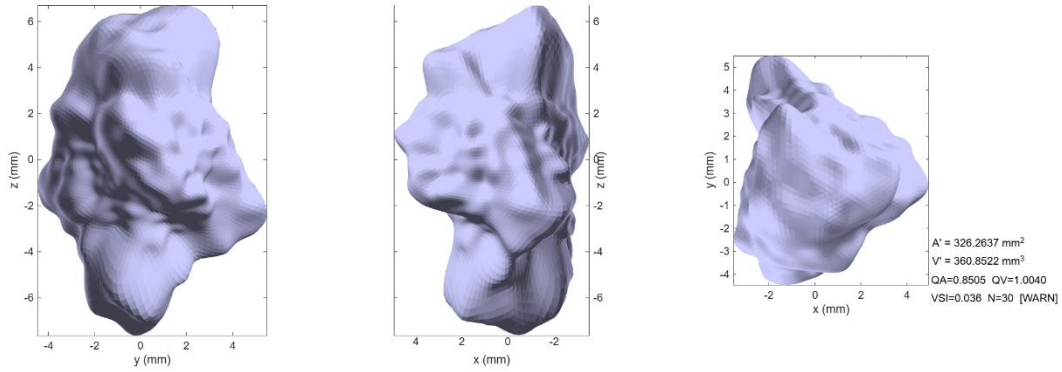

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 241.3836 mm²
V' = 252.2686 mm³
QA=0.9465 QV=1.0016
VSI=0.002 N=30 [WARN

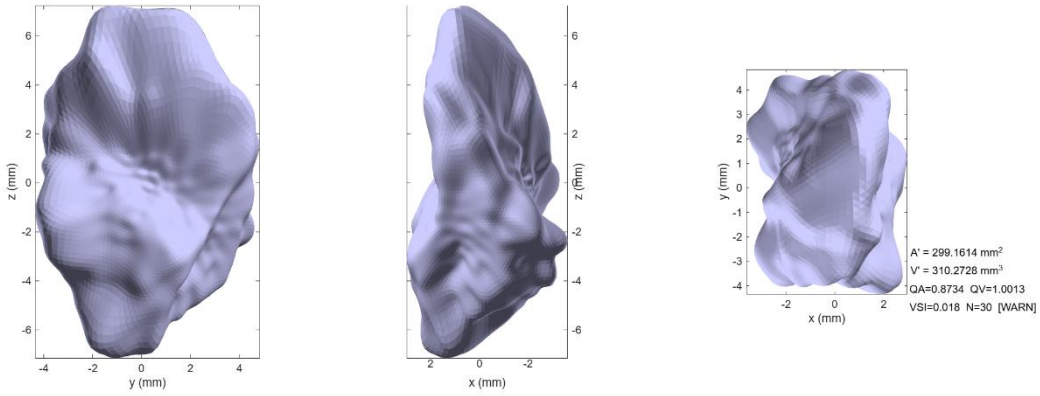

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 389.0757 mm²
V' = 532.6374 mm³
QA=0.8881 QV=0.9981
VSI=0.018 N=30 [WARN]

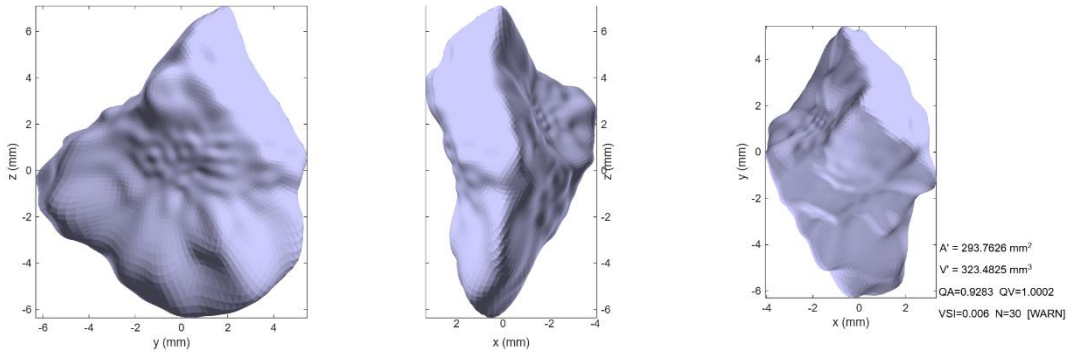

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
A' = 331.166 mm²
V' = 410.6847 mm³
QA=0.9033 QV=1.0010
VSI=0.022 N=30 [WARN]

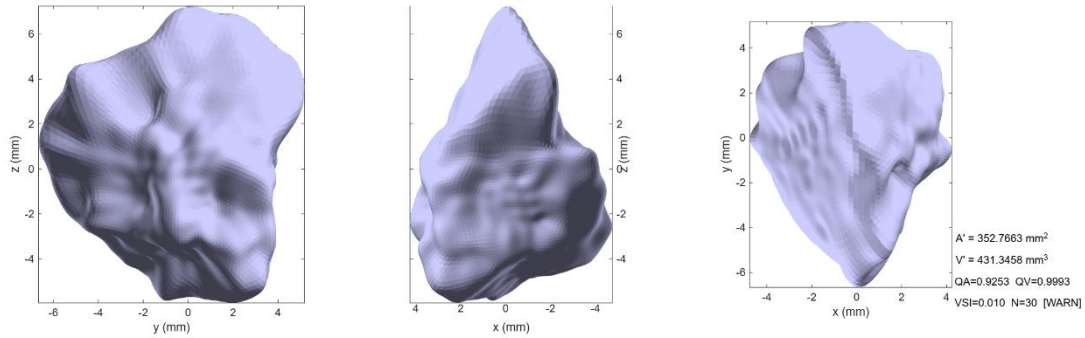

z (mm)
y (mm)
x (mm)
z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 388.5176 mm²
V' = 498.5694 mm³
QA=0.9069 QV=1.0018
VSI=0.006 N=30 [WARN]

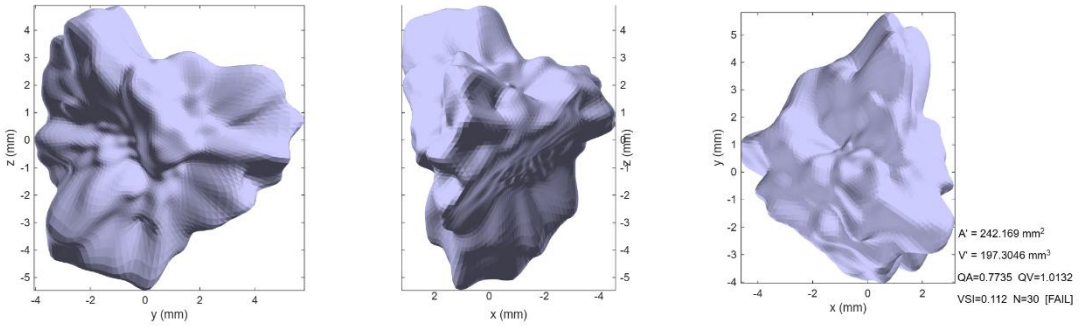

z (mm)
y (mm)
x (mm)
z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 389.7653 mm²
V' = 531.3149 mm³
QA=0.9265 QV=1.0014
VSI=0.006 N=30 [WARN]

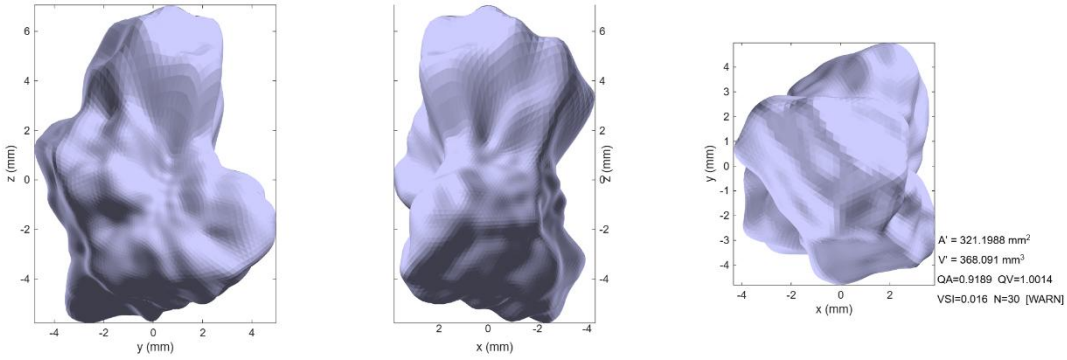

z (mm)
y (mm)
x (mm)
z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 326.2637 mm²
V' = 360.8522 mm³
QA=0.8505 QV=1.0040
VSI=0.036 N=30 [WARN]

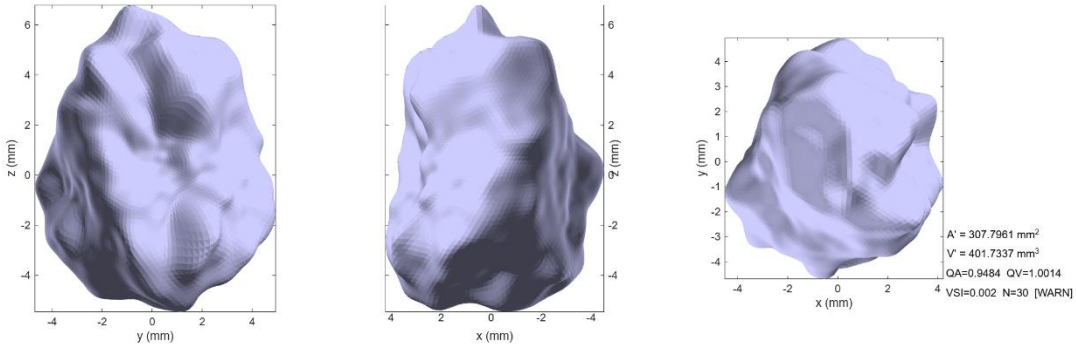

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 299.1614 mm²
V' = 310.2728 mm³
QA=0.8734 QV=1.0013
VSI=0.018 N=30 [WARN]

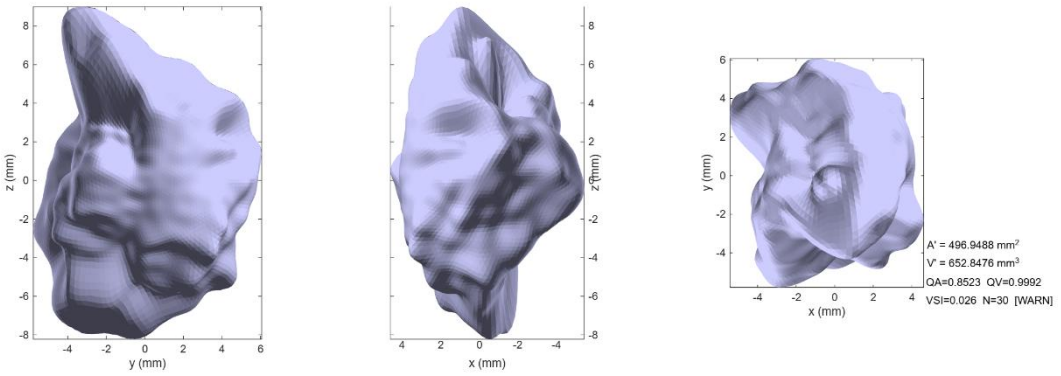

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 293.7626 mm²
V' = 323.4825 mm³
QA=0.9283 QV=1.0002
VSI=0.006 N=30 [WARN]

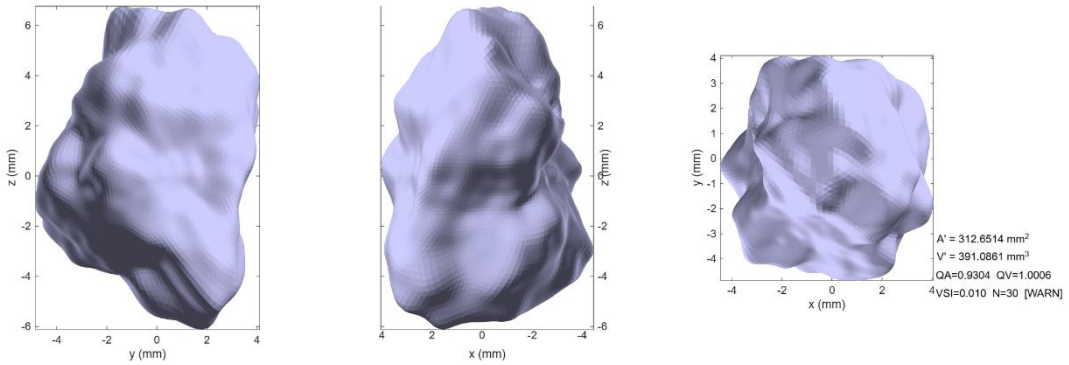

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 352.7663 mm²
V' = 431.3458 mm³
QA=0.9253 QV=0.9993
VSI=0.010 N=30 [WARN]

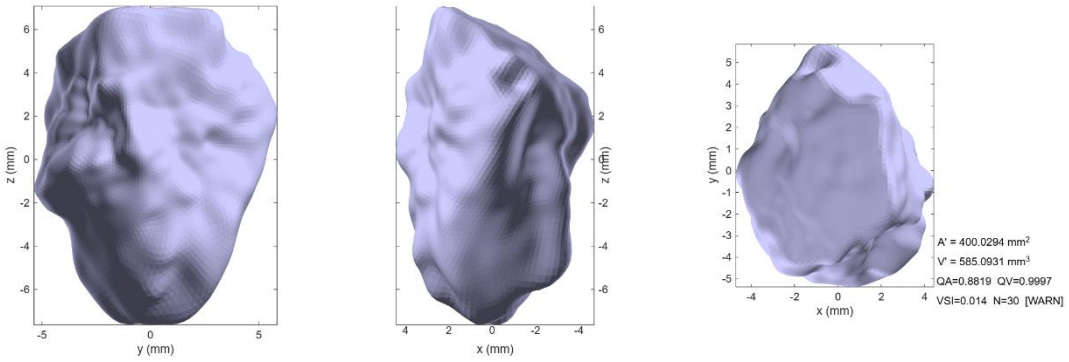

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 242.169 mm²
V' = 197.3046 mm³
QA=0.7735 QV=1.0132
VSI=0.112 N=30 [FAIL]

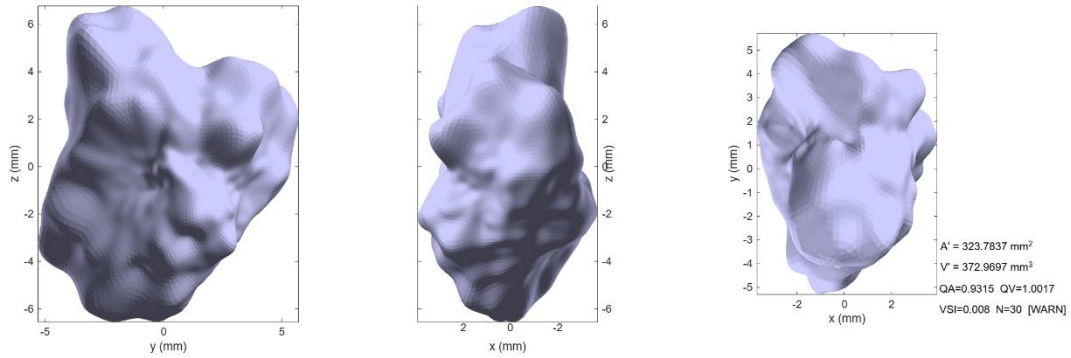

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 321.1988 mm²
V' = 368.091 mm³
QA=0.9189 QV=1.0014
VSI=0.016 N=30 [WARN]

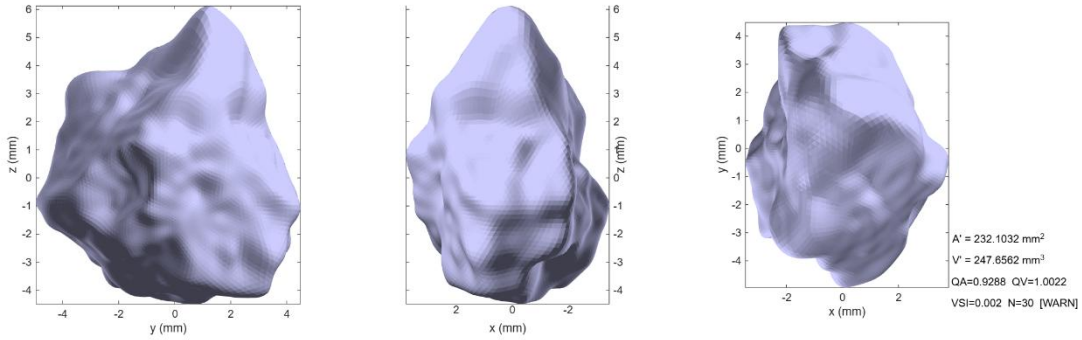

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 307.7961 mm²
V' = 401.7337 mm³
QA=0.9484 QV=1.0014
VSI=0.002 N=30 [WARN]

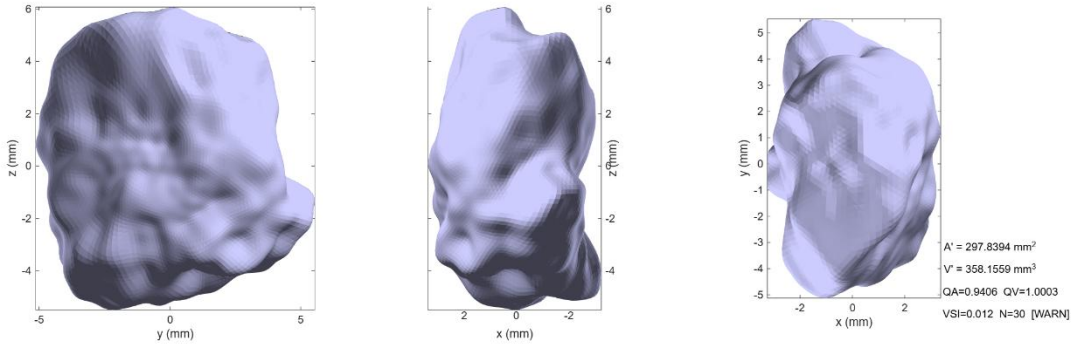

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 496.9488 mm²
V' = 652.8476 mm³
QA=0.8523 QV=0.9992
VSI=0.026 N=30 [WARN]

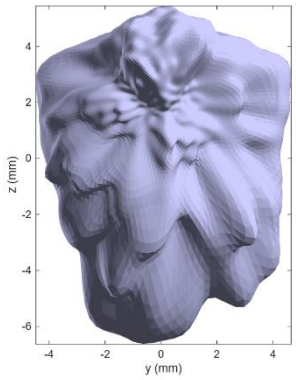

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 312.6514 mm²
V' = 391.0861 mm³
QA=0.9304 QV=1.0006
VSI=0.010 N=30 [WARN]

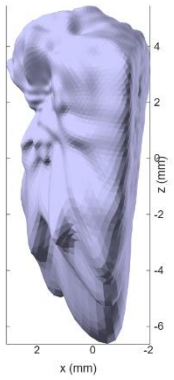

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 400.0294 mm²
V' = 585.0931 mm³
QA=0.8819 QV=0.9997
VSI=0.014 N=30 [WARN]

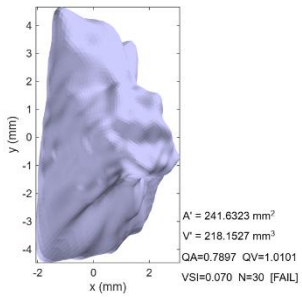

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 323.7837 mm²
V' = 372.9697 mm³
QA=0.9315 QV=1.0017
VSI=0.008 N=30 [WARN]

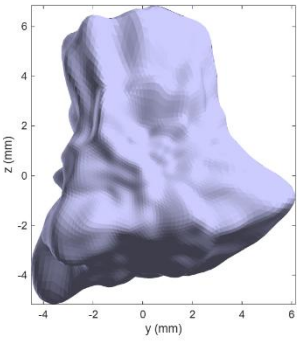

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 232.1032 mm²
V' = 247.6562 mm³
QA=0.9288 QV=1.0022
VSI=0.002 N=30 [WARN]

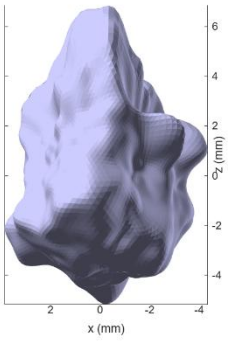

z (mm)
y (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 297.8394 mm²
V' = 358.1559 mm³
QA=0.9406 QV=1.0003
VSI=0.012 N=30 [WARN]

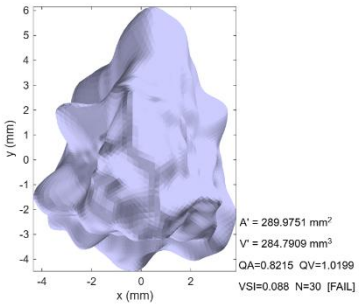

z (mm)
y (mm)

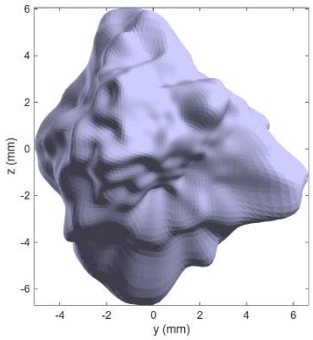

z (mm)
x (mm)

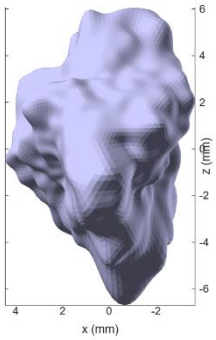

y (mm)
x (mm)
A' = 241.6323 mm²
V' = 218.1527 mm³
QA=0.7897 QV=1.0101
VSI=0.070 N=30 [FAIL]

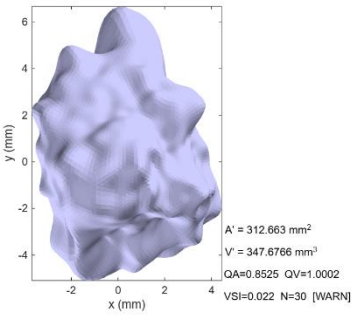

z (mm)
y (mm)

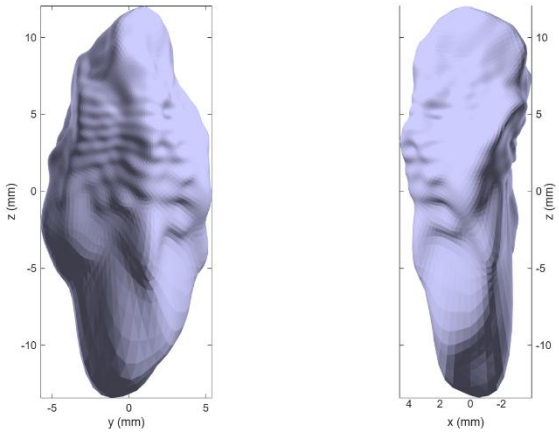

z (mm)
x (mm)

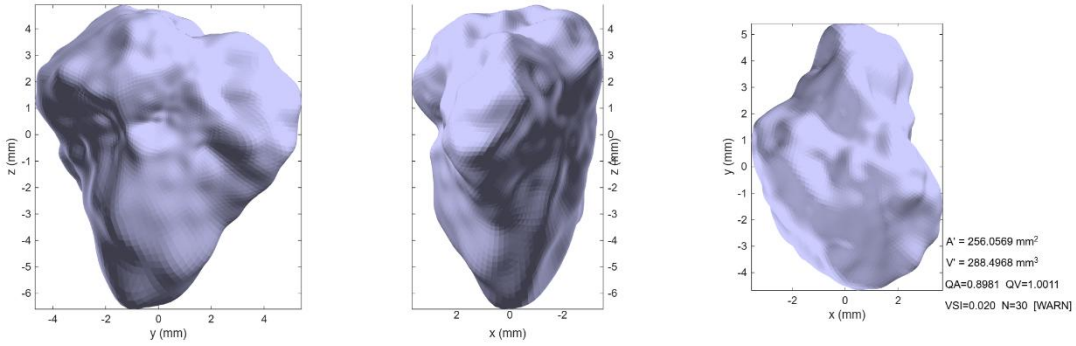

y (mm)
x (mm)
A' = 289.9751 mm²
V' = 284.7909 mm³
QA=0.8215 QV=1.0199
VSI=0.088 N=30 [FAIL]

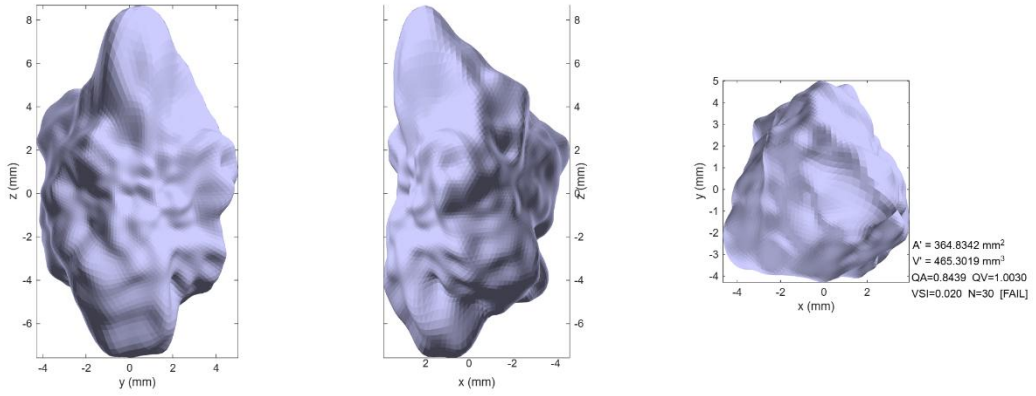

z (mm)
y (mm)

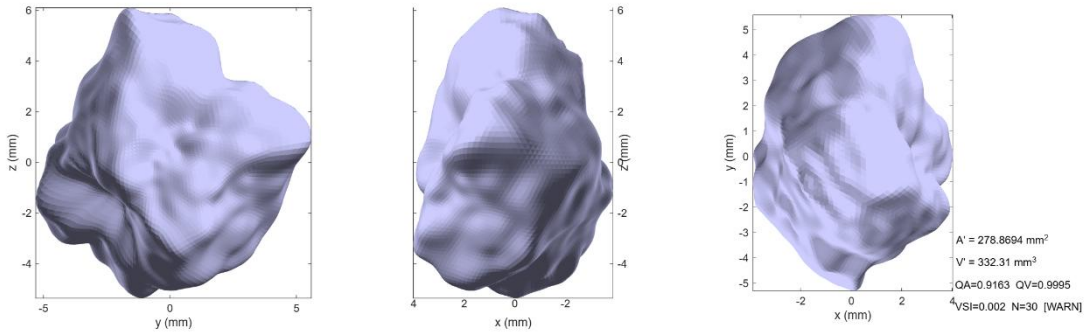

z (mm)
x (mm)

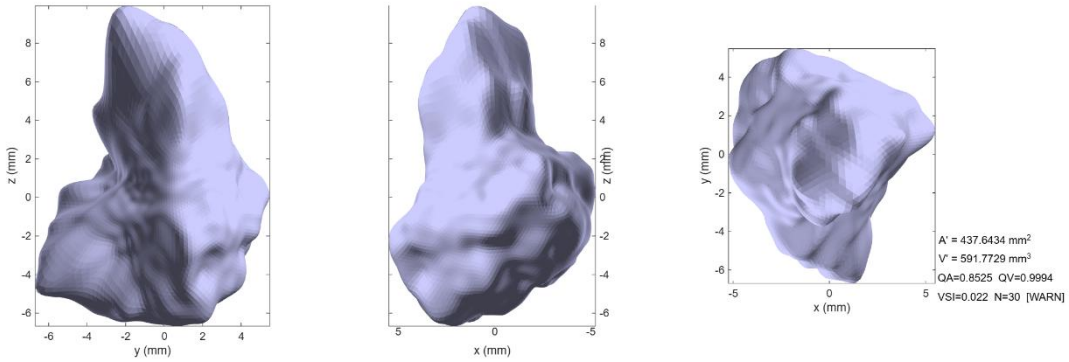

y (mm)
x (mm)
A' = 312.663 mm²
V' = 347.6766 mm³
QA=0.8525 QV=1.0002
VSI=0.022 N=30 [WARN]

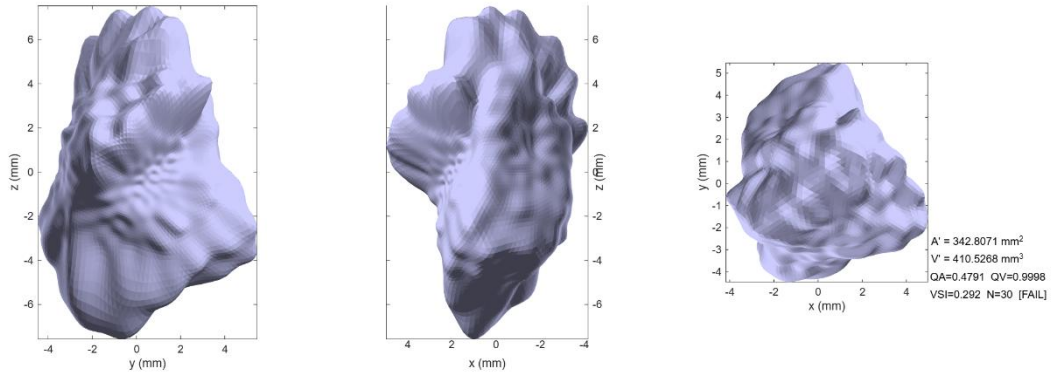

z (mm)
y (mm)
z (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 596.1923 mm²
V' = 880.9301 mm³
QA=0.9423 QV=0.9984
VSI=0.008 N=30 [WARN]

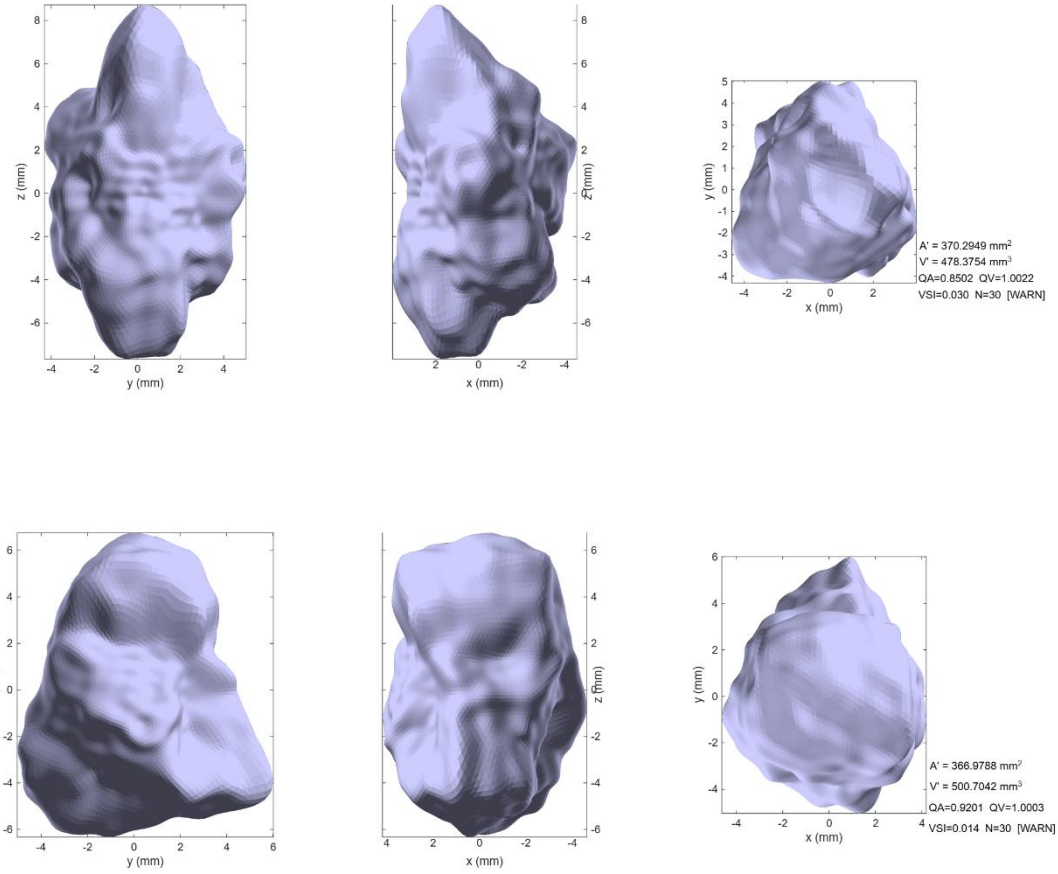

z (mm)
y (mm)
z (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 256.0569 mm²
V' = 288.4968 mm³
QA=0.8981 QV=1.0011
VSI=0.020 N=30 [WARN]

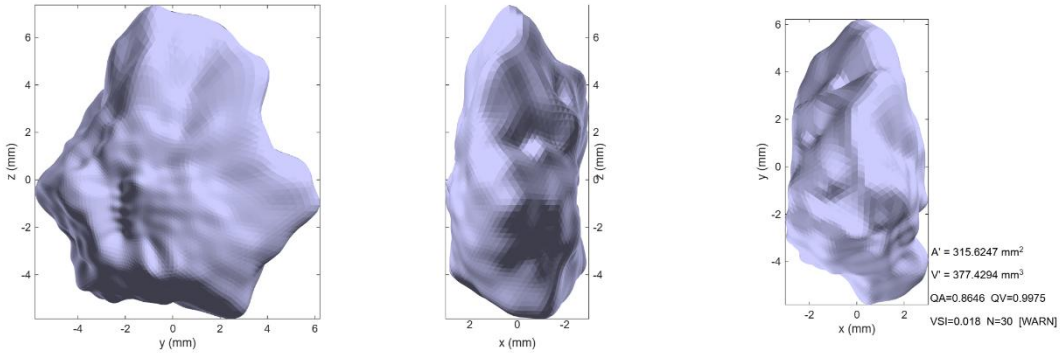

z (mm)
y (mm)
z (mm)
x (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 364.8342 mm²
V' = 465.3019 mm³
QA=0.8439 QV=1.0030
VSI=0.020 N=30 [FAIL]

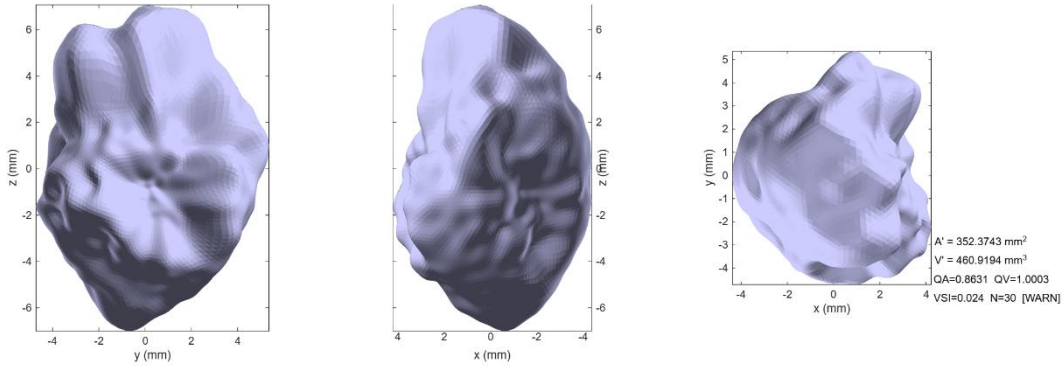

z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 278.8694 mm²
V' = 332.31 mm³
QA=0.9163 QV=0.9995
VSI=0.002 N=30 [WARN]


z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 437.6434 mm²
V' = 591.7729 mm³
QA=0.8525 QV=0.9994
VSI=0.022 N=30 [WARN]


z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 342.8071 mm²
V' = 410.5268 mm³
QA=0.4791 QV=0.9998
VSI=0.292 N=30 [FAIL]


z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 370.2949 mm²
V' = 478.3754 mm³
QA=0.8502 QV=1.0022
VSI=0.030 N=30 [WARN]
A' = 366.9788 mm²
V' = 500.7042 mm³
QA=0.9201 QV=1.0003
VSI=0.014 N=30 [WARN]


z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 315.6247 mm²
V' = 377.4294 mm³
QA=0.8646 QV=0.9975
VSI=0.018 N=30 [WARN]


z (mm)
y (mm)
x (mm)
A' = 352.3743 mm²
V' = 460.9194 mm³
QA=0.8631 QV=1.0003
VSI=0.024 N=30 [WARN]