



**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO E
FORMA DAS PARTÍCULAS NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS
GRANULARES**

AMANDDA LARA MOREIRA BRAGA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO E
FORMA DAS PARTÍCULAS NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS
GRANULARES**

AMANDDA LARA MOREIRA BRAGA

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.
COORIENTADOR: ROBINSON A. G. ZULUAGA, D.Sc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-382/2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO E FORMA DAS
PARTÍCULAS NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
SOLOS GRANULARES**

AMANDDA LARA MOREIRA BRAGA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**ROBINSON A. G. ZULUAGA, D.Sc. (UFG)
(COORIENTADOR)**

**MANOEL PORFIRIO CORDÃO NETO, Ph.D. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**JOÃO PAULO SOUZA SILVA, D.Sc. (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, OUTUBRO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

BRAGA, AMANDDA LARA MOREIRA

Estudo da influência do tamanho e forma das partículas no comportamento mecânico de solos granulares.

xx 114 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2022)

DISSERTAÇÃO de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|------------------------------|-------------------------------|
| 1. Micromecânica | 2. Análise de Forma |
| 3. Caracterização por imagem | 4. Ângulo de Repouso e Atrito |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRAGA, A.L.M. (2022). Estudo da influência do tamanho e forma das partículas no comportamento mecânico de solos granulares. DISSERTAÇÃO de Mestrado, Publicação G.TD-382/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Amanda Lara Moreira Braga

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo da influência do tamanho e forma das partículas no comportamento mecânico de solos granulares.

GRAU / ANO: Mestre / 2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Amandda Lara Moreira Braga

amanddalara@gmail.com

DEDICATÓRIA

Ao meu Deus, por me abençoar e guiar os meus caminhos. Meus pais, Antônia e Divino, que incentivaram meus estudos e se dedicaram a me motivar e financiar. Ao meu esposo, Joabbe, por me encorajar durante os dias difíceis e se dedicar a nossa família em minha ausência. Por fim as minhas companheirinhas, Nalla e Maya, por ficarem ao meu lado durante minhas horas de estudos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me guardar, proteger e iluminar. A ele sou grata por tudo.

Ao meu esposo Joabbe pelo apoio, carinho e amor incondicionais. E aos meus cachorrinhos Nalla, Maya, Amora Lucky, pelo companheirismo.

À minha família, por todo esforço para me proporcionar estudar, sobretudo meus pais, Divino e Antônia; meu irmão, Guilherme; minha avó Glória. Sempre tentarei honrar os investimentos que fizeram e a confiança que me foi depositada.

Gratidão aos meus orientadores, prof. Márcio Muniz e prof. Robinson Zuluaga, sem os quais eu jamais teria chegado até aqui. Oro a Deus pela vida de vocês.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e a todos os professores, pelo conhecimento repassado e pelos exemplos e inspiração dados.

Aos membros do grupo de pesquisa de Furnas, especialmente aos pesquisadores Renato, Alexandre, Marlos, Flávia e Marta. E aos responsáveis pelo laboratório de Geotecnia Helmar, Joaquim e Jaqueline, que sempre estiveram dispostos a me ajudar e compartilhar todo o conhecimento.

Agradeço ao apoio técnico e financeiro do projeto de P&D denominado "Otimização do modelo meteorológico BRAMS, com validação experimental, para subsidiar aperfeiçoamentos de modelagens em sistemas eólicos" de número PD-0394-1709/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobras FURNAS e Universidade de Brasília.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio econômico para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Laboratório de Infraestruturas (InfraLab) da UnB pelos diferentes recursos providos para a realização desta pesquisa. E ao Laboratório de Geotecnologia no Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas, também sou grata.

Aos amigos feitos no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, pelo companheirismo diário, e apoio em tempos de pandemia e distanciamento social. Gratidão especial a: Jaqueline, Monique, Pedro, Fernando e Lucas.

A todos que de alguma forma cruzaram meu caminho e de alguma forma me fizeram uma pessoa melhor.

Obrigada!

RESUMO

Os estudos dos parâmetros mecânicos dos materiais granulares têm sido, simplificada, baseados no contínuo. A simplicidade de estudar o meio através de modelos constitutivos fenomenológicos e ensaios de volume representativos, impossibilitou análises que medem as características das amostras em nível particulado. Com o desenvolvimento de novas ferramentas como supercomputadores e analisados de imagem, o método dos elementos discretos, que se baseia, na interação dos grãos, vem ganhando força. Nesta abordagem é possível considerar as características microscópicas das partículas na avaliação do comportamento mecânico de materiais granulares. Neste trabalho é estudada a influência do tamanho, forma e textura superficial das partículas, nos ângulos de repouso e atrito de granulares. Para isto, foram executados ensaios de caracterização granulométrica e morfológica, evidenciando parâmetros como D_{50} , esfericidade, circularidade, redondeza. Através dos ensaios de ângulo de repouso, cisalhamento direto e triaxial CD saturado, foram determinados os ângulos mencionados. Os resultados experimentais mostraram uma mesma tendência de comportamento dos materiais em relação aos ângulos de repouso e atrito. Já a caracterização das partículas evidenciou que materiais fabricados, esferas e poliedros, se assemelham em relação à textura superficial enquanto os índices de textura das areias se distinguem, devido se trata de um material natural. Os tamanhos foram distintos bem como os índices de forma, embora as esferas tenham tido índices semelhantes. Nesta pesquisa os parâmetros de tamanho não apresentaram boa relação com os ângulos. Já dentre os índices de forma, a redondeza foi a que teve melhor coeficiente de determinação. Utilizando do índice de redondeza, foram selecionadas equações da literatura que o tinham como variável. Além dos testes com equações já existentes ainda fora proposto equações com uma e duas variáveis para cada tipo de ângulo estudado. Os parâmetros escolhidos foram a redondeza, já que se relacionou melhor com os ângulos, e o D_{50} (para o atrito no cisalhamento direto), $e_{máx}$ (ângulo de repouso) e D_{10} (atrito no triaxial CD saturado), nas funções de duas variáveis. Por fim foram realizadas análises estatísticas com as equações da literatura e as propostas verificando que as equações deste estudo possuíram melhor índice de precisão e acurácia.

ABSTRACT

The studies of the mechanical parameters of granular materials have been, simply, based on the continuum. The simplicity of studying the environment through phenomenological constitutive models and representative volume tests, made it impossible to analyze the characteristics of the samples at the particulate level. With the development of new tools such as supercomputers and image analyzers, the discrete element method, which is based on the interaction of grains, has been gaining strength. In this approach it is possible to consider the microscopic characteristics of the particles in the evaluation of the mechanical behavior of granular materials. In this work, the influence of size, shape and surface texture, at the particle level, on the angles of repose and friction of granules is studied. For this, granulometric and morphological characterization tests were carried out, evidencing parameters such as D_{50} , sphericity, circularity, roundness. Through the tests of angle of repose, direct shear and saturated CD triaxial, the mentioned angles were determined. The experimental results obtained showed the same trend of behavior of the materials in relation to the resistant angles. The characterization of the particles showed that manufactured materials, spheres and polyhedrons, are similar in relation to surface texture while the sands are distinguished in the sample group itself. The sizes were different as well as the shape indices, although the spheres had similar indices. In this research, the size parameters did not show a good trend in relation to the angles. Among the shape indices, the roundness had the best coefficient of determination. Using the roundness index, equations from the literature were selected that had it as a variable. In addition to tests with existing equations, equations with one and two variables were also proposed for each type of angle studied. The chosen parameters were the roundness, since it was better related to the angles, and the D_{50} (for friction in direct shear), e_{max} (angle of repose) and D_{10} (friction in the saturated CD triaxial), in the functions of two variables. Finally, statistical analyzes were performed with the equations from the literature and the proposals verifying that the equations of this study had a better index of precision and accuracy.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	2
1.2	OBJETIVO	2
1.3	METODOLOGIA ADOTADA.....	3
1.4	ESCOPO DO TRABALHO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	4
2.1	SOLOS GRANULARES	4
2.1.1	Abordagem Contínua	4
2.1.2	Abordagem Discreta.....	5
2.2	COMPORTAMENTO MACROMECHANICO Dos MATERIAIS GRANULARES.....	6
2.2.1	Densidade Relativa.....	7
2.2.2	Estado de Tensões do Solo.....	9
2.2.3	Fatores de influência do Ângulo de Atrito	9
2.3	A MICROESTRUTURA DOS MATERIAIS GRANULARES	10
2.3.1	Tamanho e Distribuição granulométrica das partículas	10
2.3.2	Forma dos Grãos	13
2.3.3	Arranjo microestrutural dos Solos Granulares	17
3	METODOLOGIA	19
3.1	MATERIAIS	19
3.1.1	Esferas de Vidro	19
3.1.2	Areia Padrão	21
3.1.3	Sólidos Platônicos	22
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	23
3.2.1	Determinação da Massa Específica dos Grãos (G_s).....	23
3.2.2	Determinação dos Índice de Vazios ($e_{máx}$, $e_{mín}$).....	24
3.2.3	Curva Granulométrica	26
3.2.4	Determinação de Tamanho, Forma e Textura no FlowSync	26
3.2.5	Determinação de Tamanho, Forma e Textura no Partan 3D.....	27
3.3	ENSAIOS MECÂNICOS	29
3.3.1	Ângulo de Repouso	29
3.3.2	Cisalhamento Direto.....	34
3.3.3	Ensaio de Compressão Triaxial.....	36
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	39
4.1	ÍNDICES FÍSICOS	39

4.1.1	Esferas de Vidro	39
4.1.2	Areia Padrão	39
4.1.3	Sólidos Platônicos	40
4.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	40
4.2.1	Esferas de Vidro	40
4.2.2	Areia Padrão	44
4.2.3	Sólidos Platônicos	47
4.3	ANÁLISE DE FORMA E TEXTURA	50
4.3.1	Esferas de Vidro	51
4.3.2	Areia Padrão	54
4.3.3	Sólidos Platônicos	55
4.4	ENSAIO DE ÂNGULO DE REPOUSO.....	57
4.4.1	Esferas de Vidro	58
4.4.2	Areias Padrão	60
4.4.3	Sólidos Platônicos	63
4.5	ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO.....	65
4.5.1	Esferas de Vidro	65
4.5.2	Areias Padrão	67
4.5.3	Sólidos Platônicos	68
4.6	ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL	70
4.6.1	Esferas de Vidro	70
4.6.2	Areias Padrão	72
4.6.3	Sólidos Platônicos	73
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	75
5.1	ANÁLISES DOS ÍNDICES DE TEXTURA NO COMPORTAMENTO GRANULAR.....	75
5.2	COMPARAÇÃO DO TAMANHO COM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS	76
5.2.1	Esferas de Vidro	76
5.2.2	Areias Padrão	78
5.2.3	Sólidos Platônicos	78
5.2.4	Análise de Tamanho com todos os materiais	79
5.2.4.1	<i>Análise com Ângulo de Atrito determinado no Cisalhamento Direto</i>	<i>80</i>
5.2.4.2	<i>Análise com Ângulo de Repouso</i>	<i>82</i>
5.2.4.3	<i>Análise com Ângulo de Atrito determinado no Triaxial.....</i>	<i>82</i>
5.3	COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE FORMA COM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS	83
5.3.1	Esferas de Vidro	83
5.3.2	Areias Padrão	86
5.3.3	Sólidos Platônicos	88
5.3.4	Análise com todas as amostras	91
5.3.4.1	<i>Análise com Ângulo de Atrito determinado no Cisalhamento Direto</i>	<i>92</i>
5.3.4.2	<i>Análise com Ângulo de Repouso</i>	<i>95</i>
5.3.4.3	<i>Análise com Ângulo de Atrito determinado no Triaxial.....</i>	<i>97</i>

5.4	INFLUÊNCIA DE DUAS VARIÁVEIS NO ATRITO	97
5.4.1.1	<i>Análise do Ângulo de Atrito determinado no Cisalhamento Direto</i>	98
5.4.1.2	<i>Análise do Ângulo de Repouso</i>	101
5.4.1.3	<i>Análise do Ângulo de Atrito determinado no Triaxial</i>	103
5.5	ANÁLISES ESTATÍSTICA DAS EQUAÇÕES DETERMINADAS.....	104
6	CONCLUSÃO	107
6.1	SUGESTOES PARA PESQUISAS FUTURAS	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação de solos granulares com a compactidade (Lambe & Whitman, 1969).	7
Tabela 2.2. Índices de Forma e Angularidade, de acordo com Cox e Budhu (2008).	14
Tabela 2.3. Índices de Textura Superficial.....	15
Tabela 2.4. Relações encontradas na bibliografia.	17
Tabela 3.1. Dados das Esferas de Vidro usadas, fornecidas pelos fabricantes.	20
Tabela 3.2. Dados das Areias fornecidos pelo IPT.	21
Tabela 3.3. Propriedades dos materiais usados na fabricação dos poliedros.	22
Tabela 3.4. Resultados da Caracterização física das Esferas de Vidro.	23
Tabela 3.5. Dados das bases e dos funis usados nos ensaios.	30
Tabela 3.6. Cálculo do Volume das pilhas para cada tipo de amostra.	34
Tabela 4.1. Resultados da Caracterização física das Esferas de Vidro.	39
Tabela 4.2. Resultados da Caracterização física das Areias do IPT.	39
Tabela 4.3. Resultados da Caracterização física dos Poliedros.....	40
Tabela 4.4. Propriedades das Amostras extraídos do ensaio de Curva Granulométrica, das Esferas.	41
Tabela 4.5. Propriedades de Tamanho, das Esferas de Vidro, extraídos do SYNC.....	43
Tabela 4.6. Propriedades das Esferas de Vidro extraídos do SYNC, sobre dimensões.	44
Tabela 4.7. Propriedades das Areias Padrão, extraídos do ensaio de Curva Granulométrica..	44
Tabela 4.8. Propriedades das Areias extraídos dos dados do Analisador de Imagens.	46
Tabela 4.9. Propriedades das Areias extraídos do SYNC.	46
Tabela 4.10. Propriedades dos Sólidos, extraídos do ensaio de Curva Granulométrica.	47
Tabela 4.11. Propriedades dos Poliedros, extraídos do SYNC.	47
Tabela 4.12. Propriedades dos Poliedros, extraídos do SYNC.	48
Tabela 4.13. Índice de Forma extraídos das análises de imagens das Esferas de Vidro.....	51
Tabela 4.14. Índices de Textura Superficial extraídos das análises de imagens para Esferas.	53
Tabela 4.15. Índices de Forma extraídos das análises de imagens, das Areias Padrão.....	54
Tabela 4.16 Índices de Textura extraídos das análises de imagens, das Areias Padrão.....	55
Tabela 4.17. Índice de Forma extraídos das análises de imagens das Esferas de Vidro.....	56
Tabela 4.18. Índice de Forma extraídos das análises de imagens dos Sólidos Platônicos.....	57
Tabela 4.19. Dados retirados do ensaio de Ângulo de Repouso.	59

Tabela 4.20. Índice de Forma extraídos das análises de imagens das Esferas de Vidro.....	60
Tabela 4.21. Dados retirados do ensaio de Ângulo de Repouso.....	61
Tabela 4.22. Índice de Forma extraídos das análises de imagens das Areias.....	62
Tabela 4.23. Dados retirados do ensaio de Ângulo de Repouso.....	63
Tabela 4.24. Índice de Forma extraídos das análises de imagens dos Poliedros.....	65
Tabela 4.25. Densidade relativa de cada corpo de prova.....	65
Tabela 4.26. Resultados do ensaio de Cisalhamento Direto.....	66
Tabela 4.27. Densidade relativa de cada corpo de prova.....	67
Tabela 4.28. Resultados do ensaio de Cisalhamento Direto.....	68
Tabela 4.29. Densidade relativa de cada corpo de prova.....	68
Tabela 4.30. Resultados do ensaio de Cisalhamento Direto.....	69
Tabela 4.31. Densidade relativa de cada CP moldado para o ensaio de Compressão Triaxial.....	70
Tabela 4.32. Parâmetros extraídos do ensaio de Compressão Triaxial, das Esferas de Vidro.....	71
Tabela 4.33. Densidade relativa, de cada amostra de areia padrão, moldado.....	72
Tabela 4.34. Parâmetros extraídos do ensaio de Compressão Triaxial, das Esferas de Vidro.....	73
Tabela 4.35. Densidade relativa, de cada corpo de prova, moldado.....	73
Tabela 4.36. Parâmetros extraídos do ensaio de Compressão Triaxial, das Esferas de Vidro.....	73
Tabela 5.1. Relação do D_{50} das esferas, com os Ângulos.....	77
Tabela 5.2. Relação do D_{50} das areias, com os Ângulos.....	78
Tabela 5.3. Relação dos parâmetros de Redondeza com os de resistência.....	84
Tabela 5.4. Relação dos parâmetros de Redondeza com os de resistência.....	86
Tabela 5.5. Relação da Redondeza com os ângulos encontrados nos poliedros.....	89
Tabela 5.6. Relação dos melhores índices de forma, para todas as amostras, com os ângulos.....	92
Tabela 5.7. Ângulo de Repouso.....	105
Tabela 5.8. Ângulo de Atrito de Pico Cisalhamento Direto.....	105
Tabela 5.9. Ângulo de Atrito Residual Cisalhamento Direto.....	106
Tabela 5.10. Ângulo de Atrito Triaxial.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Meio contínuo e descontínuo (Zuluaga, 2016).	6
Figura 2.2. Ilustração da dilatação e contração da amostra.....	8
Figura 2.3. Influência da D_R na I) Tensão desvio e II) Porosidade (Modificado de Salot <i>et al.</i> , 2009).....	8
Figura 2.4. Influência do Estado de Tensões nas areias I) Tensão desvio e II) Deformação volumétrica (Hassanlourad <i>et al.</i> , 2010).	9
Figura 2.5. Grãos ao serem peneiradas, sofrendo rotações.	11
Figura 2.6. Efeito do tamanho das partículas no ângulo de atrito no estado crítico de areias de morfologia semelhante (Han <i>et al.</i> , 2018).....	12
Figura 2.7. Efeito dos parâmetros granulométricos no atrito de areias (Rasti <i>et al.</i> , 2021).....	13
Figura 2.8. Características morfológicas das partículas (Guo <i>et al.</i> , 2018).	14
Figura 2.9. Relações entre o ângulo de repouso e a forma de partícula (Zong-Chuan, 2018). 16	
Figura 2.10. Atrito mobilizado em relação a Esfericidade (Modificado de Lei <i>et al.</i> , 2020). 16	
Figura 2.11. Influência do arranjo das partículas do solo na sua compactidade (Neves, 2009).	17
Figura 2.12. Efeitos da densidade relativa inicial ($D_R = 90\%$ e 40%) nas resistências ao cisalhamento de partículas impressas: I) Esfera e II) Octaedro (Modificado de Lei <i>et al.</i> , 2020).	18
Figura 3.1. Metodologia proposta.	19
Figura 3.2. Esferas de vidros usadas no estudo.....	20
Figura 3.3. Frações de Areia utilizadas nos ensaios.....	21
Figura 3.4. Partículas fabricadas sob forma de sólidos platônicos.....	22
Figura 3.5. Picnômetro com Areia Padrão.	23
Figura 3.6. Realização de massa específica, através do frasco de Chapman.	24
Figura 3.7. Determinação do índice de Vazios Máximo.....	24
Figura 3.8. Determinação do Índice de Vazios Mínimo.	25
Figura 3.9. Determinação do Índice de Vazios Máximo, dos poliedros.	25
Figura 3.10. Determinação do Índice de Vazios Mínimo, dos poliedros.....	25
Figura 3.11. Ensaio de Granulometria, em esferas de vidro.	26
Figura 3.12. Método de análise do FlowSync.	27
Figura 3.13. Imagens retiradas pelo FlowSync.	27
Figura 3.14. Caracterização das partículas com o PartAn 3D.....	28

Figura 3.15. Imagens retiradas com o PartAn 3D.	29
Figura 3.16. Itens para realização do ensaio: I) Equipamento, II) Funis e III) Bases.	30
Figura 3.17. Etapas do ensaio: I) Medição inicial, II) Formação da pilha, III) Medição final, IV) Imagem do cone V) Medição da massa da pilha e VI) Imagem do ensaio.	31
Figura 3.18. Cálculo do ângulo de repouso: I) Equação da altura do cone e II) Equação do ângulo de repouso.	31
Figura 3.19. Pilhas formadas pelas esferas de vidro, evidenciando as flechas.	32
Figura 3.20. Pilhas formadas pelas areias, evidenciando as flechas.	32
Figura 3.21. Pilhas formadas pelos poliedros, evidenciando as flechas.	33
Figura 3.22. Programa Ângulo de Repouso, desenvolvido pela equipe matemática do Infralab.	33
Figura 3.23. Cisalhamento Direto: I) Equipamento em ensaio, II) Regulagem para cisalhamento, III) Leitura de deslocamento vertical e horizontal e IV) Ajuste da velocidade.	34
Figura 3.24. Montagem dos corpos de prova para o cisalhamento direto: I) Caixa Bipartida montada, II) Pedra porosa de fundo, III) Material sendo colocado na caixa, IV) Regularização do material, V) Papel filtro, VI) Pedra porosa de topo e VII) Topo da caixa.	35
Figura 3.25. Corpos de prova após cisalhamento: I) Esfera de Vidro, II) Areia Padrão e III) Poliedro.	35
Figura 3.26. Montagem do Ensaio de Compressão Triaxial: I) Base com a pedra porosa e papel filtro, II) Fixação da membrana com o-ring, III) Membrana fixada com dois o-rings, IV) Gabarito metálico, V) Fixação do Gabarito metálico, VI) Preparação das bombas de sucção, VII) Bombas acopladas ao gabarito e a base, VIII) Moldagem da amostras, IX) Regularização do topo do CP, X) CP com o topo acoplado e vedado com o-ring superior, XI) Fixação da segunda membrana, XII) Montagem do CP finalizada, XIII) Enchimento da câmara com água.	37
Figura 3.27. Etapas do Ensaio de Compressão Triaxial; I) Saturação por percolação, II) Saturação por contrapressão, III) Consolidação, IV) Programação do ensaio e registro de dados do Cisalhamento e V) Cisalhamento.	38
Figura 3.28. Amostras após o rompimento: I) Esfera de Vidro, II) Areia Padrão e III) Poliedro.	38
Figura 4.1. Curvas Granulométricas das Microesferas de Vidro.	40
Figura 4.2. Resultados da granulometria por volume e por número de partículas, das Esferas.	42
Figura 4.3. Parâmetros de Tamanho, das Esferas, extraídos dos ensaios de análise de imagem.	43
Figura 4.4. Curvas Granulométricas das Areias Padrão.	44
Figura 4.5. Resultados por volume e por número de partículas, das Areias.	45

Figura 4.6. Parâmetros de Tamanho extraídos dos ensaios de análise de imagem das Areias Padrão.....	46
Figura 4.7. Curvas Granulométricas dos Sólidos Platônicos.	47
Figura 4.8. Parâmetros de Tamanho extraídos dos ensaios de análise de imagem dos Sólidos Platônicos.	48
Figura 4.9. Parâmetros de fabricação dos poliedros em comparação aos medidos.	49
Figura 4.10. Dimensões dos Sólidos Platônicos em comparação ao processo de fabricação usado.....	50
Figura 4.11. Parâmetros de Forma extraídos dos ensaios de análise de imagem, das Esferas.	52
Figura 4.12. Curvas de Textura Superficial, das Esferas de Vidro.	53
Figura 4.13. Curvas dos parâmetros de Forma, das Areias Padrão.....	54
Figura 4.14. Curvas dos parâmetros de Textura Superficial, para areias.	55
Figura 4.15. Curvas dos parâmetros de Forma, para sólidos platônicos.....	56
Figura 4.16. Curvas dos parâmetros de Textura Superficial, para sólidos platônicos.	57
Figura 4.17. Apresentação dos resultados do ensaio de Ângulo de Repouso para Esferas.	58
Figura 4.18. Relação da densidade com o Ângulo de Repouso, em Esferas de Vidro.	59
Figura 4.19. Relação do Índice de vazios com o Ângulo de Repouso, em Esferas de Vidro. .	59
Figura 4.20. Relação da compacidade amostral com o Ângulo de Repouso, em Esferas.....	60
Figura 4.21. Relação da compacidade amostral com o Ângulo de Repouso, em Areias.	61
Figura 4.22. Relação da densidade com o Ângulo de Repouso, em Areias.....	61
Figura 4.23. Relação do Índice de vazios com o Ângulo de Repouso, em Areias.....	62
Figura 4.24. Relação da compacidade amostral com o Ângulo de Repouso, em Areias.	62
Figura 4.25. Relação da compacidade amostral com o Ângulo de Repouso, em Sólidos Platônicos.	63
Figura 4.26. Relação da densidade com o Ângulo de Repouso, em Poliedros.	64
Figura 4.27. Relação do Índice de vazios com o Ângulo de Repouso, em Poliedros.....	64
Figura 4.28. Relação da compacidade amostral com o Ângulo de Repouso, em Poliedros. ...	64
Figura 4.29. Envoltórias de resistência máxima (pico) das Esferas de Vidro.....	66
Figura 4.30. Envoltórias de resistência residual das Esferas de Vidro.	66
Figura 4.31. Envoltórias de resistência máxima (pico) das Areias.	67
Figura 4.32. Envoltórias de resistência residual das Areias.	68
Figura 4.33. Envoltórias de resistência máxima (pico) dos Sólidos Platônicos.....	69
Figura 4.34. Envoltórias de resistência residual dos Sólidos Platônicos.	69

Figura 4.35. Representação do estado de tensões, das Esferas de Vidro, pelas trajetórias.....	71
Figura 4.36. Representação do estado de tensões, das areias, pelas trajetórias.	72
Figura 4.37. Representação do estado de tensões pelas trajetórias.	74
Figura 5.1. Análise da influência do Índice de Solidez no Ângulo de Atrito.	75
Figura 5.2. Comparativo entre os materiais dos índices de textura.....	76
Figura 5.3. Efeito do D_{50} nos Ângulos; I) Repouso, II) Atrito de Pico e Residual no Cisalhamento Direto e III) Atrito no Triaxial.	77
Figura 5.4. Efeito do tamanho nos ângulos de repouso e atrito das Areias Padrão.	78
Figura 5.5. Tamanho dos sólidos pelos ângulos de repouso e atrito.	79
Figura 5.6. Efeito do D_{50} ângulos de repouso e atrito dos materiais ensaiados.	80
Figura 5.7. Relação do Ângulo de Atrito Residual com o D_{50} de materiais granulares.	80
Figura 5.8. Comparativo entre os Ângulos de Atrito Residual calculados com as equações; I) de Rasti <i>et al.</i> (2021) e II) de Han <i>et al.</i> (2018).	81
Figura 5.9. Comparativo entre os Ângulos de Atrito de Pico calculados com as equações; I) de Rasti <i>et al.</i> (2021) e II) de Han <i>et al.</i> (2018).	81
Figura 5.10. Comparativo entre os Ângulos de Repouso calculados com as equações; I) de Rasti <i>et al.</i> (2021) e II) de Han <i>et al.</i> (2018).	82
Figura 5.11. Comparativo entre os Ângulos de Atrito calculados com Han <i>et al.</i> (2018).	83
Figura 5.12. Efeito da Forma nos ângulos de repouso e atrito das esferas de vidro.	85
Figura 5.13. Efeito da Forma nos ângulos de repouso e atrito das areias padrão.	87
Figura 5.14. Efeito do Número de Faces e Vértices nos índices de forma dos Sólidos Platônicos.	88
Figura 5.15. Efeito do Número de Faces nos ângulos de repouso e atrito dos Sólidos Platônicos.	88
Figura 5.16. Efeito da Forma nos ângulos de repouso e atrito dos poliedros.	90
Figura 5.17. Efeito dos Índices de Forma nos ângulos de repouso e atrito de todas as amostras ensaiadas na pesquisa.	91
Figura 5.18. Comparativo entre os Ângulos de Atrito estimados com a equação de Cho <i>et al.</i> (2006) com os Ângulos de Atrito; I) Residual e II) Pico.	92
Figura 5.19. Materiais e Dados de artigos sendo relacionados com a R_{50} e o ϕ_{Res}	93
Figura 5.20. Relações encontradas onde I) Materiais com $R > 0,70$ e $D_{50} < 1,00\text{mm}$ e II) demais materiais.	93
Figura 5.21. Comparativo entre os Ângulos de Atrito Residual experimentais e os Ângulos de Atrito estimados com as Equações; I) (5-1) e II) (5-2).	94

Figura 5.22. Comparativo entre os Ângulos de Atrito de Pico experimentais e os Ângulos de Atrito estimados com as Equações; I) (5-1) e II) (5-2).	94
Figura 5.23. Comparativo entre os Ângulos de Repouso determinado em laboratório dos Ângulos de Repouso estimados com as equações; I) de Rousé et al. (2008) II) e de Cho et al. (2006).	95
Figura 5.24. Proposta de novas equações que relacionem o R_{50} com os Ângulos de Repouso.	96
Figura 5.25. Comparativo entre os Ângulos de Repouso determinado em laboratório dos Ângulos de Repouso estimados com as equações; I) (5-5) II) (5-6).	96
Figura 5.26. Comparativo entre os Ângulos de Atrito determinado em laboratório dos Ângulos de Atrito estimados com a equação (5-8).	97
Figura 5.27. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Atrito Residual por meio de função potencial; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.	98
Figura 5.28. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Atrito Residual por meio de função linear; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.	99
Figura 5.29. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Atrito de Pico por meio de função potencial; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.	100
Figura 5.30. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Atrito de Pico por meio de função linear; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.	101
Figura 5.31. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Repouso por meio de função polinomial; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.	102
Figura 5.32. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Repouso por meio de função linear; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.	102
Figura 5.33. Relação do R_{50} e D_{10} com o Ângulo de Atrito por meio de função polinomial; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.	103
Figura 5.34. Relação do R_{50} e D_{10} com o Ângulo de Atrito por meio de função linear; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

DEM	Método dos Elementos Discretos (<i>Discrete Element Method</i>)
MEF	Método dos Elementos Finitos
TTE	Trajectoria de Tensões Efetivas
TTT	Trajectoria de Tensões Totais

SÍMBOLOS

D_a	Diâmetro equivalente a área
D_p	Diâmetro equivalente ao perímetro
S_{50}	Esfericidade média
C_{50}	Circularidade média
R_{50}	Redondeza média
CO_{50}	Compacidade média
W/L_{50}	Relação largura/comprimento média
V_{50}	Convexidade média
L_{50}	Solidez média
O_{50}	Concavidade média
C_c	Coefficiente de curvatura
C_u	Coefficiente de uniformidade
G_s	Massa Específica dos Grãos
$\rho_s \text{ MÁX}$	Massa Específica Máxima
$\rho_s \text{ MÍN}$	Massa Específica Mínima
$\gamma_s \text{ MÁX}$	Peso específico máximo
$\gamma_s \text{ MÍN}$	Peso específico mínimo
$e \text{ MÁX}$	Índice de Vazios Máximo
$e \text{ MÍN}$	Índice De Vazios Mínimo
ϕ_{Rf}	Ângulo de Repouso de maior frequência
ϕ_{Rm}	Ângulo de Repouso médio
$\phi_{Rmín}$	Ângulo de Repouso mínimo
$\phi_{Rmáx}$	Ângulo de Repouso máximo
σ_p	Desvio padrão
ϕ_{pico}	Ângulo de Atrito de pico obtido no cisalhamento direto

ϕ_{residual}	Ângulo de Atrito residual obtido no cisalhamento direto
ϕ_{TX}	Ângulo de Atrito obtido no triaxial
c'	coesão
p	Invariante de tensão normal média (Cambridge)
q	Invariante de tensão cisalhante
σ	Tensão
ε_1	Deformação axial
ε_v	Deformação volumétrica
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
g	Gramma
GPa	Giga Pascal
kN	Kilo Newton
kPa	Kilo Pasca

1 INTRODUÇÃO

Nas diversas áreas da engenharia o uso de materiais granulares ocorre em alta escala, necessitando de estudos para otimizar e facilitar o processo de aplicação desses materiais, especialmente em obras civis. O entendimento do comportamento desse material depende da elucidação de suas propriedades e de seu comportamento mecânico.

Solos granulares, na Mecânica dos Solos, são definidos como um conjunto de sólidos classificados quanto a sua granulometria, e mais recentemente por sua morfologia. A resistência mecânica desses solos vem, principalmente, dos contatos das partículas e do como se dá o arranjo de empacotamento, não existindo influência de forças de coesão entre os minerais, frisando que o comportamento resistente dos granulares vêm do atrito entre as partículas (Zuluaga, 2016).

Assim o parâmetro mais usado para entender o quão resistente é um solo granular é o ângulo de atrito, podendo ser determinado em ensaios como o cisalhamento direto e triaxial. Outro parâmetro que mede a resistência dos solos e possui sua determinação de forma simplificada é o ensaio de ângulo de repouso, que embora apresente imprecisões devido a sua simplicidade, consegue extrair o ângulo de repouso do material sem que haja algum tipo de confinamento e/ou coesão com a horizontal (Guzmán, 2008).

Em geotecnia, o estudo da mecânica dos meios granulares tem se tratado, tradicionalmente, como um meio contínuo. A simplificação do meio particulado em um meio contínuo apresenta dificuldades em capturar as influências da micromecânica, sendo limitados ao se tratar de problemas de engenharia que envolvam grandes deformações, propagações de fraturas no meio, entre outros (Donzé *et al.*, 2009).

A estrutura morfológica das partículas, bem como seu tamanho e distribuição granulométrica tem grande influência no comportamento físico e mecânico do meio, sendo objeto de várias pesquisas. Diversos autores têm procurado relacionar os materiais granulares e suas propriedades microscópicas para entender a influência de suas características na perspectiva da sua resposta mecânica.

Alguns estudos apontam o efeito da forma, do tamanho e da mineralogia de materiais granulares (areias, esferas, partículas produzidas em impressoras 3D) nas características do *interlocking* e no comportamento mecânico, abordando o problema experimentalmente e através de simulações baseadas em métodos numéricos (Zong-Chuan, 2018; Al-Hashemi e Al-Amoudi, 2018; Wei *et al.*, 2019).

A presente dissertação visa estudar a influência da morfologia e do tamanho das partículas nos resultados de ensaios mecânicos. Para tanto serão realizados ensaios mecânicos e de caracterização.

Esse trabalho foi desenvolvido com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Faz parte do projeto de P&D "Otimização do modelo meteorológico BRAMS, com validação experimental, para subsidiar aperfeiçoamentos de modelagens em sistemas eólicos" - PD-0394-1709/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobras FURNAS e UnB.

1.1 MOTIVAÇÃO

Compreender o comportamento de materiais granulares em uma escala microscópica para elucidar as propriedades mecânicas de maneira científica. O uso de insumos granulares na engenharia e mais especificamente na geotecnia, ocorre em larga escala. Entretanto, por ser tratar de um material de morfologia heterogênea não há investigações experimentais minuciosas de como o meio microscópico influencia na resistência mecânica dessas matérias-primas.

Para preencher a lacuna que a área experimental enfrenta para caracterizar esses materiais, o método dos elementos discretos surge. Este consegue realizar simulações dos mais diversos ensaios com partículas de forma variável. Entretanto, é necessário que essas simulações sejam validadas através de ensaios realizados em laboratório.

Atualmente tem surgido mais aparatos capazes de caracterizar os granulares quanto ao seu tamanho, forma e textura superficial possibilitando novas pesquisas que relacionam com o comportamento mecânico, do material, com suas características morfológicas. Portanto, é necessário fazê-lo antes de se aventurar pelas simulações numéricas.

1.2 OBJETIVO

O objetivo desta dissertação estudar a influência da morfologia e do tamanho das partículas nos resultados de ensaios mecânicos. Isto ocorrerá através de ensaios laboratoriais de resistência e ensaios determinadores dos aspectos de tamanho e forma de partículas. Ao fim, serão correlacionados os aspectos granulométricos e morfológicos das partículas com os resultados obtidos nos experimentos mecânicos. Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Criar um banco de dados de ensaios laboratoriais sob condições e materiais controlados quanto à forma e ao tamanho das partículas para fornecer parâmetros para alimentação de modelos numéricos;

- Avaliar os efeitos da morfologia e do tamanho das partículas nos parâmetros de resistência extraídos dos ensaios mecânicos.

1.3 METODOLOGIA ADOTADA

Para o estudo da influência do tamanho e morfologia das partículas no comportamento mecânico de solos, este trabalho divide-se em duas fases de execução. A primeira fase está relacionada com a realização dos ensaios experimentais, com a finalidade de obter a descrição de forma e tamanho das partículas e os parâmetros de resistência dos materiais. A última etapa apresenta as análises e correlações dos resultados dos ensaios de caracterização e mecânicos, a fim de identificar as variáveis de maior impacto no comportamento dos granulares.

1.4 ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos. A seguir se apresenta um breve resumo dos capítulos componentes deste trabalho.

O presente capítulo faz-se uma contextualização da importância do estudo de materiais granulares ao nível microscópico, as motivações e as indagações da pesquisa.

No Capítulo 2 ocorre uma breve revisão bibliográfica do comportamento de solos granulares, sobre o ponto de vista estrutural e mecânico, evidenciando as características microestruturais que afetam o comportamento de um maciço. Também são abordados os principais métodos de determinação das características morfológicas das partículas e suas normativas. Por último, é relatada uma revisão sucinta, dos ensaios mecânicos realizados.

No Terceiro Capítulo descreve-se a metodologia adotada neste trabalho, exibindo os tipos de materiais usados e suas amostras. Os equipamentos utilizados para quantificar os índices de forma. E por fim os procedimentos e ferramentas utilizadas para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios. Iniciando com a apresentação dos índices físicos, seguidos da granulometria, granulometria por análise de imagens, os índices de forma e textura superficial. Enfim os resultados dos ensaios mecânicos de ângulo de repouso, cisalhamento direto e compressão triaxial.

No quinto capítulo, são apontadas as análises usando os materiais e propondo o uso de funções com um ou duas variáveis para a determinação dos ângulos de atrito e repouso.

O Capítulo 6 sintetiza as conclusões do trabalho e as sugestões para pesquisas futuras. Ainda são mostradas as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo resumirá os conceitos fundamentais necessários para abordar o tema em questão. Uma breve revisão bibliográfica será realizada sobre as diversas propriedades microestruturais e mecânicas de solos granulares.

2.1 SOLOS GRANULARES

Os solos granulares são caracterizados por sua resistência está associada ao conjunto de contatos, que suas partículas, acumulam. A classificação quanto aos materiais granulares, em geotecnia, possui uma escala granulométrica bastante robusta. De areias finas até os matações são classificados e analisados com a mesma perspectiva mecânica.

Fatores como a forma, tamanho, distribuição das partículas e os contatos entre elas estão ligadas a micro estrutura do solo. Já a densidade, anisotropia e arranjo das partículas determinarão a macroestrutura do maciço.

Considerando esses fatos, a ciência passou a entender os materiais granulares como de natureza contínuo-descontínuo, a depender da escala de observação, segundo Wood (2004). Ao analisar o maciço, o solo pode ser descrito como um contínuo, usando argumentos da mecânica contínua. Na escala de partículas, o material é descontínuo e se comporta de acordo com a mecânica newtoniana. Devido a dualidade dos granulares, estes podem ser estudados em dois modelos distintos, o modelo contínuo e o discreto (Andrade et al., 2011).

2.1.1 Abordagem Contínua

O entendimento mecânico do comportamento de solos granulares na escala macroscópica, hoje, é um dos pilares da resistência ao cisalhamento. Ao considerar esse meio como contínuo assume-se que a resistência é igual em todos os pontos da amostra e as forças partícula-partícula são desconsideradas.

A utilização dessa abordagem e uma estratégia normalmente utilizada para solucionar os problemas complexos da engenharia geotécnica. Além disso, com o uso da técnica numérica dos Elementos Finitos (MEF) acoplados ao modelo mecânico, possibilitaram o uso desses materiais com maior segurança e assertividade.

A consequência, do uso dessa abordagem, é a limitação das análises a relação causa-efeito (tensão-deformação). Assim, a finalidade de diversos estudos na área geotécnica é prever a relação tensão-deformação do solo, sendo necessária a adoção de um modelo constitutivo adequado.

De acordo com Neves (2009), muitos modelos foram criados para atender as características complexas dos solos. Entretanto, quanto mais amplo o modelo, mais complexo são os cálculos matemáticos. Além de necessitar de um número maior de parâmetros a ser determinado em laboratório.

Além do mais, modelos baseados na mecânica do contínuo são embasados em ensaios laboratoriais para materiais específicos, sendo muitas vezes não permitido sua elucidação à outros materiais. Outro ponto que as respostas obtidas com esses modelos descrevem um comportamento em macro escala, porém essas respostas são somas de características morfológicas das partículas (Ibañez, 2008).

Os modelos constitutivos ocuparam um lugar de destaque na geomecânica devido à sua versatilidade e capacidade de capturar as características mais proeminentes dos solos. No entanto, os modelos atuais enfrentam limitações quando lidam com aplicações fora do campo fenomenológico (Andrade *et al.*, 2010).

2.1.2 Abordagem Discreta

O material granular é um aglomerado de partículas distintas que perdem energia ao interagir com outras partículas. O entendimento das interações entre os grãos é complexo pois envolve condições de carregamento e descarregamento, que induzem comportamentos como a anisotropia. Tais condições impossibilitam que o problema seja modelado com os princípios da mecânica do contínuo. Para problemas que envolvem a micromecânica uma abordagem alternativa é o método dos elementos discretos (DEM) (Jiang *et al.*, 2006).

Segundo Neves (2009), a abordagem do DEM modela os solos como um conjunto de partículas e obtém as respostas ao carregamento, do ponto de vista macro e microscópico, analiticamente, numericamente ou experimentalmente. O método usa a segunda lei de Newton para cada partícula e as forças de contato entre grãos são calculadas por leis constitutivas.

O uso deste método numérico permite a escolha de modelos constitutivos relativamente simples. Com esses artifícios torna-se possível a modelagem micro e macromecânica do comportamento tensão-deformação dos granulares e estabelecer relações entre as suas propriedades de escala granular a escala do maciço.

Além disso, é possível compreender melhor a influência de alguns aspectos sobre o comportamento do solo. Aspectos que passam despercebidos na abordagem contínua, mas que são imprescindíveis no comportamento microscópico do material. Tais características se tratam da morfologia do material, dos contatos entre partículas, densidade relativa da amostra, entre outros.

A Figura 2.1 apresenta uma diagramação resumida de ambos os modelos de abordagem no estudo dos materiais granulares.

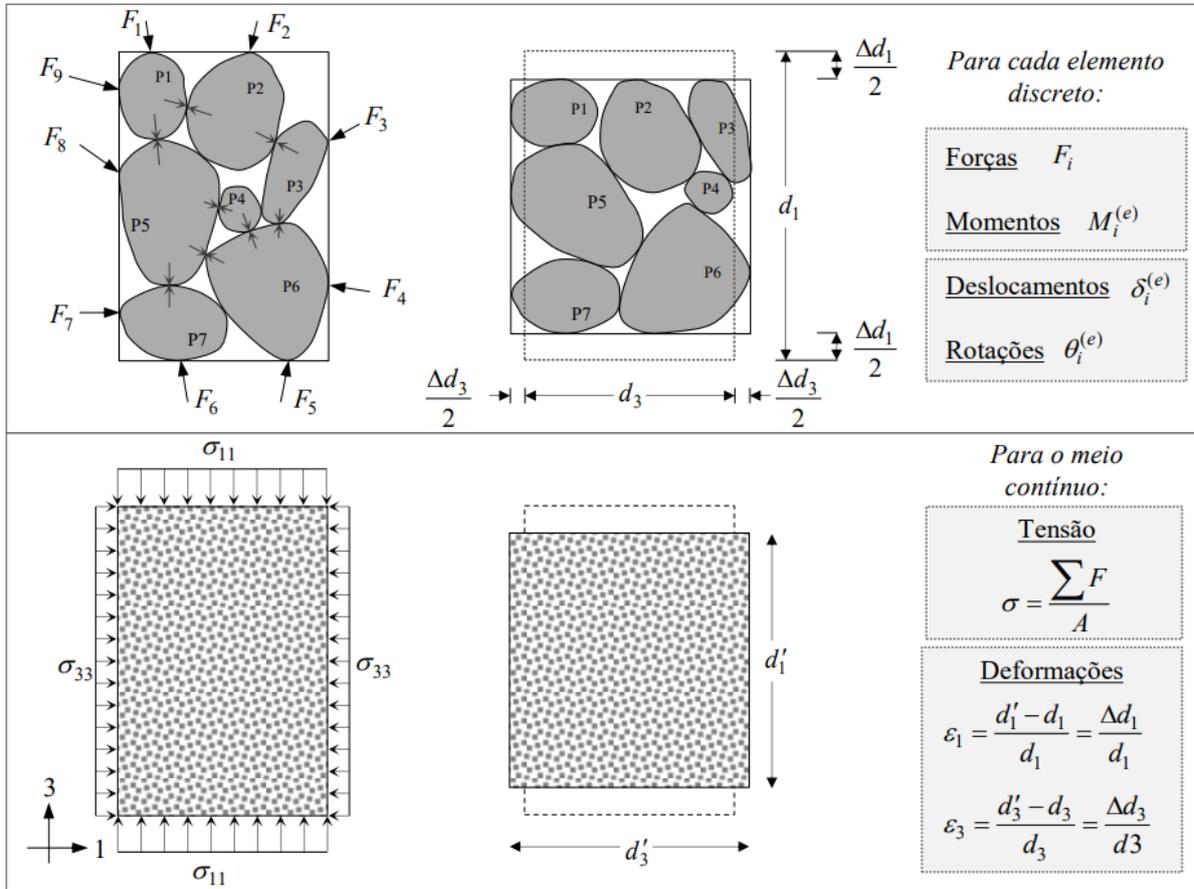


Figura 2.1. Meio contínuo e descontínuo (Zuluaga, 2016).

2.2 COMPORTAMENTO MACROMECAÂNICO DOS MATERIAIS GRANULARES

Comumente os materiais são tratados, em geotecnia, como materiais não providos de descontinuidades. Assim, os ensaios laboratoriais também são regidos pela mecânica do contínuo, ignorando as características particulares dos grãos.

Entretanto, mesmo analisando as amostras como um meio contínuo, existem fatores que alteram o comportamento resistente dos solos granulares. A quantidade de vazios, o estado de tensões e o arranjo amostral são capazes de serem notados nas respostas desses materiais quando ensaiados.

2.2.1 Densidade Relativa

Os solos granulares, sem adição de materiais finos, possuem alta permeabilidade. Isso advém do fato que o encaixe, entre as partículas são capazes de deixar espaços vazios consideráveis, facilitando a percolação de fluídos.

A quantidade de vazios de um solo é denominada de densidade ou compacidade relativa dos solos. Este índice pode medir a quantidade de vazios e classificar o material como denso ou fofo. Amostras com um reduzido número de vazios possuem desempenho mecânico totalmente divergente do comportamento do mesmo tipo de material pouco compactado quando submetidos ao cisalhamento.

Assim conclui-se que a resposta resistente dos granulares dependerá do estado no qual se encontra, uma vez que quanto mais vazios possuir maior será a possibilidade de deformação volumétrica das amostras devido ao fechamento dos vazios.

O índice de medida da densidade relativa (D_R) é calculado de acordo com a equação, abaixo.

$$D_R = \frac{e_{MÁX} - e}{e_{MÁX} - e_{MÍN}} \quad (2-1)$$

O $e_{máx}$ e o $e_{mín}$, são os índices de vazios máximo e mínimo do material, sendo determinado para cada amostra em ensaio específico. O e é o índice de vazios atual da amostra. O índice de vazios varia de 0 a 1, onde solos mais próximos à 1 estão densos e os próximos a 0 na condição fofo.

A Tabela 2.1 abaixo, classifica a compacidade dos solos de acordo com o índice D_R calculado.

Tabela 2.1. Classificação de solos granulares com a compacidade (Lambe & Whitman, 1969).

Índice de Densidade Relativa	Classificação quanto à Compacidade
0-15	Muito Fofo
15-35	Fofo
35-65	Médio
65-85	Denso
85-100	Muito Denso

Materiais granulares quando densos tendem a sofrer aumento de volume quando cisalhados, esse fenômeno é denominado de dilatância. Já em materiais fofos, a tendência é de que a amostra sofra uma redução em suas dimensões no início do cisalhamento, que é

recuperada no decorrer do ensaio. A Figura 2.2 representa o comportamento nas duas situações, para materiais granulares.

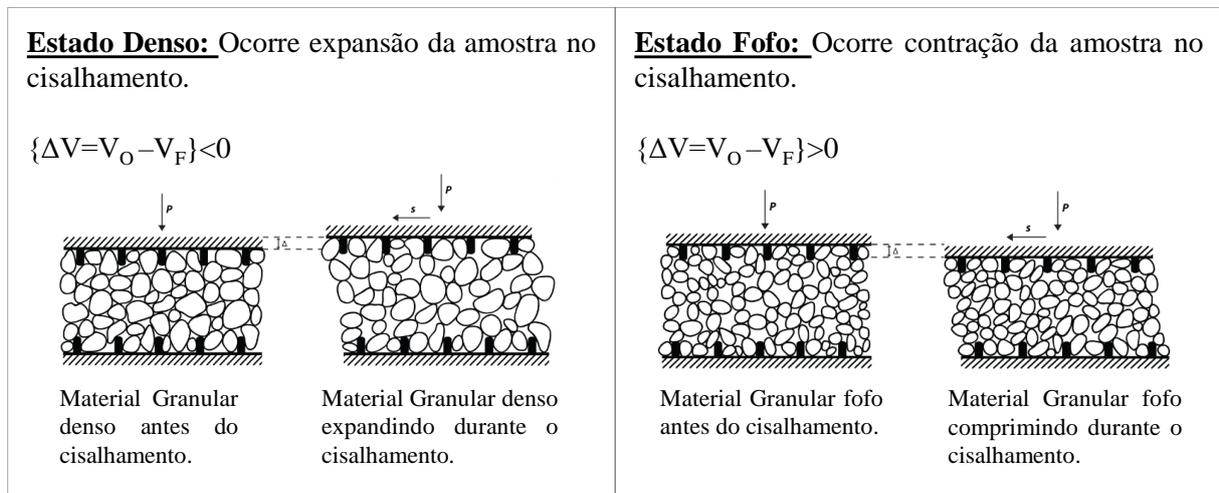


Figura 2.2. Ilustração da dilatação e contração da amostra.

Salot *et al.* (2009) através de um triaxial, ensaiou uma mesma amostra variando a densidade relativa entre de 0, 25, 50 e 100%, submetendo todos os CP's a mesma tensão confinante. A Figura 2.3 evidencia que materiais densos possuem picos de tensão bem definidos e superiores aos das amostras fofa. Além disso, esses picos ocorrem no intervalo onde a sua porosidade se mantém praticamente constante.

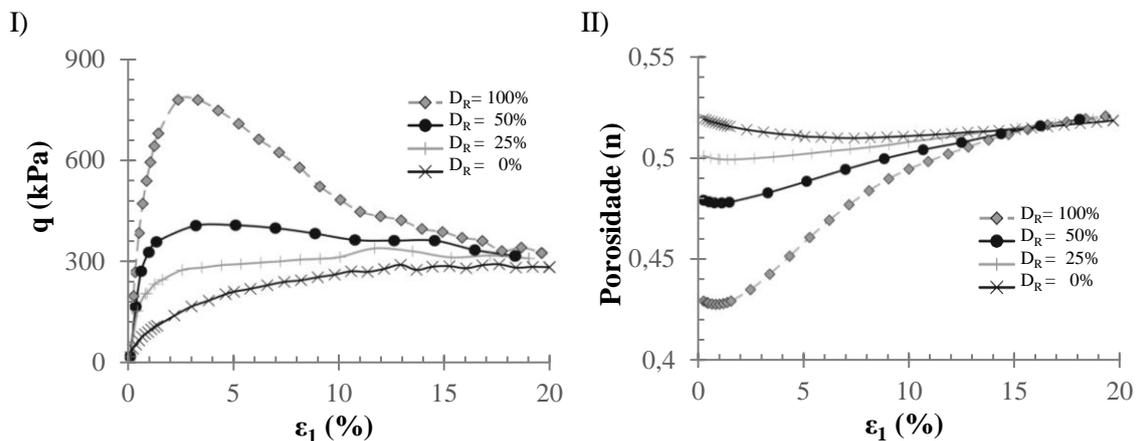


Figura 2.3. Influência da D_R na I) Tensão desvio e II) Porosidade (Modificado de Salot *et al.*, 2009).

Após o pico de tensão as amostras, inicialmente densas, entram em “amolecimento”, perdendo resistência e se expandindo. Já as amostras fofas, possuem comportamento mais discreto em relação as compactas. Sem um pico definido, essas amostras só atingem sua tensão

máxima após 10% de deformação axial. Embora menos perceptíveis, as amostras fofas, sofreram redução dos seus poros, ou seja, sofreram contração.

As quatro curvas de tensão-deformação tendem para o mesmo valor de resistência, ao atingirem o estado residual, independentemente do estado inicial.

2.2.2 Estado de Tensões do Solo

Além da compactidade, o estado de tensões na qual a amostra se encontra também afeta o comportamento dos solos granulares. Na pesquisa de Hassanlourad *et al.* (2010), foram testadas areias com mesma compactidade, variando somente a tensão confinante.

Amostras sob baixas tensões de confinamento, apresentam um pico mais evidente no início do cisalhamento. Já sob um confinamento mais elevado, as amostras chegam ao pico após a metade da deformação.

Outro fator evidente são as deformações volumétricas. Em baixas tensões confinantes as amostras tendem a contrair-se, porém em tensões confinantes elevadas, as amostras passaram a dilatar.

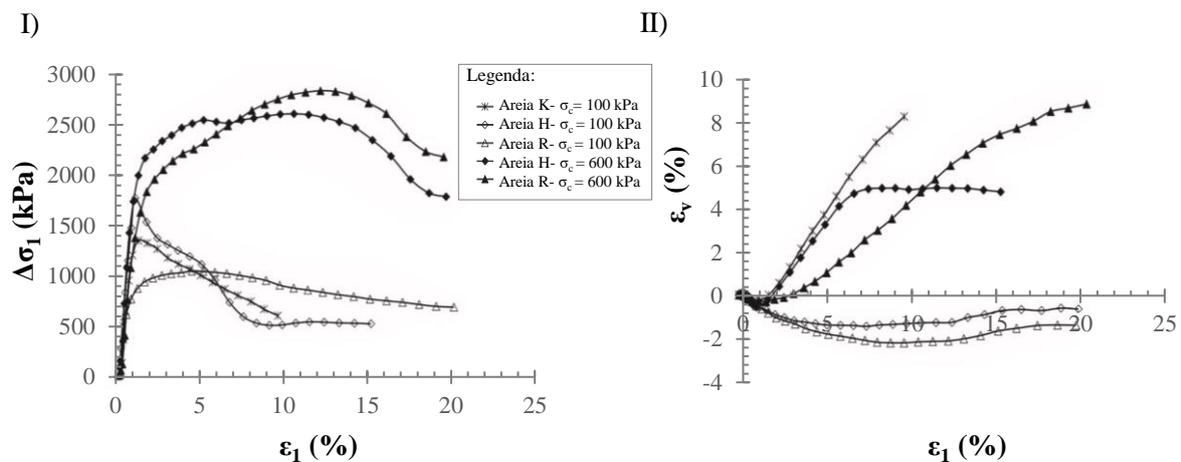


Figura 2.4. Influência do Estado de Tensões nas areias I) Tensão desvio e II) Deformação volumétrica (Hassanlourad *et al.*, 2010).

2.2.3 Fatores de influência do Ângulo de Atrito

Por fim, há de considerar que o atrito dos materiais granulares é influenciado pelas características amostrais. Isso deve ao fato de o atrito ser provocado devido ao deslizamento e rolamento das partículas umas sobre as outras.

A textura superficial, a angularidade, o formato e o tamanho dos grãos que formam do material tem grande influência no atrito. Materiais rugosos e angulares possuem maior atrito que partículas arredondadas e lisas.

O arranjo das partículas, no meio granular, é outro fator de impacto no ângulo de atrito de materiais granulares. Amostras com uma distribuição granulométrica suave, sem que haja predominância de partículas com um mesmo diâmetro, apresenta ângulos de atritos superiores em relação a materiais mal graduados.

Os fatores mencionados acima, influenciam a resistência dos materiais granulares, ou seja, nas respostas macromecânicas. Por se tratar de propriedades de caráter microscópicas, uma vez que está na escala do grão, são tratadas no próximo item.

2.3 A MICROESTRUTURA DOS MATERIAIS GRANULARES

Está bem estabelecido na literatura que a resposta de resistência e deformação de materiais granulares depende de vários fatores, incluindo o tamanho e a forma dos grãos individuais (Alshibli e Alsaleh, 2004; Cho *et al.*, 2006; Guo e Su, 2007; Miura *et al.*, 1998).

O tamanho e a forma das partículas são parâmetros sedimentares básicos que são normalmente usados na determinação das propriedades dos grãos. No entanto, este último critério é normalmente omitido durante a análise amostral. Isso se deve a subjetividade da descrição da forma e aos altos custos de determinação desses parâmetros.

2.3.1 Tamanho e Distribuição granulométrica das partículas

O tamanho das partículas que formam um solo é considerado uma característica física usada para classificar os diferentes tipos de solo, também sendo responsável por explicar suas propriedades geotécnicas.

A distribuição granulométrica dos solos é comumente obtida pelo ensaio convencional, onde a curva granulométrica é encontrada através de peneiramento, para solos de partículas com diâmetro superior à 0,075 mm ou análise por sedimentação para partículas com diâmetro inferior à 0,075 mm. A partir da construção da curva granulométrica o solo é classificado como cascalho, areia, silte ou argila.

Entretanto, estudos voltados para o entendimento do meio particulado vêm apontando que o método tradicional apresenta discrepância de resultados quando a forma das partículas possui dimensões diferentes (Guo *et al.*, 2019).

Fernlund (1998), comprovou que o volume médio das partículas retidas em qualquer peneira variava consideravelmente com sua forma. Tafesse *et al.* (2012) concluiu que a determinação da Curva Granulométrica tradicional é apenas uma avaliação aproximada, uma vez que o tempo de peneiração afeta diretamente os resultados, apontando que peneirações

longas auxiliam nos giros das partículas ajudando nos ajustes à malha e aumentando a possibilidade de passagem, como visto na Figura 2.5.



Figura 2.5. Grãos ao serem peneirados, sofrendo rotações.

Por esta razão, recentemente o uso de análise de imagens para determinação da granulometria de solos vem sendo destaque no meio geotécnico, e de acordo com Andersson (2010) ganhando vantagens sobre o método tradicional devido a precisão dos resultados, economia de tempo, esforço e custos. Análises de imagens possibilitam encontrar a distribuição de tamanhos das partículas levando em consideração os efeitos das dimensões da partícula.

Alguns fenômenos físicos presentes em solos granulares também podem ser explicados pelo tamanho e distribuição granulométrica de suas partículas uma vez que as características mecânicas deste tipo de solo não estão vinculadas a nenhum tipo de força química como no caso de solos finos e sim ao estado de imbricamento de suas partículas.

Em diversas pesquisas foi constatado que a resistência ao cisalhamento pode aumentar ou diminuir à medida que o tamanho das partículas aumenta (Marachi *et al.*, 1900; Dunn *et al.*, 1972; Kara *et al.*, 2013). Simoni *et al.* (2006), Fuggle *et al.* (2010) e Fuggle (2011) analisaram o comportamento cisalhante das areias e concluíram que os ângulos de atrito foram afetados significativamente pelo tamanho e gradação das partículas.

Han *et al.* (2018) comparou os ângulos de atrito interno no estado crítico, obtidos em testes de cisalhamento direto e triaxial, de cinco amostras de areias uniformes de Ohio, as amostras apresentavam morfologia semelhantes, mas tamanhos médio diferentes. Os ângulos de atrito de estado crítico dessas areias aumentaram com o aumento do diâmetro das partículas, como mostrado na Figura 2.6. As Equações (2-2) e (2-3) relacionam o D_{50} aos ângulos de atrito no estado crítico para o ensaio no cisalhamento direto e triaxial, respectivamente.

$$\phi_{CD} = (1,74 * D_{50}) + 31,70 \quad (2-2)$$

$$\phi_{TX} = (1,27 * D_{50}) + 31,38 \quad (2-3)$$

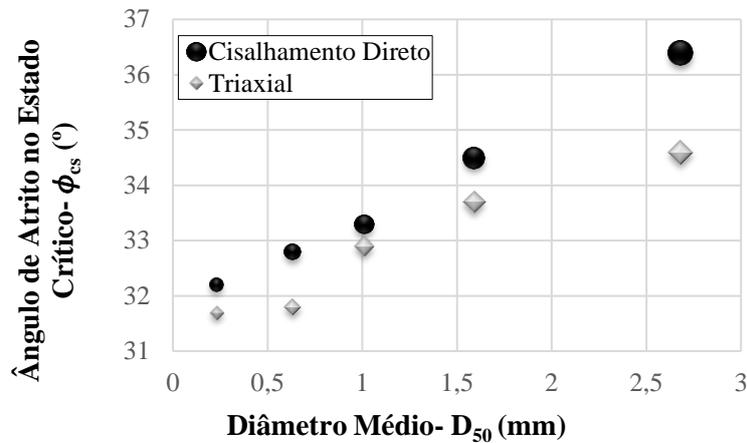


Figura 2.6. Efeito do tamanho das partículas no ângulo de atrito no estado crítico de areias de morfologia semelhante (Han *et al.*, 2018).

Além do tamanho, a configuração em que as partículas se encontram nos solos, tem grande influência no comportamento geotécnico devido as distribuições de contatos. Amostras bem-graduadas aumentam os pontos de contato devido ao melhor encaixe das partículas, enquanto amostras com diâmetros semelhantes tendem a deixar mais vazios, diminuindo os contatos e consequentemente a resistência da amostra.

Rasti *et al.* (2021) analisou o efeito do tamanho médio das partículas (D_{50}) e do coeficiente de uniformidade (C_U) no ângulo de atrito de quatro tipos de areias (ver Figura 2.7), concluindo que à medida que o D_{50} e o C_U aumentavam o ângulo de atrito também aumentava. As funções potenciais encontradas para cada parâmetro, ver Equação (2-4) e (2-5), forneceram bons coeficientes de determinação, apontando que tanto o D_{50} quanto o C_U do solo podem ser usados para estimar o ângulo de atrito do solo sendo que a função do C_U fornece resultados mais precisos.

$$\phi_{CS} = 39,86 * (D_{50})^{0,184} \quad (2-4)$$

$$\phi_{CS} = 22,74 * (C_U)^{0,293} \quad (2-5)$$

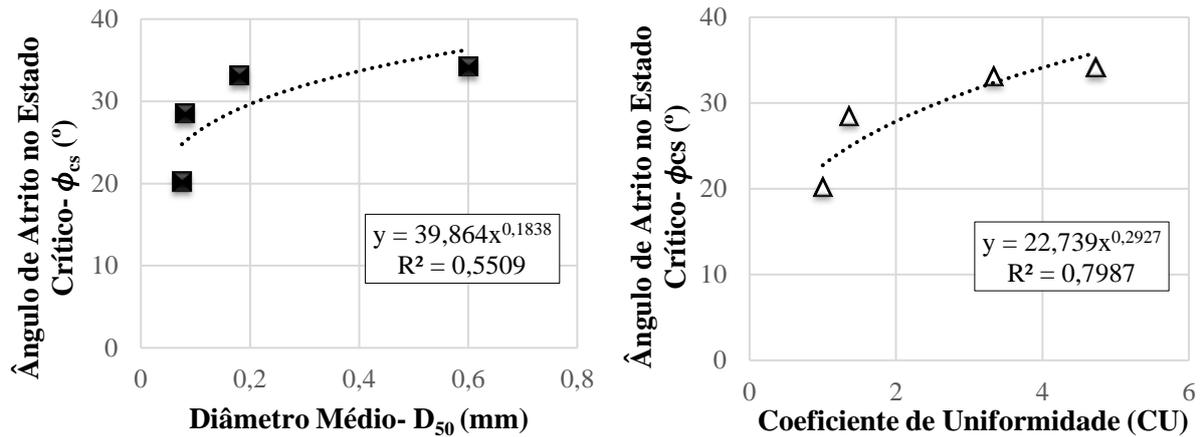


Figura 2.7. Efeito dos parâmetros granulométricos no atrito de areias (Rasti *et al.*, 2021).

Dorador *et al.* (2020) explica que existem quatro categorias de materiais geotécnicos que agem de forma distinta relacionando o tamanho e a resistência. Para matérias de categoria 1, a resistência da partícula não é afetada pelo tamanho, já para materiais de categoria 2 a força da partícula diminui à medida que o tamanho das partículas aumenta. Na categoria 3 partículas pequenas e grandes têm menor força que partículas medianas e na categoria 4 a resistência das partículas aumentam com o aumento da resistência.

2.3.2 Forma dos Grãos

Entre os fatores de impacto para os granulares, a forma das partículas, que é um parâmetro significativo no comportamento mecânico desses materiais, tem atraído considerável atenção nos últimos anos (Afzali-Nejad *et al.*, 2017; Dai *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2020).

A forma dos grãos define o arranjo estrutural e afeta o comportamento geotécnico de uma massa granular. As rotações e deslizamentos entre os grãos nas amostras são diretamente influenciados pela forma das partículas, e essas movimentações microscópicas ditam a mecânica do maciço.

Por exemplo, grãos arredondados são mais propensos a escorregar e rolar do que fragmentos angulares. As constatações sobre a quantificação da forma têm uma longa história (Krumbein e Pettijohn, 1938; Pettijohn, 1957; Wadell, 1932; Lees, 1964). Porém, segundo Sarkar *et al.* (2018), os sistemas de classificação de solos, até hoje, ignoram o efeito da forma da partícula sobre o comportamento mecânico do solo.

Um problema fundamental no uso da classificação quanto à forma reside na dificuldade de encontrar uma variável morfológica particular que possa identificar características-chave e distinguir um tipo de grão e/ou conglomerado de grãos de outro.

Além disso, os custos gerais para capturar digitalmente a forma de grãos de uma amostra representativa e uma análise de imagem em escala real podem ser proibitivos para aplicações práticas.

Os métodos clássicos de caracterização da forma do grão são baseados principalmente nas dimensões geométricas de um grão, incluindo eixo maior, eixo menor, perímetro e área. Recentemente, vários índices morfológicos estão sendo propostos, sendo os mais estudados a Esfericidade, a Angularidade e o índice de Textura Superficial, conforme mostrados na Figura 2.8.

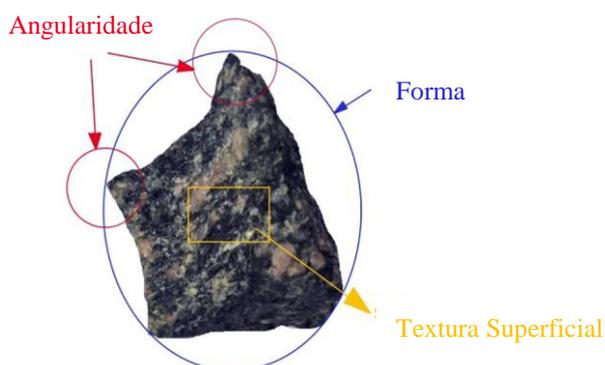


Figura 2.8. Características morfológicas das partículas (Guo *et al.*, 2018).

No estudo de Cox e Budhu (2008), os parâmetros de forma e angularidade, foram dissolvidos em seis índices distintos, sendo eles, a esfericidade, circularidade, redondeza, compacidade, relação entre largura e comprimento, e relação entre comprimento e largura. Esses parâmetros geométricos foram testados entre oito areias e possuíram maiores variações. A definição desses índices estão na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Índices de Forma e Angularidade, de acordo com Cox e Budhu (2008).

Índice de Forma	Cálculo do Índice
Esfericidade	$\{(\text{SQRT}[(4*A) / \pi]) * \pi\} / P$
Circularidade	$(4 * \pi * A) / P^2$
Redondeza	$(4 * A) / (\pi * C^2)$
Compacidade	$(\text{SQRT}[(4 * A) / \pi]) / C$
Relação entre Largura e Comprimento	L/C

A textura superficial é uma característica morfológica das partículas, que está comprovadamente correlacionada com a mineralogia do solo (Hyslip e Vallejo, 1997).

Como areias e cascalhos naturais, variam em mineralogia e rugosidade superficial, se torna difícil obter uma compreensão clara de como somente a textura, afeta as propriedades mecânicas de materiais granulares. Além disso, geralmente as funções matemáticas não fornecem índices com boa acurácia, de forma que possam ser correlacionados com o comportamento mecânico.

Algumas pesquisas citam a solidez, concavidade e convexidade como índices de textura mais relevantes (Zhang *et al.*, 2020; Chmielowska *et al.*, 2021; Pituello *et al.*, 2018). A Tabela 2.3 mostram as equações de determinação desses índices.

Tabela 2.3. Índices de Textura Superficial.

Índice de Forma	Cálculo do Índice
Solidez	A/ChA
Concavidade	$(ChA-A)/ChA$
Convexidade	ChP/P

Diversos autores já avaliaram os mais variados índices morfológicos e os relacionaram com a resistência, dilatação, potencial de liquefação e suscetibilidade à compactação (Kramer 1996; Mitchell e Soga, 2005; Cox e Budhu, 2008; Cabalar e Hasan, 2013; Oleszko *et al.*, 2015).

Cho *et al.* (2006), avaliaram os efeitos da morfologia dos grãos na densidade e na compactação de solos arenosos. Concluindo que a forma das partículas deve ser avaliada explicitamente como parte de cada exercício de caracterização de solos, em particular, para materiais granulares, uma vez que afetam toda o seu comportamento.

Zong-Chuan (2018) realizou experimentos com areia calcária de três formas diferentes, catalogadas em seu trabalho como bloco, bastão e floco. A conclusão foi que o formato foi crucial no resultado do ângulo de repouso. Para partículas de mesmo tamanho, o ângulo foi maior nas amostras de maior rugosidade, conforme observado na Figura 2.9.

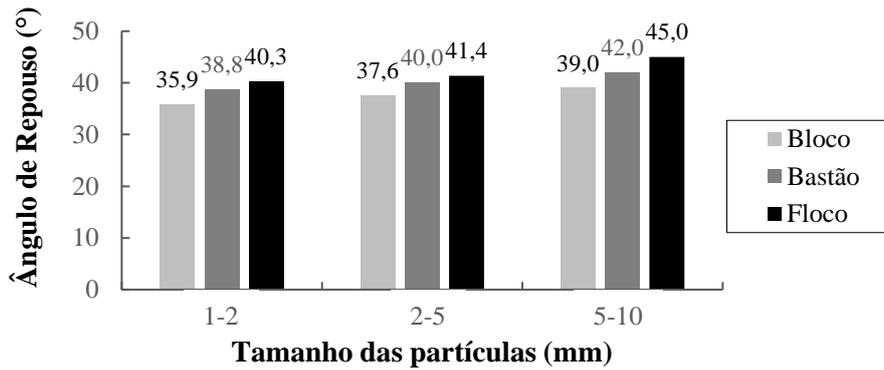


Figura 2.9. Relações entre o ângulo de repouso e a forma de partícula (Zong-Chuan, 2018).

Lei *et al.* (2020) analisou partículas fabricadas em impressora 3D em forma de sólidos platônicos e duas areias naturais, sendo uma angular e outra arredondada. Ao analisar o comportamento cisalhante das partículas impressas concluíram um comportamento muito semelhante ao comportamento das areias naturais, indicando que as partículas impressas em 3D podem ser usadas como análogo do solo para substituir materiais naturais.

Uma das várias constatações realizadas pela pesquisa foi que quanto maior o parâmetro de esfericidade menor o ângulo de atrito mobilizado, possível de ser visualizada na Figura 2.10.

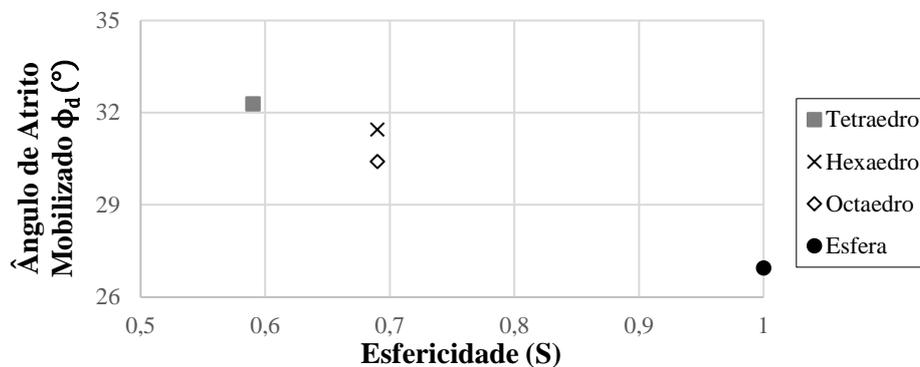


Figura 2.10. Atrito mobilizado em relação a Esfericidade (Modificado de Lei *et al.*, 2020).

Várias outras pesquisas buscaram relacionar os índices de forma, de vazios e as propriedades mecânicas aos ângulos resistentes dos solos, algumas das correlações estudadas estão na Tabela 2.4, abaixo.

Tabela 2.4. Relações encontradas na bibliografia.

Relações encontradas na bibliografia	Variáveis	Referência	Equações
$\phi_{CDResidual} = 42 - (17 * R)$	R_{50}	Cho <i>et al.</i> (2006)	(2-6)
$\phi_{Repouso} = 41,7 - (14,4 * R)$	R_{50}	Rousé <i>et al.</i> (2008)	(2-7)
$\phi_{TX} = 1,9 + (20,6 * D_{10}) + (2,4 * \gamma_{d\ M\acute{A}X}) - (24,1 * R)$	$R, D_{10}, \gamma_{d\ M\acute{A}X}$	Bareither <i>et al.</i> (2008)	(2-8)
$e_{M\acute{A}X} = 0,554 + 0,154 * R^{-1,0}$	$R, C_U=1$	Santamarina <i>et al.</i> (2004)	(2-9)
$e_{M\acute{I}N} = 0,359 + 0,082 * R^{-1,0}$			
$e_{M\acute{A}X} = 1,3 - 0,62 * R$	$R, \rho, C_U < 2,50$	Cho <i>et al.</i> (2006)	(2-10)
$e_{M\acute{I}N} = 0,8 - 0,34 * R$			
$e_{M\acute{A}X} = 1,5 - 0,82 * \rho$			
$e_{M\acute{I}N} = 0,9 - 0,44 * \rho$			
$e_{M\acute{A}X} = 0,50 * R^{-0,2} + 0,41 * S^{-0,6} + 0,34 * C_U^{-0,2} - 0,51$	R, S, C_U	. Chang <i>et al.</i> , (2018)	(2-11)
$e_{M\acute{I}N} = 0,37 * R^{-0,2} + 0,28 * S^{-0,6} + 0,31 * C_U^{-0,3} - 0,48$			

2.3.3 Arranjo microestrutural dos Solos Granulares

O arranjo estrutural das partículas é medido indiretamente por meio da porosidade e/ou índice de vazios do material e representa a forma como ocorrem os contatos grão a grão. A Figura 2.11 mostra em 2D e 3D o estado mais fofo das amostras em (a, c) e o estado mais denso em (b, d).

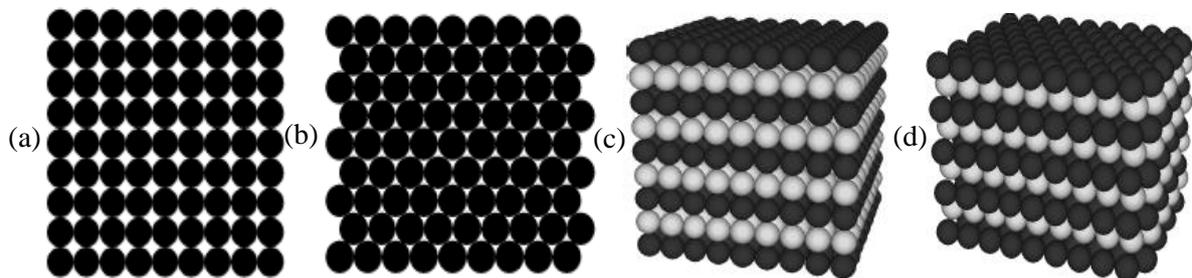


Figura 2.11. Influência do arranjo das partículas do solo na sua compactação (Neves, 2009).

A organização dos contatos está também ligada às distribuições de tensões no meio, podendo relacionar o número de contatos que o material apresenta com a densidade que o material se encontra. Partículas mais angulares tendem a se encontrar em um estado de melhor imbricamento, o que aumenta o número de contatos partícula-partícula causando um aumento na resistência e rotação (Norsyahariati et al, 2016).

A Figura 2.12 mostra o comportamento de quatro amostras de formas diferentes sendo cisalhadas em densidades relativas diferentes. Nota-se que as amostras em estado denso possuem resistência ao cisalhamento maior que as amostras em estado fofo.

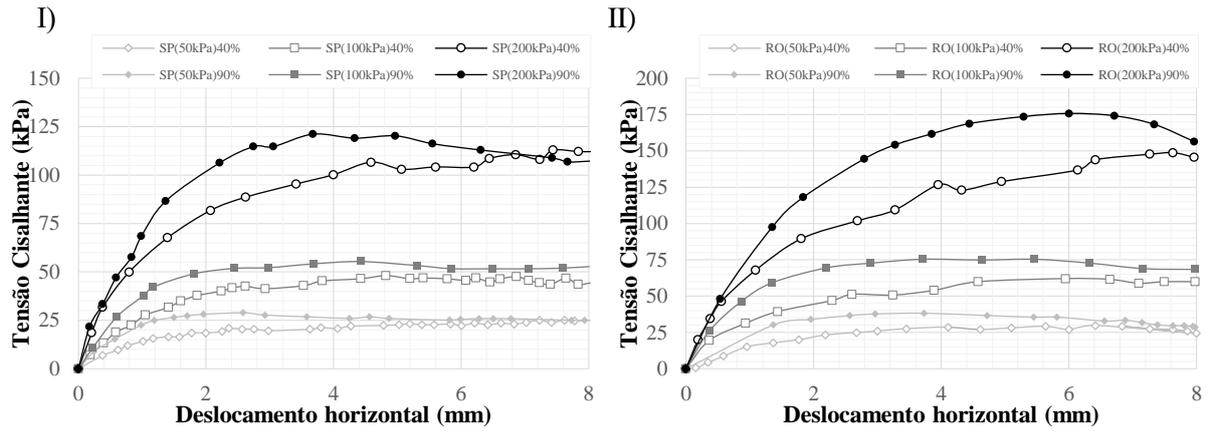


Figura 2.12. Efeitos da densidade relativa inicial ($D_R = 90\%$ e 40%) nas resistências ao cisalhamento de partículas impressas: I) Esfera e II) Octaedro (Modificado de Lei *et al.*, 2020).

3 METODOLOGIA

Com o intuito de cumprir todos os objetivos propostos neste trabalho, o desenvolvimento da pesquisa consistiu em duas etapas experimentais: os ensaios mecânicos e os ensaios de caracterização morfológica e de granulometria, como pode ser observado na Figura 3.1. Na primeira etapa são apresentados os materiais utilizados evidenciando as principais características, já a segunda fase é composta pela metodologia empregada nos ensaios laboratoriais.

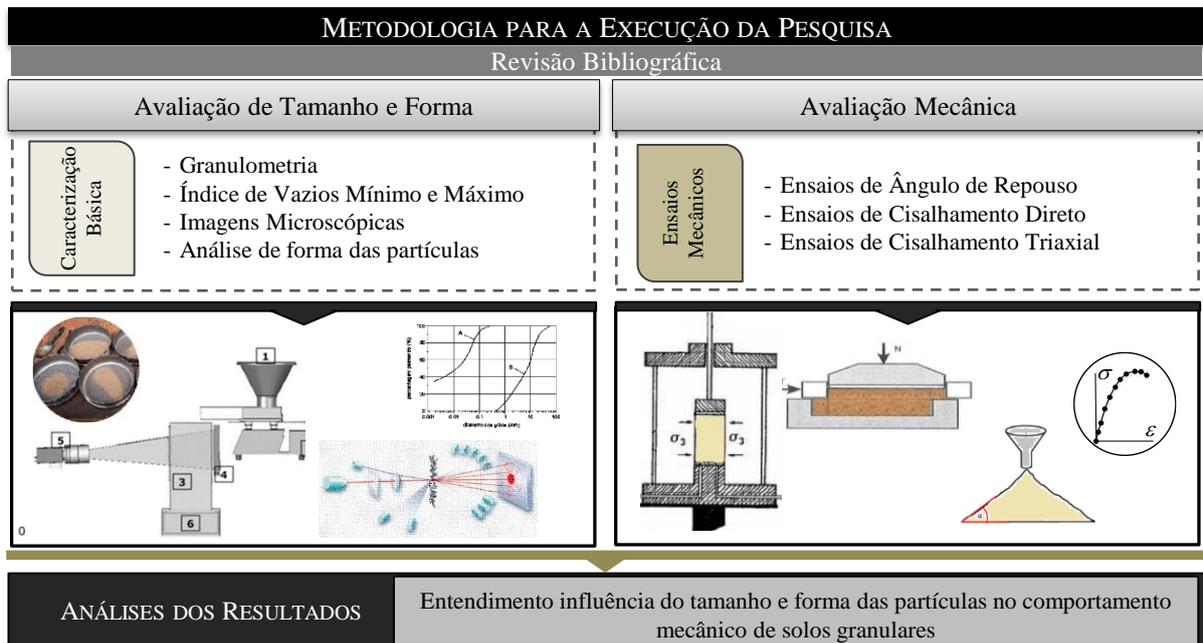


Figura 3.1. Metodologia proposta.

3.1 MATERIAIS

Os materiais usados foram de três tipos diferentes: areia padrão brasileira, esferas de vidro e sólidos platônicos produzidos em impressora 3D. Os diferentes tipos de materiais têm o intuito de quantificar os efeitos do tamanho e da forma das partículas na resposta macroscópica de materiais granulares.

3.1.1 Esferas de Vidro

Serão analisadas sete frações de esferas de vidro nos ensaios, mostradas na Figura 3.2, que embora seja um material de origem industrial, podem ser usadas para simular o solo devido à geometria controlada semelhante à maioria das geometrias adotadas em simulações discretas.

As esferas de vidro são de origem industrial, fornecidas pela empresa Potters Industrial Ltda, compostas de silicatos inorgânicos, possuindo características granulométricas e morfológicas conhecidas.

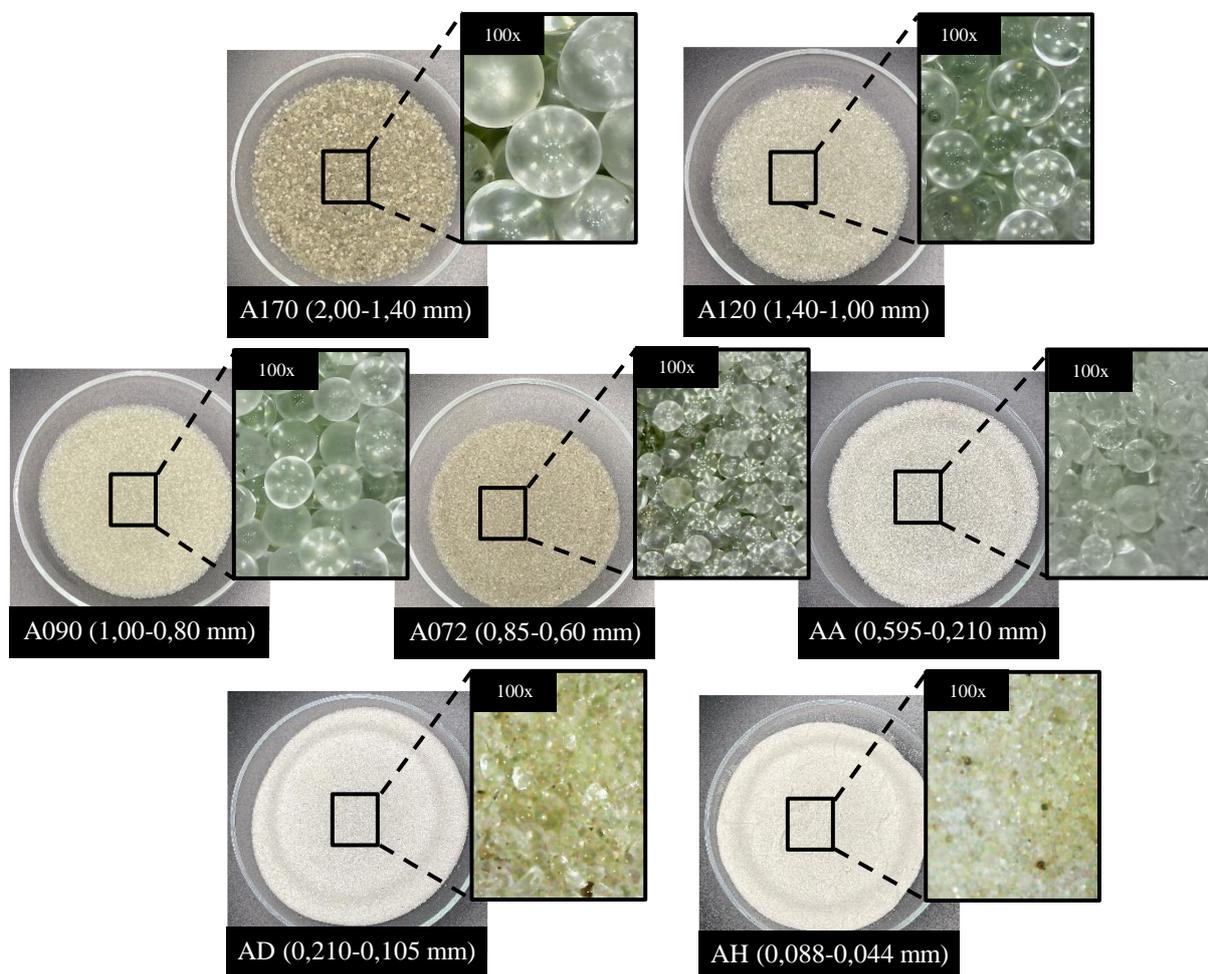


Figura 3.2. Esferas de vidros usadas no estudo.

Os experimentos têm a função de simular solos granulares em suas diversas faixas granulométricas, o fabricante garante uma esfericidade mínima de 70% para as amostras. A Tabela 3.1 apresenta a caracterização do material fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.1. Dados das Esferas de Vidro usadas, fornecidas pelos fabricantes.

Amostra	Composição	Densidade (g/cm ³)	Faixa de diâmetros (mm)	Malha A.S.T.M.	Esfericidade Mínima (%)
A170	Vidro tipo soda-cal	2,50	2,000-1,400	10-14	80
A120	Vidro tipo soda-cal	2,50	1,400-1,000	14-18	80
A090	Vidro tipo soda-cal	2,50	1,000-0,800	18-20	80
A072	Vidro tipo soda-cal	2,50	0,850-0,600	20-30	80
AA	Vidro tipo soda-cal	2,50	0,595-0,210	30-70	70
AD	Vidro tipo soda-cal	2,50	0,105-0,210	70-140	70

Amostra	Composição	Densidade (g/cm ³)	Faixa de diâmetros (mm)	Malha A.S.T.M.	Esfericidade Mínima (%)
AH	Vidro tipo soda-cal	2,50	0,044-0,088	170-325	80

3.1.2 Areia Padrão

Areia padrão é um material cujo fornecimento vem do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), e sua produção segue norma da ABNT NBR 7214/15, utilizado por todos os laboratórios nacionais que realizam ensaios físico-mecânicos para ensaios de referência.

Trata-se de um material granular composto fundamentalmente de quartzo, obtido no rio Tietê (SP), suas frações passam por controles específicos de produção e controle possuindo características pré-determinadas. A

Tabela 3.2 apresenta dados iniciais do material, fornecidos pelo fabricante.

As amostras da pesquisa foram separadas em quatro frações granulométricas: grossa, média grossa, média fina e fina. A Figura 3.3 apresenta os materiais.

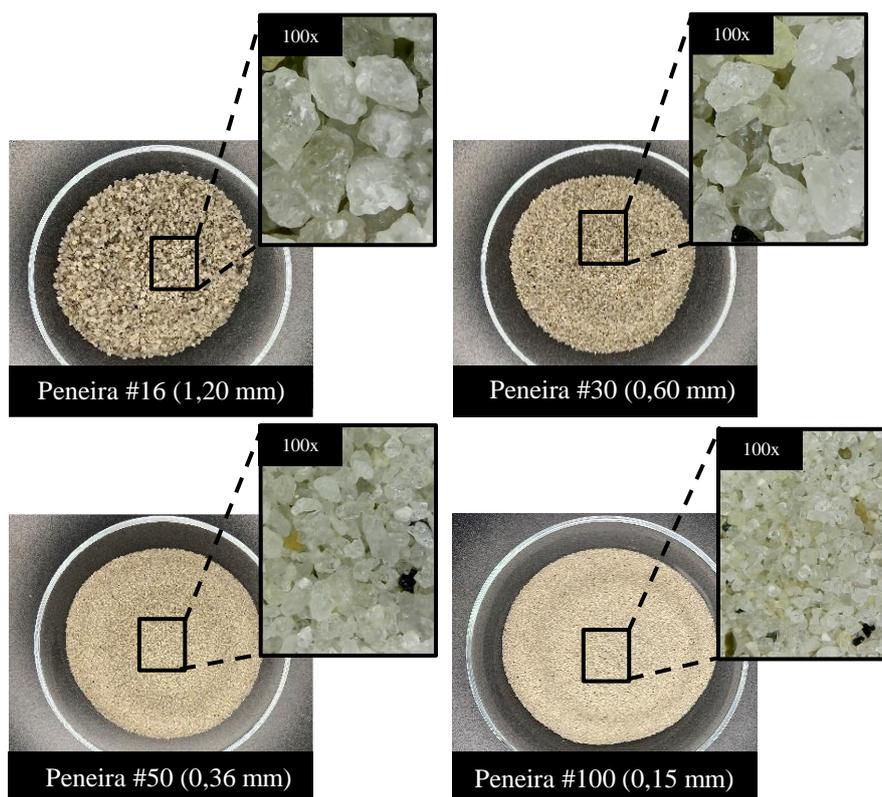


Figura 3.3. Frações de Areia utilizadas nos ensaios.

Tabela 3.2. Dados das Areias fornecidos pelo IPT.

Amostra	Densidade aparente (g/cm ³)	Massa unitária compactada (g/cm ³)	Faixa de diâmetros (mm)	Esfericidade Mínima (%)
Areia Padrão #16	2,618	1,155	2,40-1,20	80
Areia Padrão #30	2,618	1,127	1,20-0,60	75

Amostra	Densidade aparente (g/cm ³)	Massa unitária compactada (g/cm ³)	Faixa de diâmetros (mm)	Esfericidade Mínima (%)
Areia Padrão #50	2,618	1,110	0,60-0,30	75
Areia Padrão #100	2,618	1,100	0,30-0,15	80

3.1.3 Sólidos Platônicos

Outra opção adotada, foi o uso de partículas fabricadas em impressoras 3D em forma de poliedros regulares. A sua confecção ocorreu no laboratório de Furnas S.A. localizado em Aparecida de Goiânia- GO. O material usado na confecção, foi o VEROWHITEPLUS RGD835, que simula um tipo de plástico rígido e tem suas propriedades apresentadas na Tabela 3.3, abaixo, conforme fornecidas pelos fabricantes.

Tabela 3.3. Propriedades dos materiais usados na fabricação dos poliedros.

Material	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Absorção de água (%)
Verowwhiteplus RGD835	1,17-1,18	2000-3000	1,1-1,5

A fabricação de cada poliedro seguiu as informações mostradas na Tabela 3.4, os sólidos tiveram tamanhos determinados pela inscrição em uma circunferência de diâmetro de 6,30 mm.

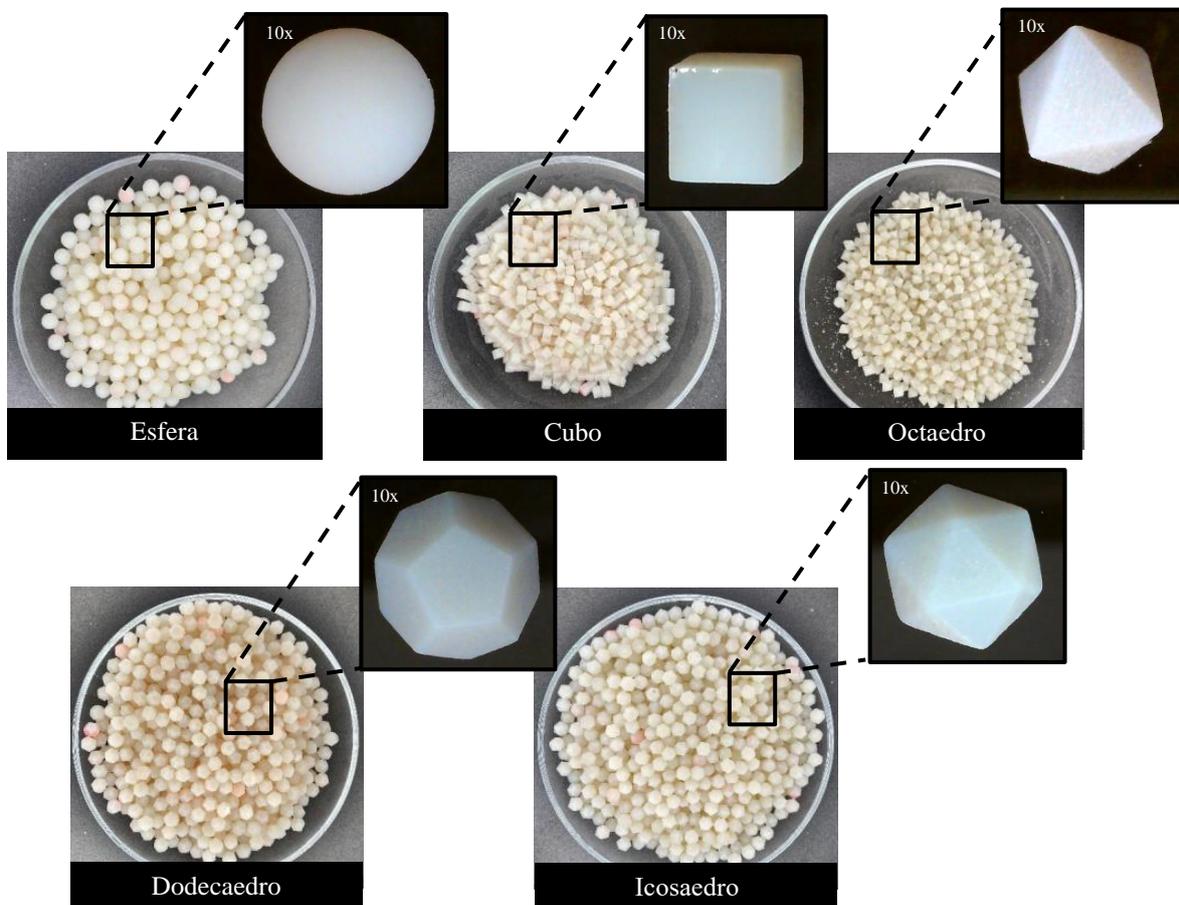


Figura 3.4. Partículas fabricadas sob forma de sólidos platônicos.

Optou-se por trabalhar com esferas, cubos, octaedros, dodecaedros e icosaedros. As partículas possuem volume, área superficial e esfericidade controladas. Para esse tipo de material, o diâmetro das partículas inscritas numa esfera foi de 6,3mm para todas as formas ensaiadas e podem ser observadas na Figura 3.4.

Tabela 3.4. Resultados da Caracterização física das Esferas de Vidro.

Amostras	Faces	Vértices	Arestas	Ângulo Diedro (θ)	Diâmetro Circunscrito (mm)	Arestas (mm)
Esfera	-	-	-	-	6,30	-
Cubo	6	8	12	90,00°	6,30	2,73
Octaedro	8	6	12	109,28°	6,30	2,23
Dodecaedro	12	20	30	116,34°	6,30	4,41
Icosaedro	20	12	30	138,11°	6,30	3,00

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização compreenderam em determinadores de índices físicos, análise granulométrica e por fim determinação dos índices de forma e textura, através de análise de imagens. Os testes foram realizados no Laboratório de Geotecnologia no Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas e no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB).

3.2.1 Determinação da Massa Específica dos Grãos (G_s)

O ensaio de massa específica dos grãos (G_s) procedeu-se de acordo com o procedimento interno de Furnas S.A, que são baseados na ABNT NBR 6508/84 para as amostras de esferas de vidro e as areias padrão. Todas as amostras foram submetidas ao ensaio de massa específica dos grãos com a utilização do picnômetro, como pode ser visto na Figura 3.5.



Figura 3.5. Picnômetro com Areia Padrão.

Já a determinação do G_s dos sólidos platônicos seguiu procedimento interno de Furnas S.A, que são baseados na ABNT NBR 9776/1987. A escolha da determinação da massa

específica pelo frasco de Chapman se deve ao fato de as partículas serem confeccionadas em material plástico e não ser recomendado seu aquecimento, como no caso do uso de picnômetro.

A Figura 3.6 mostra a realização dos ensaios com os poliedros.

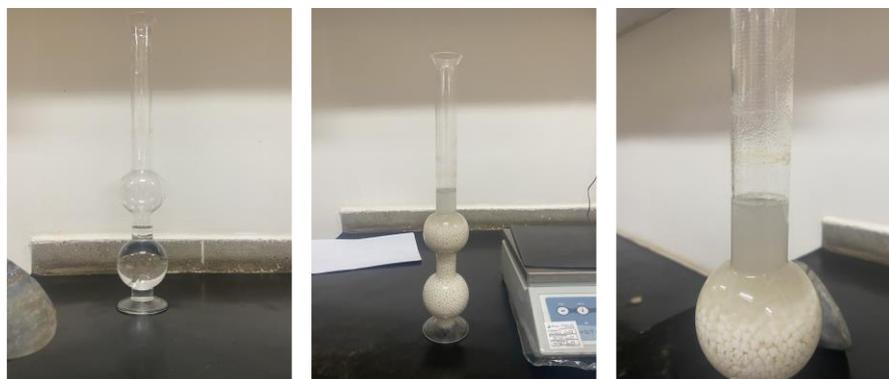


Figura 3.6. Realização de massa específica, através do frasco de Chapman.

3.2.2 Determinação dos Índices de Vazios ($e_{máx}$, $e_{mín}$)

Os ensaios de índice de vazios máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$) foram realizados de acordo com a ABNT NBR 16840/20 e ABNT NBR 16843/20, respectivamente para as esferas de vidros e as areias.

Para os ensaios de índices de vazio máximo fora usado um cilindro de 2830 cm³ de volume e um funil de abertura de 1,3 cm. A quantidade de material foi de 6 kg conforme especificado em norma.



Figura 3.7. Determinação do índice de Vazios Máximo.

A determinação dos índices de vazios mínimo foram realizados em mesa eletromagnética, e o material foi seco em estufa, há 110°C, até apresentar constância em sua massa. Foram usados 6 kg de cada amostra seca no cilindro de volume igual a 2830 cm³, como no $e_{máx}$.

Os materiais foram vibrados por 8 minutos na frequência de 60 Hz. Para determinar a variação de volume após a mesa vibratória, foram realizadas três medidas da variação de altura da amostra utilizando o deflectômetro e a barra de calibração. A Figura 3.8 mostra o ensaio sendo realizado para uma das amostras.



Figura 3.8. Determinação do Índice de Vazios Mínimo.

Os sólidos platônicos não possuíam massa equivalente a determinada em norma para sua granulometria. Para estas amostras seguiu-se o procedimento interno de Furnas S.A. O cilindro usado possuía volume de 196,51 cm³ e foi usado 400 g de material nos ensaios de $e_{máx}$ e $e_{mín}$.

Para o índice de vazios máximo, o funil usado teve abertura de 2,5 cm. O cilindro foi preenchido pelas partículas através do funil, este teve seu peso aferido antes e após o arrasamento das amostras. A Figura 3.9 evidencia o procedimento adotado.



Figura 3.9. Determinação do Índice de Vazios Máximo, dos poliedros.

O índice de vazios mínimo usou o mesmo molde do $e_{máx}$, já detalhado acima. Entretanto para este ensaio foi usado a mesa vibratória para peneiramento. A frequência de vibração usada foi de 60 Hz e a vibração durou 8 minutos. A Figura 3.10 mostra o aparato montado.



Figura 3.10. Determinação do Índice de Vazios Mínimo, dos poliedros.

3.2.3 Curva Granulométrica

O ensaio de Granulometria convencional foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7181/16. Foram selecionados cerca de 1,5 kg para as amostras de vidro e as areias. Já os sólidos platônicos, foi usada todas as partículas fabricadas para cada tipo.

O tempo de peneiramento para cada amostra foi de uma hora e a Figura 3.11 mostra parte do procedimento.



Figura 3.11. Ensaio de Granulometria, em esferas de vidro.

3.2.4 Determinação de Tamanho, Forma e Textura no FlowSync

A determinação do tamanho e forma das partículas finas foram realizadas pelo equipamento FlowSync, da empresa Microtrac MRB.

O equipamento consiste em um analisador de partículas que integra a análise de difração tri-laser com a análise de imagem dinâmica fornecendo a caracterização morfológica das partículas. A análise por difração a laser e por imagens é síncrona, em uma mesma amostra.

A medição do tamanho das partículas por difração a laser segue as premissas da ISO 13320/20 e consiste na emissão de um feixe de laser que ilumina a amostra e a distribuição de tamanho é calculada a partir do padrão de luz espalhada.

As partículas pequenas espalham a luz em grandes ângulos, enquanto as grandes espalham a luz em pequenos ângulos. A intensidade da luz espalhada é coletada continuamente ao longo da medição. Com uso de um algoritmo, o software do equipamento produz distribuições de tamanho para partículas esféricas e não esféricas, bem como para materiais transparentes e absorventes.

Já a análise de imagens pode fornecer além da possibilidade de determinação do tamanho, a caracterização quanto a forma e textura das partículas, de acordo com a ISO 13322-2/21. As partículas durante o fluxo, são iluminadas por uma luz estroboscópica de alta velocidade, então são fotografadas por uma câmera digital de alta resolução para criar um arquivo de vídeo e imagens para as partículas em fluxo.

Cada partícula analisada tem seus parâmetros determinados, que são apresentados no software. A Figura 3.12 mostra o esquema usado pelo FlowSync para medição de tamanho por difração a laser e por imagem.

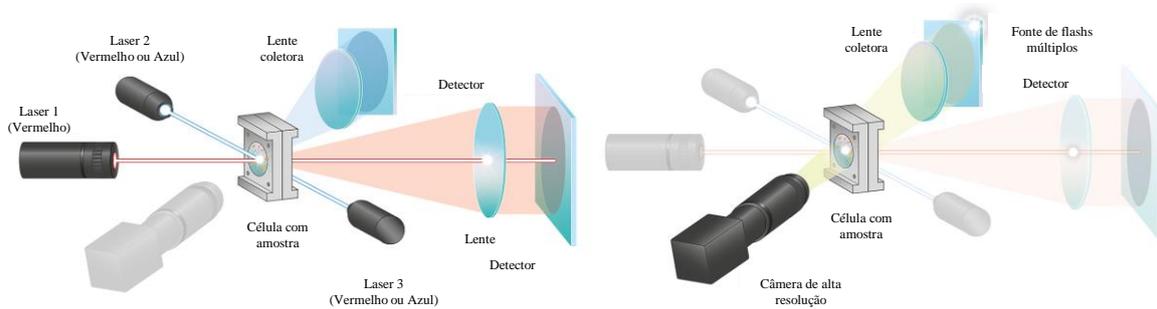


Figura 3.12. Método de análise do FlowSync.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB), localizado no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Foram ensaiados, nesse equipamento, todas as amostras de esferas de vidro e as frações #50 e #100 das areias padrão.

Cada amostra passou por três análises de três ciclos cada, todas usando a opção com ultrassom (equivalente ao uso de defloculante na granulometria convencional) para a difração a laser. Cada ciclo nas análises fora de 60 segundos e os resultados das três análises foram considerados. A Figura 3.13 apresenta as imagens retiradas pelo FlowSync de duas amostras analisadas.

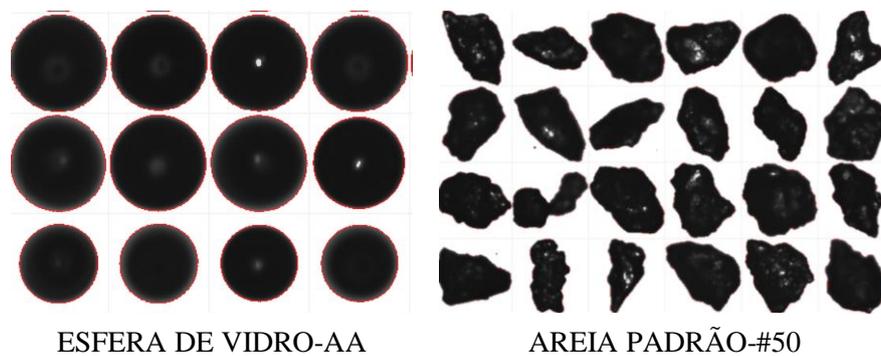


Figura 3.13. Imagens retiradas pelo FlowSync.

3.2.5 Determinação de Tamanho, Forma e Textura no Partan 3D

O PartAn 3D é um equipamento desenvolvido pela Microtrac MRB, e consiste em um sistema de medição e distribuição de tamanho de partículas que adota o método de imagem 3D. As análises de imagens em três dimensões avaliam a distribuição de espessura além da avaliação convencional de distribuição de diâmetro maior e de diâmetro menor. Os dados

gerados pela avaliação de imagem em 3D geralmente produzem resultados mais compatíveis com os dados obtidos por peneiramento.

A análise dinâmica de imagens é a técnica mais avançada em determinação de forma e textura de partículas, assim o PartAn 3D fornece ainda as características morfológicas das amostras. O ensaio ocorre de forma síncrona com as partículas em movimento sendo rastreadas e tendo suas imagens digitalizadas e armazenadas em um arquivo de vídeo. Cada partícula é medida em tempo real, enquanto o software calcula os parâmetros morfológicos com base no tamanho conhecido e localização dos pixels em cada imagem.

A tecnologia 3D utiliza do rastreamento de partículas. Ao rastrear, o PartAn3D obtém várias imagens de cada partícula, permitindo que o software veja as partículas em muitas orientações diferentes.

Os ensaios foram realizados no INFRALAB, e nesse equipamento foram ensaiados os sólidos platônicos e as frações #16 e #30 das areias padrão. A Figura 3.14 mostra a realização dos ensaios.



Figura 3.14. Caracterização das partículas com o PartAn 3D.

Cada amostra passou por cinco análises. Os ensaios nesse equipamento duram enquanto há detecção de amostra em queda, assim convencionou-se usar 500 gramas de areia em cada determinação e todas as partículas de poliedros disponíveis.

Todos os dados foram analisados para a formação das distribuições dos parâmetros analisados na pesquisa, a Figura 3.15 mostra as imagens retiradas pelo PartAn 3D.

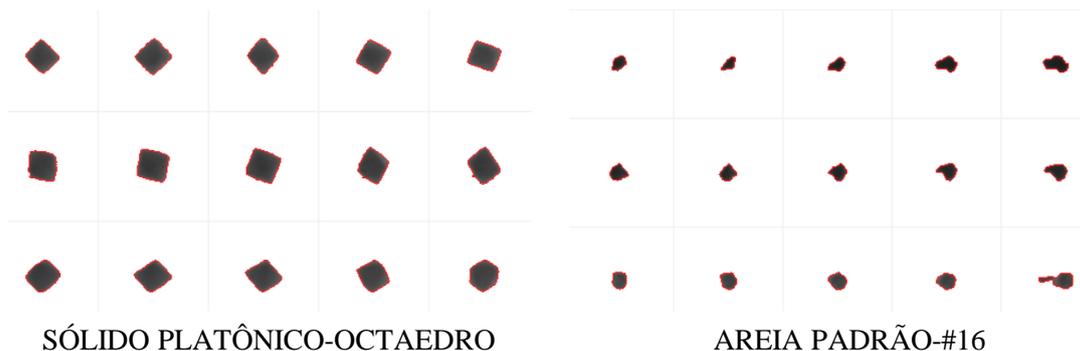


Figura 3.15. Imagens retiradas com o PartAn 3D.

3.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Foram realizados ensaios de Ângulo de Repouso, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial. Os testes foram realizados no Laboratório de Geotecnologia no Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas.

3.3.1 Ângulo de Repouso

O ensaio de ângulo de repouso foi baseado no método proposto por Miura *et al.* (1997), e nas considerações de Guzmán (2008) e Girardi (2016). Portanto, as variáveis como a quantidade de material, diâmetro e velocidade de levantamento do funil, altura de lançamento do material e superfície de formação das pilhas, foram considerados.

O equipamento usado foi construído por Girardi (2016), atendendo as recomendações da dissertação de Guzmán (2008) e da norma alemã DIN 18126 (1996). O uso do equipamento facilitou o controle, mesmo que manual, da velocidade de subida do funil permitindo mantê-lo próximo ao topo da pilha em formação. A Figura 3.16-I apresenta o equipamento usado nos ensaios.

Para a execução do ensaio foram confeccionados, em plástico, dois funis. O primeiro para atender nos ensaios envolvendo as esferas de vidro e as areias padrão e o segundo para ensaiar os materiais platônicos, ver Figura 3.16-II. O diâmetro de cada funil, teve abertura igual ou superior a cinco vezes o tamanho médio das partículas ensaiadas, garantindo o fluxo permanente do material.

Os materiais foram depositados sob uma base metálica, colada a um cilindro de rocha. Foram usadas duas bases de tamanhos diferentes, a primeira para os materiais finos e a maior para os sólidos platônicos. As bases são mostradas na Figura 3.16-III e a Tabela 3.5 apresenta as dimensões adotadas.

Tabela 3.5. Dados das bases e dos funis usados nos ensaios.

Cápsulas	Diâmetro-D (mm)	Altura-h (mm)	Funis	Diâmetro de abertura (mm)
Base 1	91,87	7,41	Funil 1	15,00
Base 2	121,70	4,38	Funil 2	35,00

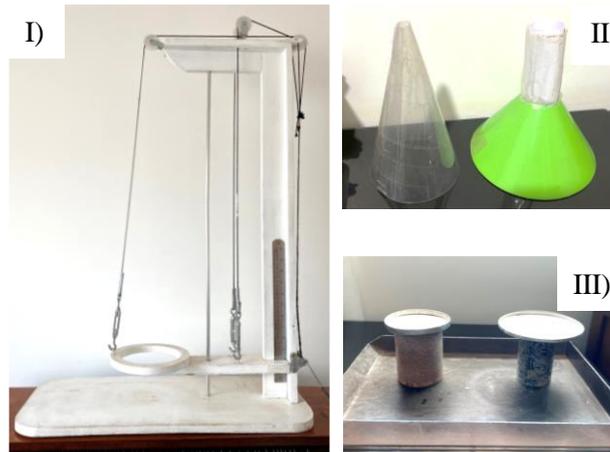


Figura 3.16. Itens para realização do ensaio: I) Equipamento, II) Funis e III) Bases.

Cada amostra teve sua massa inicial padronizada, de acordo com a quantidade de material necessária para preencher todo o funil. A determinação foi feita para todas as amostras antes do início dos ensaios.

O ensaio iniciou após a alocação da base no ponto indicado no equipamento, posicionamento e preenchimento do funil com a amostrada a ser ensaiada. Com a ponta do funil encostada a base, impedindo o fluxo de material, realiza-se a primeira leitura na régua acoplada ao equipamento, dando início ao ensaio. A Figura 3.16 apresenta a sequência de eventos mais importantes do ensaio de ângulo de repouso.

O levantamento do funil deve ser feito de forma que a ponta do mesmo estava sempre próxima ao topo da pilha em formação. Com o final do fluxo de material, ainda com a ponta do funil colada ao topo, realizou a leitura final na régua do equipamento. Após as medições da altura do cone, foi retirada uma foto da pilha, e então pesado o material que formou o cone.

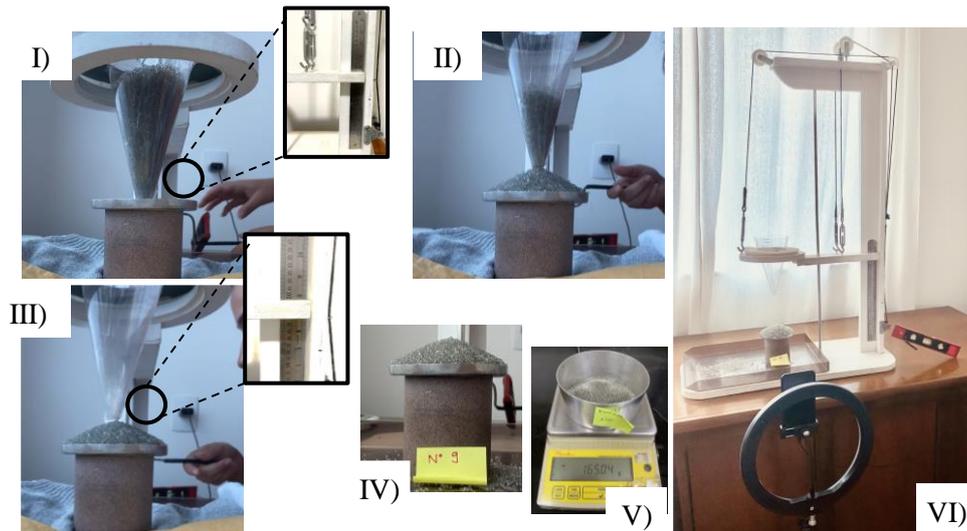


Figura 3.17. Etapas do ensaio: I) Medição inicial, II) Formação da pilha, III) Medição final, IV) Imagem do cone V) Medição da massa da pilha e VI) Imagem do ensaio.

Os métodos de realização das leituras seguiram as instruções usadas por Braga *et al.* (2019). Com auxílio de uma régua que fica acoplada à haste do equipamento, foi medida a altura inicial da base antes do preenchimento de material, e a altura do topo da pilha ao final do fluxo de material. As duas medias foram realizadas com o auxílio da ponta do funil.

O tamanho de cada pilha se dá pelo desconto da altura final pela soma da altura inicial e a altura da cápsula, mostrado na equação 1, presente na Figura 3.18. Após as medições de tamanho da pilha, cada uma delas teve sua massa medida. A determinação precisa da massa que formou o amontado de partículas foi imprescindível para análise da influência da densidade e dos vazios nos ângulos de repouso de cada pilha.

Para cada amostra foram construídas 30 pilhas, eliminando, durante o tratamento dos dados, as imprecisões geradas pelo equipamento e pelo operador. O cálculo dos ângulos de repouso seguiu a equação 2, apresentada na Figura 3.18.

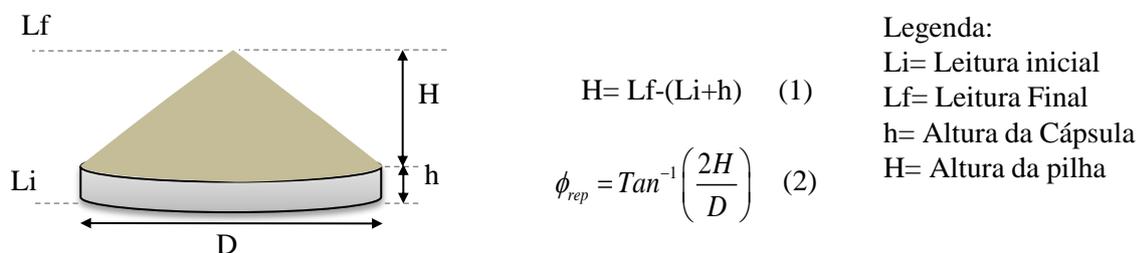


Figura 3.18. Cálculo do ângulo de repouso: I) Equação da altura do cone e II) Equação do ângulo de repouso.

Foi convencionado retirar uma imagem de cada pilha formada para verificação das dimensões do cone e medição das flechas. Os cones formados não apresentaram uma forma triangular perfeita, assim para cálculo de seu volume, foi necessário considerar as dimensões das flechas, observados nas Figura 3.19, Figura 3.20 e Figura 3.21.

Durante o tratamento das imagens foi constatado que, para um mesmo material, as dimensões das flechas de cada pilha pouco variaram, conseguindo gerar funções para cálculo do volume através da determinação da flecha média de cada material.

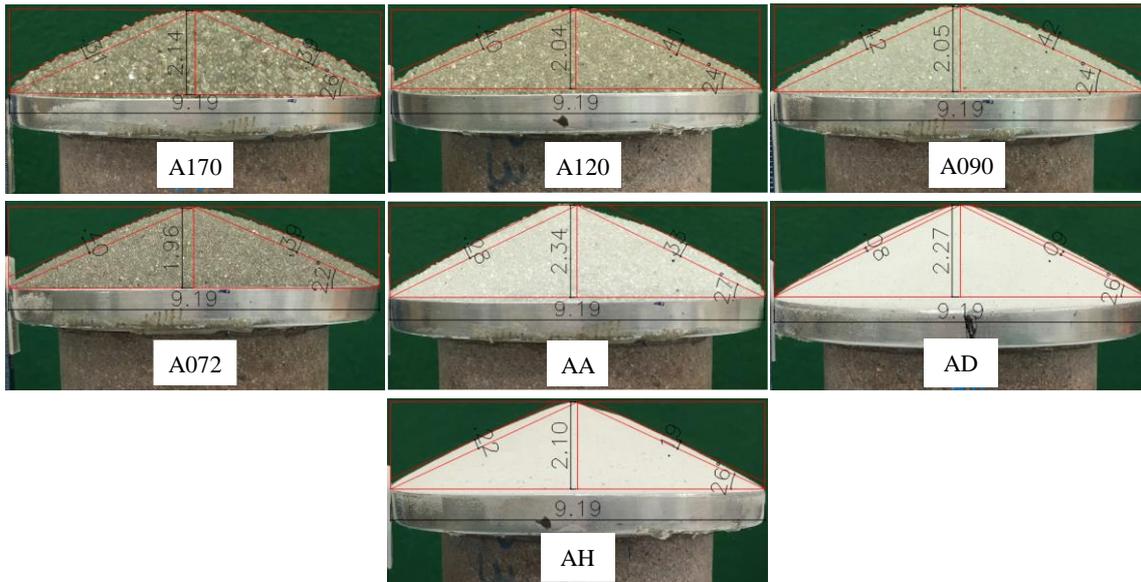


Figura 3.19. Pilhas formadas pelas esferas de vidro, evidenciando as flechas.

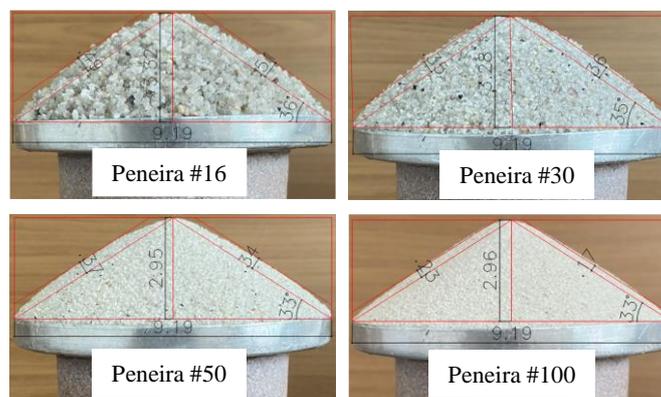


Figura 3.20. Pilhas formadas pelas areias, evidenciando as flechas.

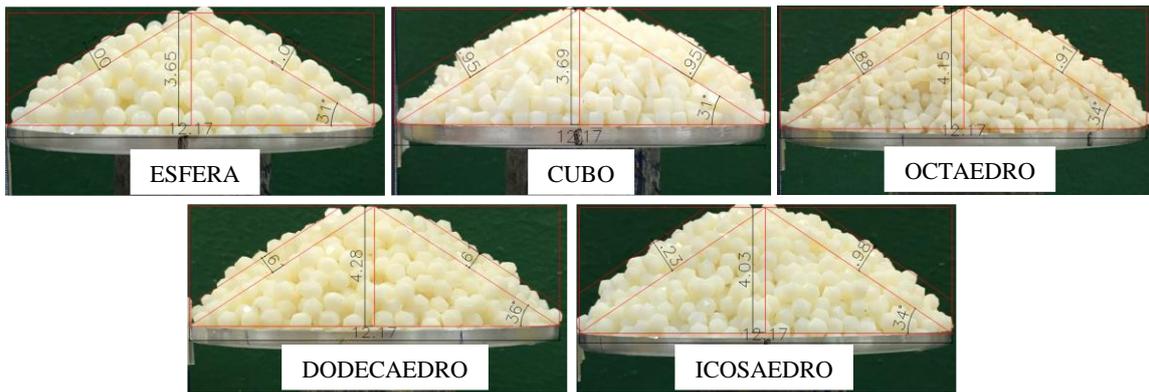


Figura 3.21. Pilhas formadas pelos poliedros, evidenciando as flechas.

As funções de volume, mostradas na Tabela 3.6, foram geradas com auxílio de um programa desenvolvido pela equipe do Infralab, denominado Ângulo de Repouso. O programa além de considerar as flechas no cálculo do volume das pilhas ainda fornece os ângulos de repouso e a densidade de cada amostra. Para isso o operador deve fornecer as dimensões da base sob a qual as pilhas são depositadas, a altura de cada cone, tamanho médio das flechas formadas e a sua massa. O layout do programa é apresentado na Figura 3.22.

O ensaio não permite o controle da compactidade das pilhas. Por se tratar de um fluxo de material, espera-se que estes estejam no estado mais fofo.

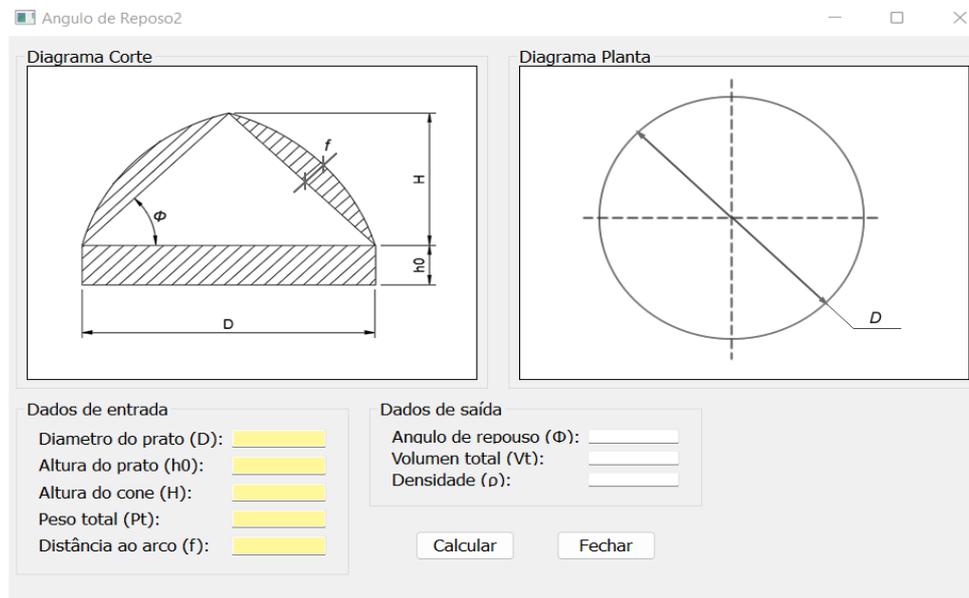


Figura 3.22. Programa Ângulo de Repouso, desenvolvido pela equipe matemática do Infralab.

Tabela 3.6. Cálculo do Volume das pilhas para cada tipo de amostra.

Amostra	Flecha	Volume	Amostra	Flecha	Volume
A170	0,35	$V = 25,59.h + 52,51$	Areia #16	0,50	$V = 27,22.h + 54,01$
A120	0,41	$V = 26,23.h + 53,10$	Areia #30	0,35	$V = 25,59.h + 52,51$
A090	0,42	$V = 26,34.h + 53,20$	Areia #50	0,35	$V = 25,59.h + 52,51$
A072	0,40	$V = 26,13.h + 53,00$	Areia #100	0,20	$V = 24,04.h + 51,04$
AA	0,30	$V = 25,07.h + 52,02$	Esfera	1,00	$V = 52,90.h + 68,38$
AD	0,08	$V = 22,86.h + 49,89$	Cubo	0,95	$V = 52,12.h + 67,43$
AH	0,20	$V = 24,04.h + 51,04$	Octaedro	0,90	$V = 51,34.h + 66,49$
-	-	-	Dodecaedro	0,60	$V = 46,85.h + 61,08$
-	-	-	Icosaedro	1,10	$V = 54,50.h + 70,33$

3.3.2 Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos de Furnas Centrais Elétricas S.A, com um equipamento do tipo analógico e motorizado, que possibilita a saturação e consolidação das amostras.

O equipamento possui capacidade de aplicação de carga normal de até 1000 kgf. Que ocorre através do carregamento de pesos em sua alavanca e/ou braço de alavanca. Com um anel dinamométrico, o equipamento é capaz de medir até 500 kgf de forças cisalhantes.

O equipamento permite um deslocamento horizontal de até 10 mm, que são lidos, assim como os deslocamentos verticais, por relógios comparadores analógicos. A velocidade de deslocamento chega à ordem de 3 mm/min, sendo ajustadas por meio de catracas. A Figura 3.23 apresenta o equipamento durante um ensaio.



Figura 3.23. Cisalhamento Direto: I) Equipamento em ensaio, II) Regulagem para cisalhamento, III) Leitura de deslocamento vertical e horizontal e IV) Ajuste da velocidade.

Para a obtenção da envoltória de ruptura todas as amostras foram rompidas em quatro pontos com diferentes tensões de confinamento. As tensões normais aplicadas foram de 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa e 320 kPa. Esses níveis de tensão não provocam quebra das partículas, de acordo com Zuluaga (2016).

Cada corpo de prova foi moldado diretamente na caixa bipartida, de 103,53 cm² de área interna e 2,66 cm de altura. A quantidade de material usada foi a relativa a uma compacidade relativa de 50%, em todos os materiais usados. Antes de iniciar a moldagem o material era retido em estufa para controle de umidade. A Figura 3.24 mostra as etapas de montagem dos corpos de prova, para o ensaio de cisalhamento direto.

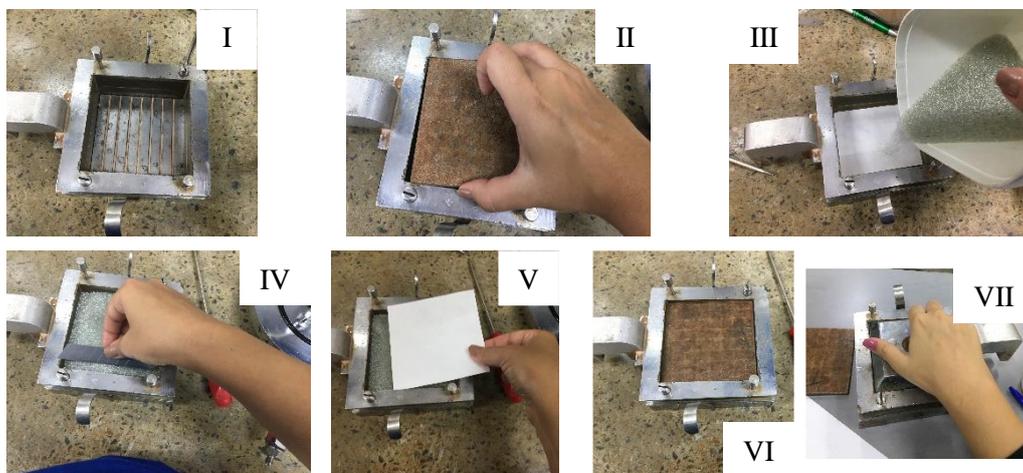


Figura 3.24. Montagem dos corpos de prova para o cisalhamento direto: I) Caixa Bipartida montada, II) Pedra porosa de fundo, III) Material sendo colocado na caixa, IV) Regularização do material, V) Papel filtro, VI) Pedra porosa de topo e VII) Topo da caixa.

As amostras foram consolidadas e cisalhadas em seu estado natural, bem como nos ensaios de ângulo de repouso. Optou-se por não saturar as amostras por poder comparar o ângulo de atrito com o ângulo de repouso e por garantir dados próximos das condições impostas em simulações numéricas.



Figura 3.25. Corpos de prova após cisalhamento: I) Esfera de Vidro, II) Areia Padrão e III) Poliedro.

Como em materiais granulares, a drenagem é livre, a velocidade de ruptura foi de 0,337 mm/min e as deformações horizontais ocorreram até o limite do equipamento, de 10 mm. Na Figura 3.25 aparecem as imagens de amostras após o cisalhamento.

3.3.3 Ensaio de Compressão Triaxial

Comumente utilizado, o ensaio de compressão triaxial é um dos ensaios com melhor custo-benefício na determinação dos parâmetros de resistência dos solos, tanto em condições saturadas quanto em amostras em seu estado natural. O ensaio permite a aplicação de diversas trajetórias de tensões.

Nesta pesquisa os ensaios de compressão triaxial realizados foram do tipo consolidado e drenado em amostras saturadas. Executados no Laboratório de Mecânica dos Solos de Furnas Centrais Elétricas S.A, foram usados os procedimentos operacionais do próprio laboratório, que são baseados em normas americanas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

As tensões de confinamento definidas para a confecção da envoltória de ruptura foram: 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa, 320 kPa e 640 kPa e a velocidade de cisalhamento de 0,337 mm/min, assim como no ensaio de Cisalhamento Direto.

A moldagem, de todas as amostras, fora feita a vácuo com auxílio de um gabarito metálico de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A Figura 3.26 apresenta a sequência de moldagem dos ensaios.

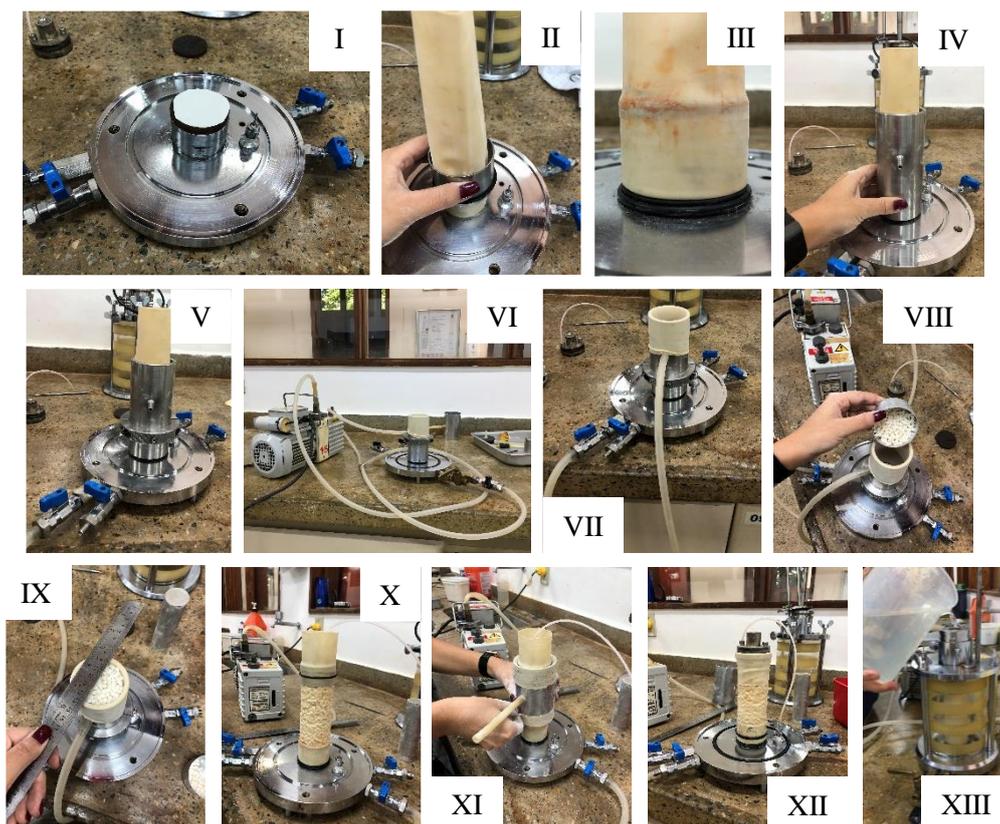


Figura 3.26. Montagem do Ensaio de Compressão Triaxial: I) Base com a pedra porosa e papel filtro, II) Fixação da membrana com o-ring, III) Membrana fixada com dois o-rings, IV) Gabarito metálico, V) Fixação do Gabarito metálico, VI) Preparação das bombas de sucção, VII) Bombas acopladas ao gabarito e a base, VIII) Moldagem da amostras, IX) Regularização do topo do CP, X) CP com o topo acoplado e vedado com o-ring superior, XI) Fixação da segunda membrana, XII) Montagem do CP finalizada, XIII) Enchimento da câmara com água.

Os CP's passaram por quatro etapas após sua moldagem: saturação por percolação ascendente, saturação por contrapressão, consolidação e cisalhamento, podendo ser observadas na Figura 3.27.

A saturação das amostras nesse ensaio, que diferiu dos demais ensaios de resistência realizados nessa pesquisa, foi para eliminar a influência da sucção nas amostras e obter um parâmetro de resistência mais fidedigno aos usados em projeto geotécnicos.

Cada tipo e granulometria das amostras levaram tempos distintos no processo de saturação, mas em média foram cinco dias na percolação ascendente e três dias na contrapressão. O processo de contrapressão consistiu em cinco estágios. Inicialmente aplicou 50 kPa de pressão confinante e 40 kPa de contrapressão e os estágios posteriores seguiu-se com o acréscimo de 50 kPa em ambas as bombas. A diferença de 10 kPa entre a confinante e a contrapressão garantiram que os CP's não mudassem a forma. A contrapressão durou em média 48 horas.



Figura 3.27. Etapas do Ensaio de Compressão Triaxial; I) Saturação por percolação, II) Saturação por contrapressão, III) Consolidação, IV) Programação do ensaio e registro de dados do Cisalhamento e V) Cisalhamento.

Por se tratar de um material granular com drenagem livre, o processo de rompimento foi de poucas horas e o limite para que o ensaio fosse encerrado era o CP atingir 20,1% de deformação axial. A Figura 3.28 apresenta os CP's de um tipo de esfera, areia e poliedro após o rompimento.



Figura 3.28. Amostras após o rompimento: I) Esfera de Vidro, II) Areia Padrão e III) Poliedro.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados deste estudo. Primeiramente, apresentados todos os componentes da avaliação morfológica e de tamanho das partículas. Na sequência, os resultados dos exercícios de avaliação mecânica de cada amostra são mostrados.

4.1 ÍNDICES FÍSICOS

As amostras estudadas, tiveram a massa específica dos grãos e os índices de vazios máximo e mínimo determinados de acordo com a ABNT NBR 6457/16, ABNT NBR 16840/20 e ABNT NBR 16843/20 respectivamente.

4.1.1 Esferas de Vidro

As microesferas de vidro, nomeadas de acordo com a classificação da empresa fornecedora (Potters Industrial Ltda.), tem os resultados da caracterização mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resultados da Caracterização física das Esferas de Vidro.

Amostra	G_s	ρ_s MÁX (g/cm ³)	ρ_s MÍN (g/cm ³)	e MÁX	e MÍN
A170	2,47	1,62	1,52	0,63	0,53
A120	2,48	1,55	1,49	0,67	0,60
A090	2,48	1,57	1,49	0,69	0,59
A072	2,50	1,57	1,48	0,69	0,59
AA	2,53	1,58	1,50	0,75	0,64
AD	2,52	1,56	1,46	0,80	0,61
AH	2,51	1,54	1,36	0,84	0,63

Os resultados apresentados pelos ensaios realizados nos laboratórios de Furnas S.A., foram coerentes com os dados fornecidos pelo fabricante e expostos na Tabela 3.1.

4.1.2 Areia Padrão

As areias padrão analisadas neste estudo também tiveram seus índices físicos determinados assim como as esferas de vidro. Os resultados do peso específico dos grãos e dos índices de vazios máximo e mínimo são exibidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Resultados da Caracterização física das Areias do IPT.

Amostra	G_s	ρ_s MÁX (g/cm ³)	ρ_s MÍN (g/cm ³)	e MÁX	e MÍN
Areia Padrão #16	2,64	1,61	1,41	0,87	0,64
Areia Padrão #30	2,67	1,65	1,35	0,98	0,62
Areia Padrão #50	2,64	1,62	1,30	1,02	0,63
Areia Padrão #100	2,67	1,65	1,31	1,04	0,62

4.1.3 Sólidos Platônicos

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos índices físicos dos poliedros estudados nesta pesquisa. Os dados são condizentes aos exibidos na Tabela 3.3, que consta os parâmetros do material usado na confecção das partículas, fornecidos pelo fabricante.

Tabela 4.3. Resultados da Caracterização física dos Poliedros.

Amostra	G_s	$\rho_{s\text{ M}\acute{A}\text{X}}$ (g/cm ³)	$\rho_{s\text{ M}\acute{I}\text{N}}$ (g/cm ³)	$e_{\text{ M}\acute{A}\text{X}}$	$e_{\text{ M}\acute{I}\text{N}}$
Esfera	1,194	0,664	0,644	0,848	0,792
Cubo	1,196	0,736	0,680	0,753	0,620
Octaedro	1,204	0,628	0,585	1,052	0,912
Dodecaedro	1,198	0,655	0,618	0,933	0,824
Icosaedro	1,194	0,660	0,628	0,896	0,804

4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As análises granulométricas das amostras foram realizadas por dois métodos distintos. O primeiro procedimento, o ensaio de granulometria convencional, seguindo as normativas da ABNT NBR 7181/16 e posteriormente o estudo granulométrico através de análises de imagens.

4.2.1 Esferas de Vidro

As curvas granulométricas das microesferas de vidros, extraídas no ensaio convencional, são exibidas na Figura 4.1 e as suas propriedades na Tabela 4.4.

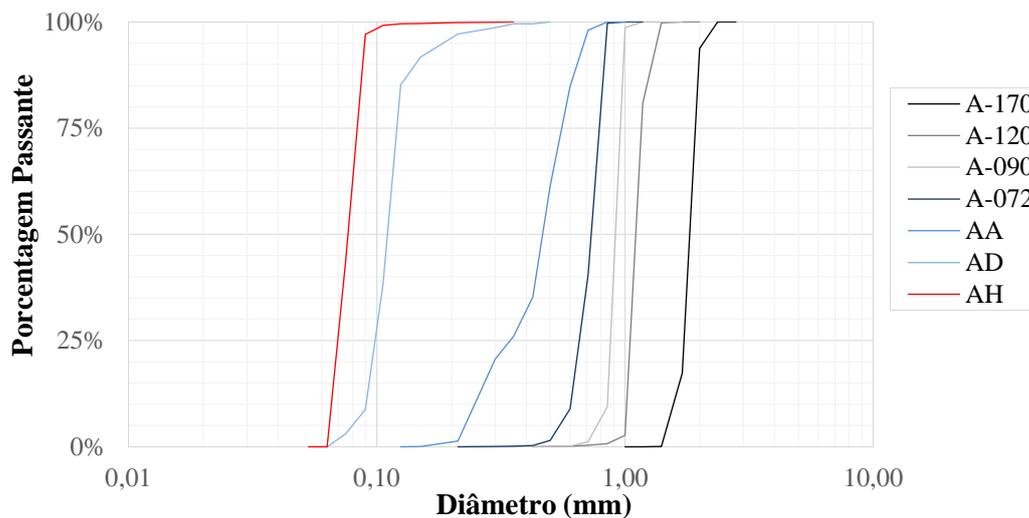


Figura 4.1. Curvas Granulométricas das Microesferas de Vidro.

Tabela 4.4. Propriedades das Amostras extraídas do ensaio de Curva Granulométrica, das Esferas.

Amostra	D_{60} (mm)	D_{50} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	C_c
A170	1,868	1,826	1,750	1,570	1,19	1,04
A120	1,132	1,108	1,063	1,018	1,11	0,98
A090	0,935	0,918	0,885	0,851	1,10	0,98
A072	0,756	0,733	0,674	0,604	1,25	0,99
AA	0,494	0,468	0,391	0,253	1,95	1,22
AD	0,115	0,111	0,102	0,091	1,26	0,99
AH	0,080	0,077	0,071	0,066	1,21	0,96

O ensaio de granulometria por imagens gerou dados com dois vieses de análises. A primeira as amostras eram caracterizadas pelo volume total e a segunda pelo número de partículas usadas nos ensaios.

Os resultados por volume se aproximaram dos resultados obtidos pelo ensaio convencional, uma vez que é a técnica de cálculo mais semelhante. Já as respostas por número de partículas evidenciaram um caráter bimodal nas amostras de vidro. A Figura 4.2 mostra os diagramas encontrados em cada uma das análises realizadas.

O caráter bimodal das esferas fica mais evidentes nas amostras de maior diâmetro. Parte disso está ligado ao fato que as análises por imagem são minuciosas e podem identificar até mesmo as partes minúsculas de esferas fraturadas, poeira e outros sólidos indesejáveis.

Entretanto ao analisar os resultados por números de partículas é bem diferente dos valores encontrados no ensaio convencional para a maioria das amostras. A diferença entre distribuições baseadas em número e baseadas em massa/volume reside no fato de que para distribuições de volume, partículas grandes têm um peso mais forte, enquanto para distribuições de números, partículas pequenas são mais pesadas.

As próximas análises irão usar como padrão os dados em relação ao volume total extraídos do ensaio de análise de imagem em 2D. O ensaio de análise de imagem, forneceu quatro medidas de tamanho das amostras. Porém, por ser tratar de partículas esféricas, os parâmetros apresentaram valores similares. A Figura 4.3 apresenta os resultados em relação ao volume total de amostra. As Tabela 4.5 e Tabela 4.6 aponta os dados obtidos das curvas.

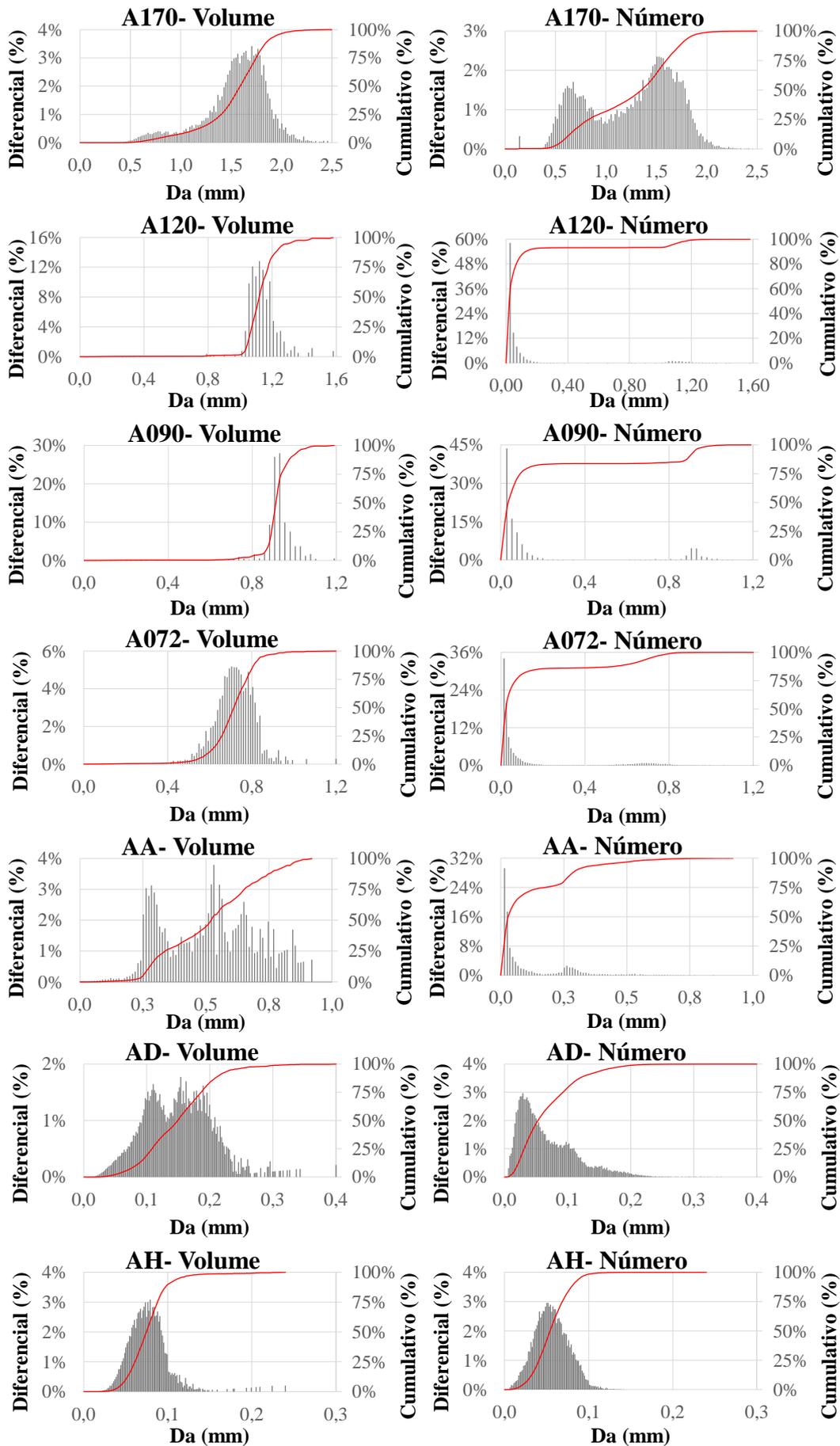


Figura 4.2. Resultados da granulometria por volume e por número de partículas, das Esferas.

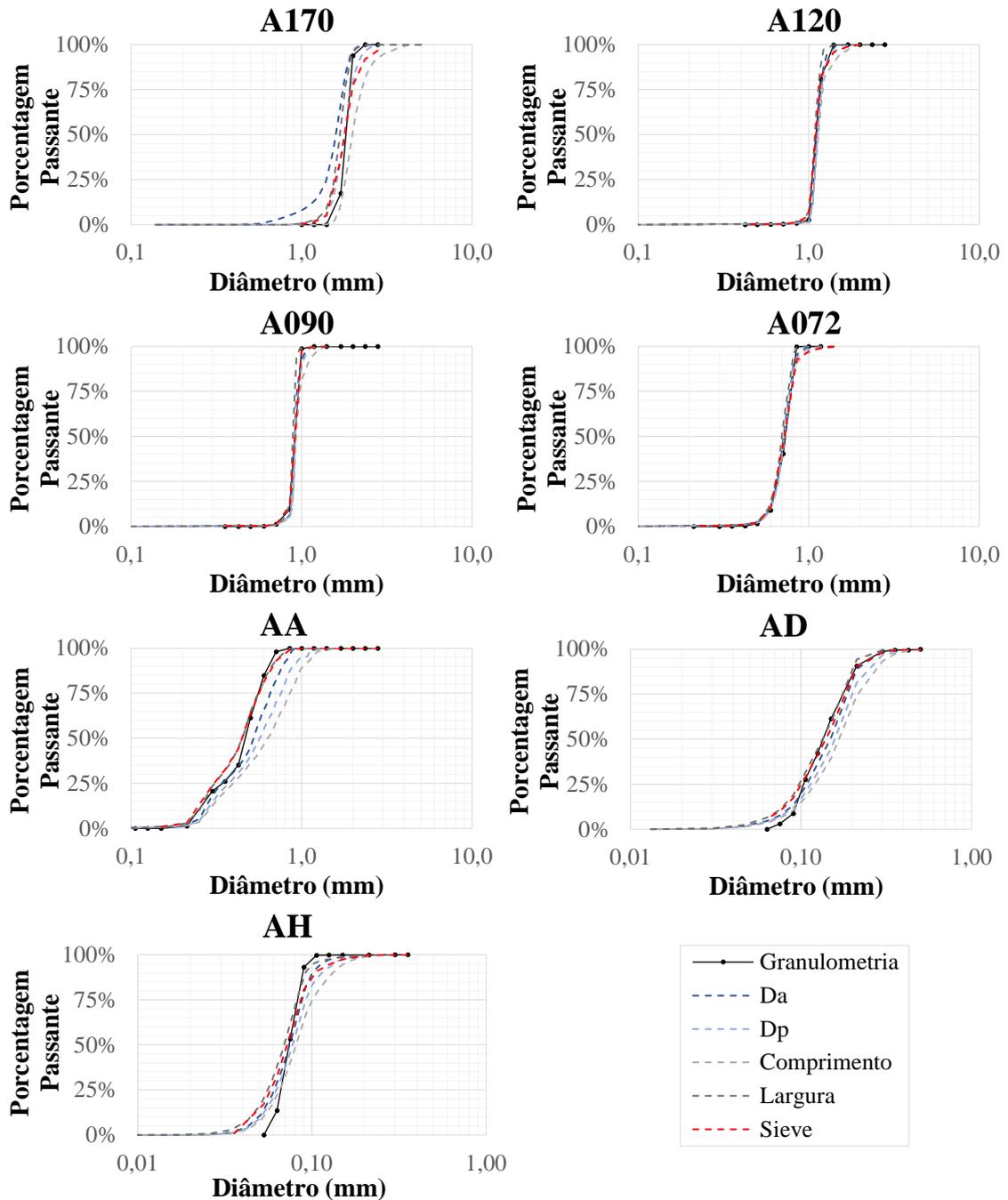


Figura 4.3. Parâmetros de Tamanho, das Esferas, extraídos dos ensaios de análise de imagem.

Tabela 4.5. Propriedades de Tamanho, das Esferas de Vidro, extraídos do SYNC.

Amostra	D_{60} (mm)	D_{50} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	C_c
A170	1,651	1,587	1,440	1,090	1,52	1,15
A120	1,138	1,117	1,080	1,034	1,10	0,99
A090	0,922	0,914	0,897	0,865	1,07	1,01
A072	0,736	0,714	0,669	0,594	1,24	1,02
AA	0,567	0,521	0,387	0,268	2,12	0,99
AD	0,163	0,150	0,108	0,072	2,26	0,99
AH	0,078	0,070	0,061	0,047	1,66	1,02

Tabela 4.6. Propriedades das Esferas de Vidro extraídos do SYNC, sobre dimensões.

Amostra	D_A (mm)	D_P (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Sieve (mm)
A170	1,587	1,775	1,990	1,680	1,800
A120	1,117	1,129	1,140	1,087	1,108
A090	0,914	0,912	0,928	0,889	0,918
A072	0,714	0,720	0,730	0,697	0,720
AA	0,521	0,569	0,630	0,448	0,448
AD	0,150	0,140	0,142	0,136	0,140
AH	0,070	0,072	0,072	0,070	0,072

4.2.2 Areia Padrão

A Figura 4.4 apresenta as curvas granulométricas das areias obtidas através do ensaio convencional, e as características extraídas delas são apresentadas na Tabela 4.7.

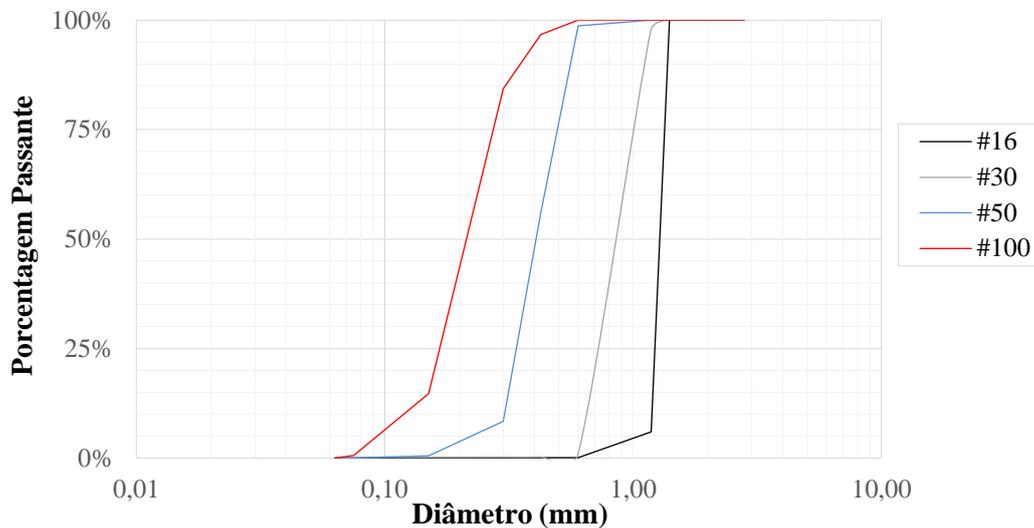


Figura 4.4. Curvas Granulométricas das Areias Padrão.

Tabela 4.7. Propriedades das Areias Padrão, extraídos do ensaio de Curva Granulométrica.

Amostra	D_{60}	D_{50}	D_{30}	D_{10}	C_u	C_c
Areia Padrão #16	1,309	1,281	1,230	1,191	1,10	0,97
Areia Padrão #30	0,947	0,892	0,779	0,661	1,43	0,97
Areia Padrão #50	0,440	0,409	0,358	0,304	1,45	0,96
Areia Padrão #100	0,248	0,226	0,182	0,134	1,85	0,99

Os testes por imagem nas amostras foram de dois tipos. Às duas frações finas tiveram suas propriedades de tamanho determinadas pelo analisador de imagens e difração em 2D. Já as areias de granulometrias mais grosseiras tiveram suas análises realizadas pelo equipamento em 3D. Os ensaios em 2D forneceram quatro medidas de tamanho das areias finas, enquanto os ensaios em 3D apresentaram ainda o parâmetro de espessura.

Bem como as amostras de vidro, as areias apresentaram um comportamento diferente nas duas análises realizadas (ver Figura 4.5). A análise por número de partículas apresenta resultados bem dispersantes dos resultados encontrados na análise por volume. Portanto, as análises de tamanho mostradas na Figura 4.6 são referentes ao volume.

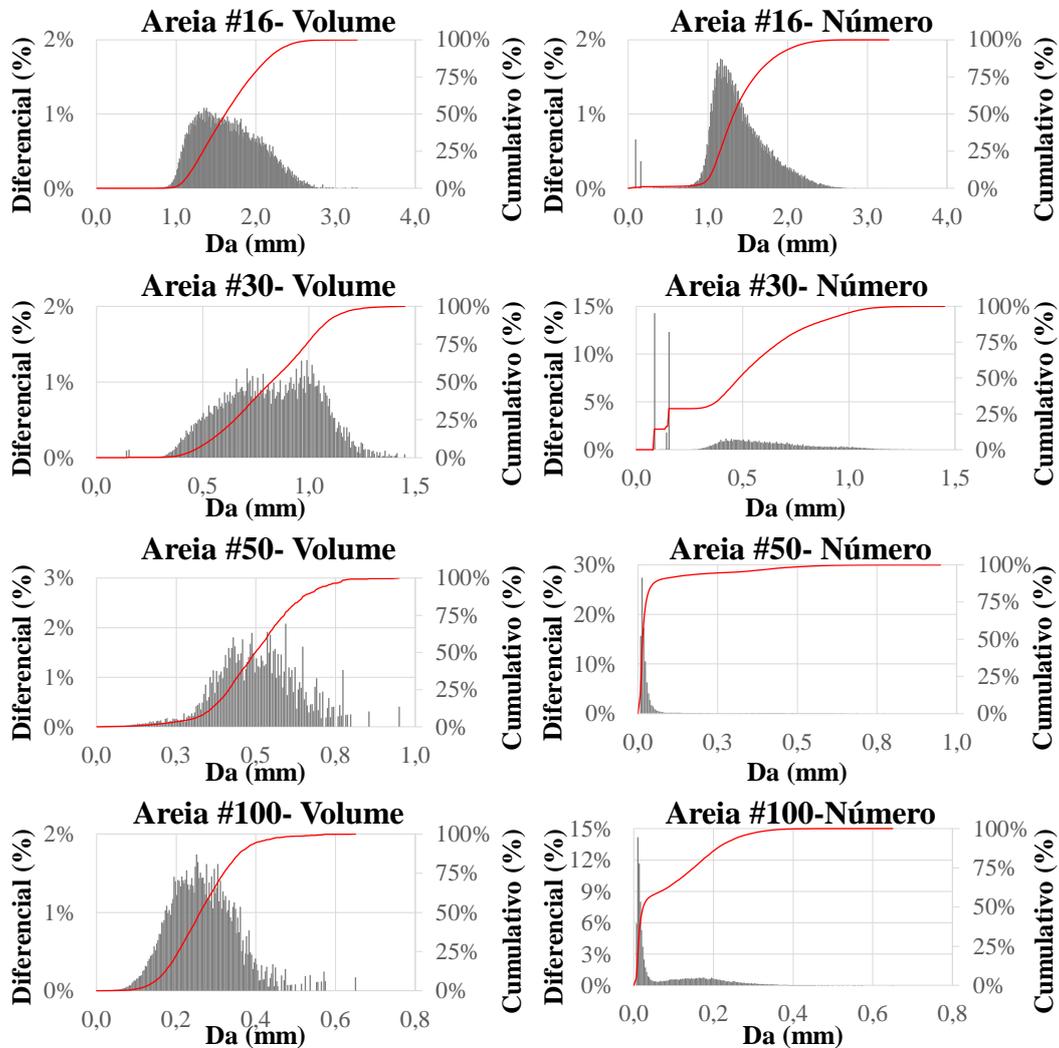
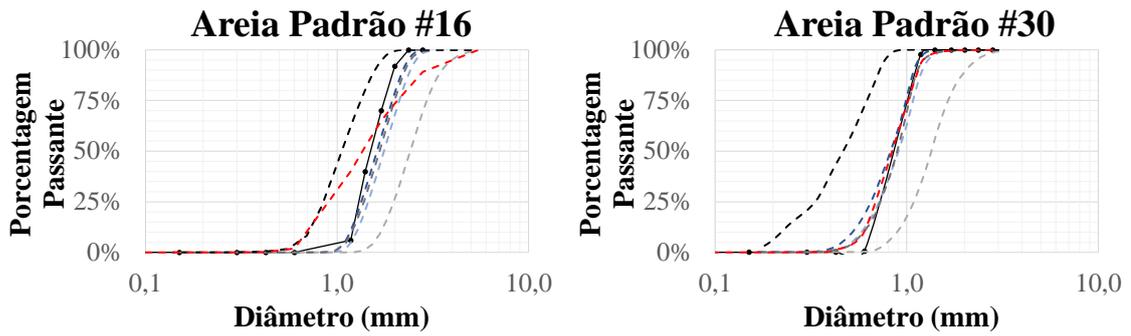


Figura 4.5. Resultados por volume e por número de partículas, das Areias.

As propriedades de tamanho das amostras obtidos nos analisadores de imagem são divulgados nas Tabela 4.8 e Tabela 4.9. Areias grossas apresentaram maiores dispersão dos resultados se comparadas as areias finas ou as esferas de vidro. As areias mais grosseiras tiveram curvas granulométricas semelhantes às largas, enquanto as frações finas tiveram similaridade das curvas granulométricas com a espessura.

Amostras ensaiadas no PartAn (3D):



Amostras ensaiadas no SYNC (2D):

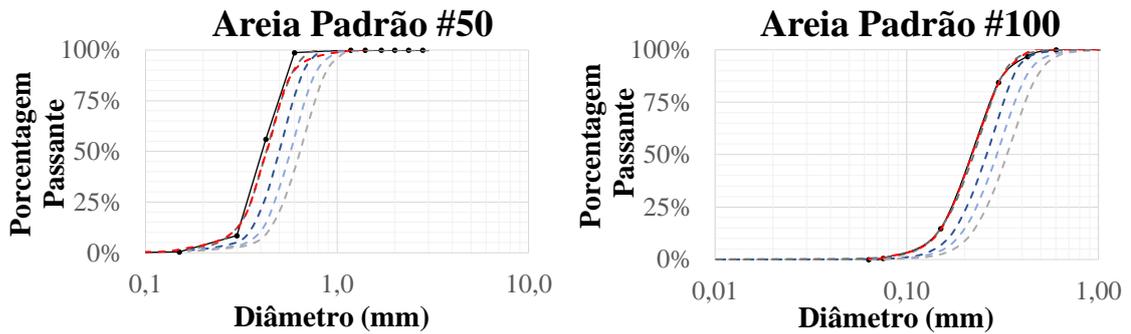


Figura 4.6. Parâmetros de Tamanho extraídos dos ensaios de análise de imagem das Areias Padrão.

Tabela 4.8. Propriedades das Areias extraídos dos dados do Analisador de Imagens.

Amostra	D_{60}	D_{50}	D_{30}	D_{10}	C_u	C_c
Areia Padrão #16	1,732	1,611	1,387	1,165	1,49	0,95
Areia Padrão #30	0,891	0,820	0,682	0,518	1,72	1,01
Areia Padrão #50	0,532	0,498	0,433	0,345	1,54	1,02
Areia Padrão #100	0,283	0,261	0,217	0,163	1,74	1,02

Tabela 4.9. Propriedades das Areias extraídos do SYNC.

Amostra	D_A (mm)	D_P (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
Areia Padrão #16	1,615	1,760	2,410	1,665	1,060
Areia Padrão #30	0,823	0,905	1,343	0,891	0,466
Areia Padrão #50	0,500	0,572	0,640	0,428	-
Areia Padrão #100	0,262	0,297	0,334	0,224	-

4.2.3 Sólidos Platônicos

Os sólidos tiveram a granulometria estimada pelo ensaio de curva granulométrica, os resultados são mostrados na Figura 4.7 e o resumo das propriedades na Tabela 4.10.

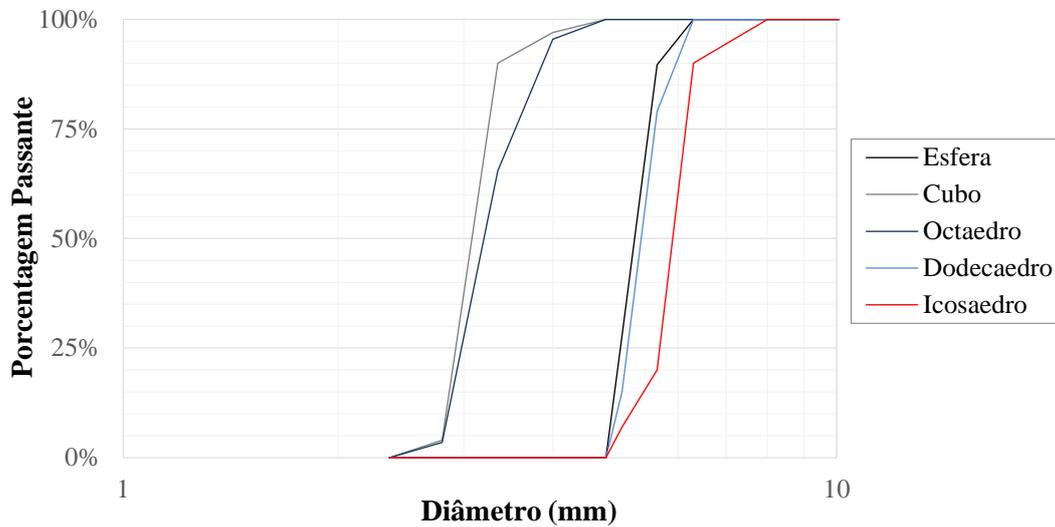


Figura 4.7. Curvas Granulométricas dos Sólidos Platônicos.

Tabela 4.10. Propriedades dos Sólidos, extraídos do ensaio de Curva Granulométrica.

Amostra	D_{60}	D_{50}	D_{30}	D_{10}	C_u	C_c
Esfera	5,21	5,21	5,02	4,88	1,07	0,99
Cubo	3,13	3,08	2,98	2,85	1,10	0,99
Octaedro	3,29	3,2	3,04	2,88	1,14	0,98
Dodecaedro	5,41	5,31	5,14	4,92	1,10	0,99
Icosaedro	5,93	5,9	5,71	5,14	1,15	1,07

A determinação do tamanho por meio das imagens, nos sólidos, ocorreu de forma 3D. A Figura 4.8 apresenta as curvas de propriedade de tamanho por volume e a Tabela 4.11, seus índices. Diferentemente das outras amostras, os sólidos não tiveram comportamento distintos nas análises por volume e por número de partículas, em consequência do uso do equipamento 3D, e por serem partículas de tamanho maior, a lente usada tivera maior precisão.

Tabela 4.11. Propriedades dos Poliedros, extraídos do SYNC.

Amostra	D_{60}	D_{50}	D_{30}	D_{10}	C_u	C_c
Esfera	6,500	6,440	6,330	6,200	1,05	0,99
Cubo	4,820	4,780	4,710	4,640	1,04	0,99
Octaedro	4,72	4,68	4,59	4,43	1,07	1,01
Dodecaedro	5,86	5,75	5,66	5,57	1,05	0,98
Icosaedro	5,58	5,53	5,41	5,29	1,06	0,99

Tabela 4.12. Propriedades dos Poliedros, extraídos do SYNC.

Amostra	D_A (mm)	D_P (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
Esfera	6,443	6,513	6,690	6,532	6,263
Cubo	4,782	5,060	5,882	4,950	3,819
Octaedro	4,681	4,995	5,936	4,438	3,802
Dodecaedro	5,750	5,957	6,386	5,910	5,078
Icosaedro	5,534	5,655	6,264	5,413	5,045

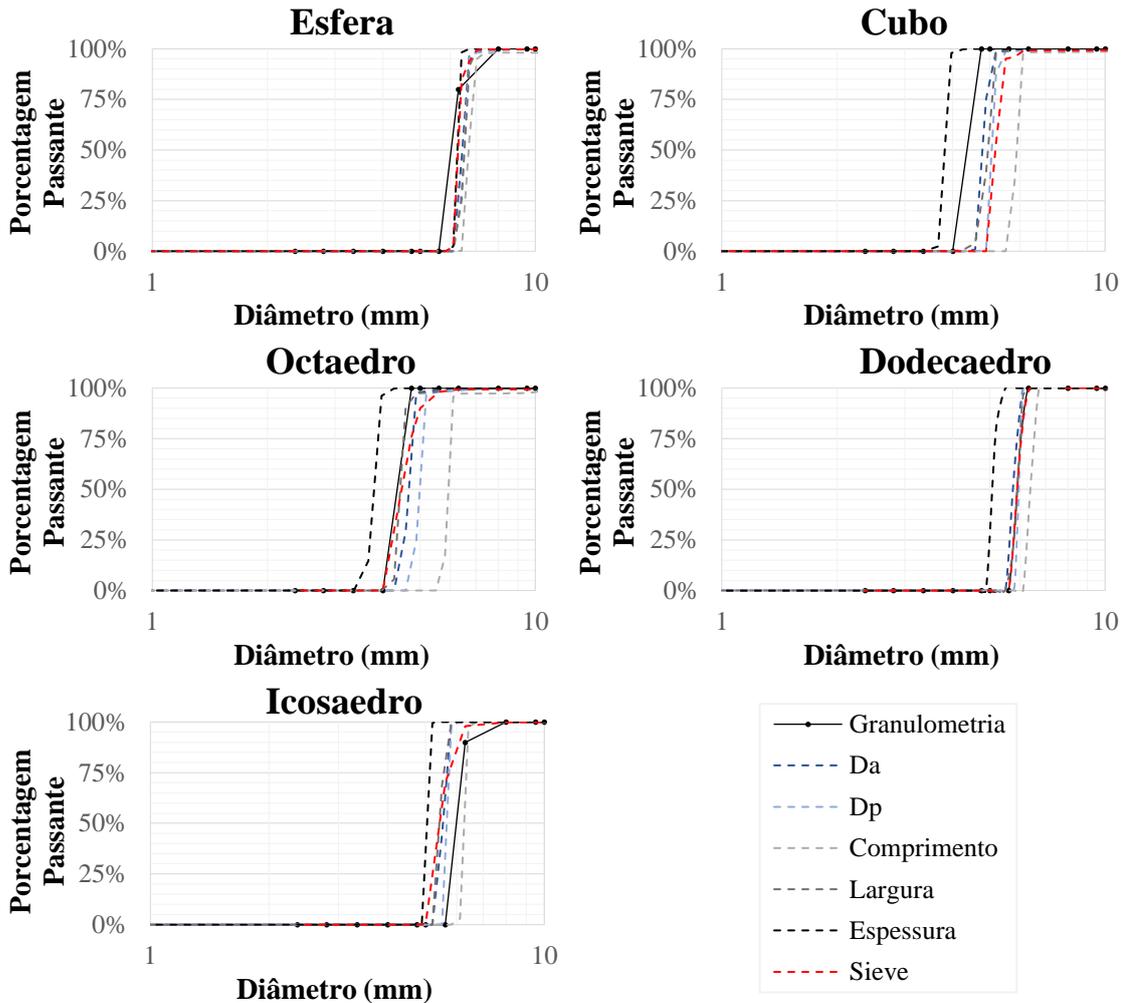


Figura 4.8. Parâmetros de Tamanho extraídos dos ensaios de análise de imagem dos Sólidos Platônicos.

Por serem um material fabricado, em impressora 3D, as curvas dos poliedros são bem uniformes. A diferença existente entre partículas de um mesmo tipo de sólido, se deve ao processo de limpeza e ao número limitado de peneiras usadas na determinação de sua curva granulométrica.

Conforme explicado na metodologia, o critério de fabricação dos poliedros foi único, ou seja, para todas as amostras foi usado o mesmo diâmetro da esfera circunscrita. Esse diâmetro,

no entanto, não controla todas as dimensões dos poliedros, devido a particularidade de forma de cada sólido.

Cada poliedro tem uma de suas suas dimensões determinadas pelo raio da insfera, quando as esferas tocam as faces internas no polígono. Outra pela meiasfera, significando que a esfera toda os vértices interno do poliedro ou ainda pela circunsfera, que é quando a esfera toca os vértices da figura pelo lado externo. A Figura 4.9 descreve essas propriedades graficamente para cada um dos sólidos estudados nesta dissertação.

A Figura 4.9 analisa a espessura, largura e comprimento dos sólidos, normalizando com o diâmetro circunscrito da esfera (D_C). Para cada dimensão, analisou os tamanhos encontrados nas curvas para o material passante em 10%, 50% e 90%.

Assim ao analisar a espessura dos poliedros, o E_{10} normalizado pelo D_C , tem valor igual ao diâmetro da insfera normalizada pelo D_C (DI/D_C). A largura dos poliedros terá o L_{50}/D_C igual o diâmetro da meia esfera, também normalizado (DM/D_C). Por fim, o comprimento terá o C_{90} normalizado igual ao diâmetro da esfera circunscrito, também normalizado (DC/D_C).

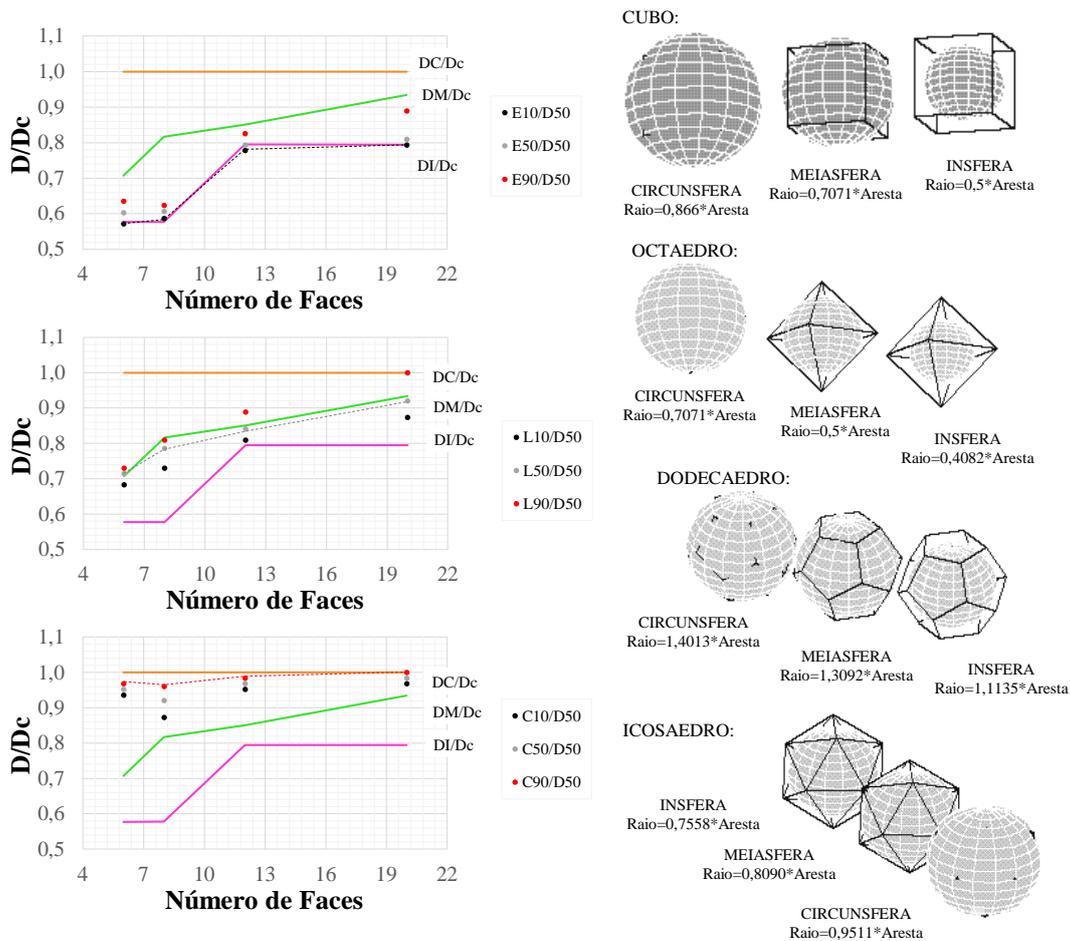


Figura 4.9. Parâmetros de fabricação dos poliedros em comparação aos medidos.

A Figura 4.10 apresenta as curvas das dimensões dos sólidos e os valores esperados da fabricação. Nota-se que os valores foram compatíveis aos esperados, ressaltando a confiabilidade das medidas do PartAn 3D.

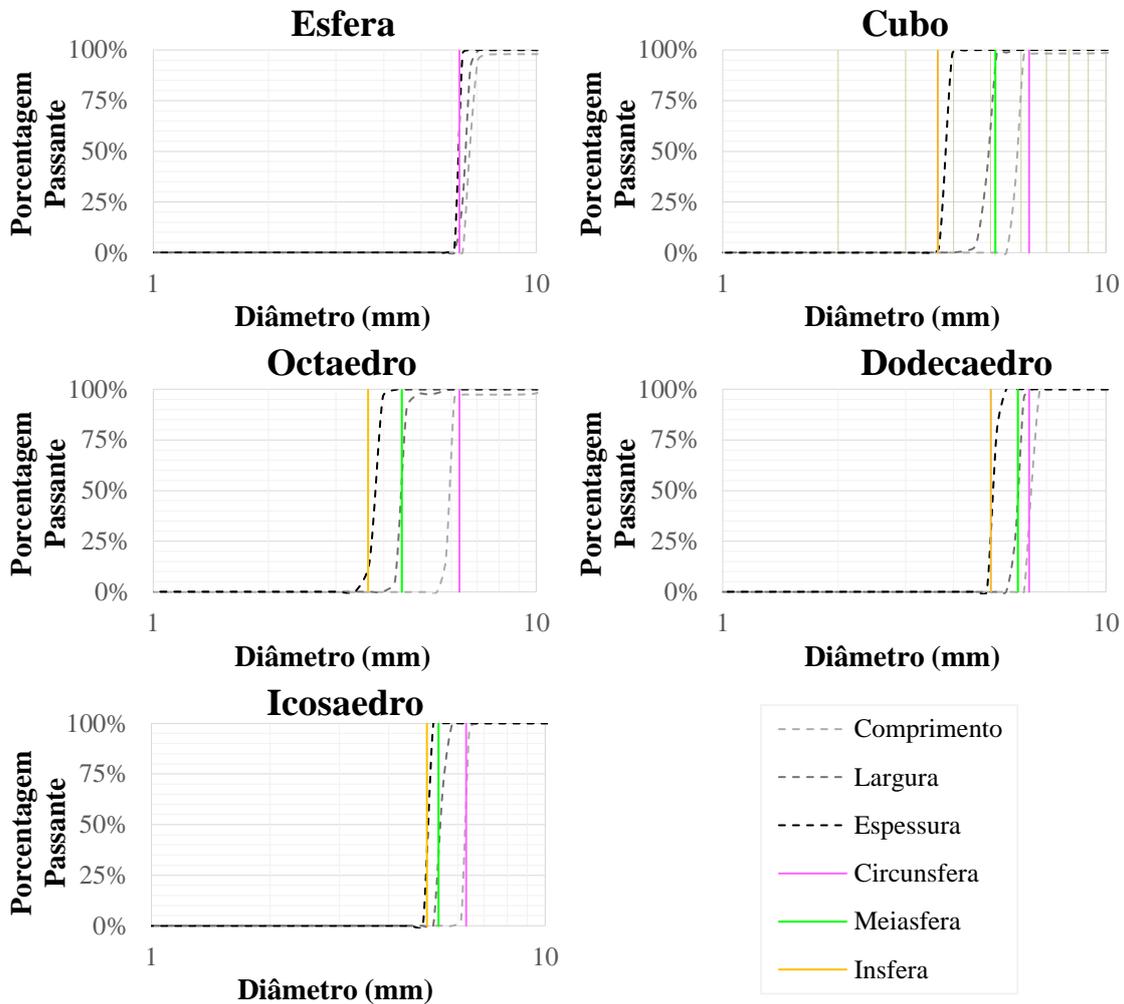


Figura 4.10. Dimensões dos Sólidos Platônicos em comparação ao processo de fabricação usado.

4.3 ANÁLISE DE FORMA E TEXTURA

A quantificação das propriedades de forma e textura das partículas, do material estudado, foi feita através das análises de imagens. As determinações ocorreram simultaneamente a caracterização granulométrica.

Abaixo se encontram os resultados dos parâmetros determinados, bem como as curvas de forma e textura de cada amostra.

4.3.1 Esferas de Vidro

As esferas de vidro tiveram sua forma determinada por análise de imagens 2D, embora o fabricante avalizará que suas amostras possuíssem esfericidade mínima de 70%. Seguiu-se por realizar as verificações dos demais parâmetros de forma e verificar se os dados fornecidos pelo fabricante conferiam com os extraídos pela análise de imagem.

Na Tabela 4.13 são apresentados as médias de cada parâmetro estudado, extraídos dos testes. Os parâmetros apresentam valores similares, devido ao fato de se tratar de partículas que pouco divergem em morfologia, ou seja, há poucas partículas quebradas ou de forma irregular devido ao processo de fabricação. Também é possível notar que em todas as amostras analisadas a esfericidade esteve acima de 0,98, superior ao que o fornecedor indicara.

Tabela 4.13. Índice de Forma extraídos das análises de imagens das Esferas de Vidro.

Amostra	Esfericidade (S_{50})	Circularidade (C_{50})	Redondeza (R_{50})	Compacidade (CO_{50})	Larg./Comp. (W/L_{50})
A170	0,989	0,979	0,948	0,911	0,928
A120	0,984	0,982	0,975	0,981	0,973
A090	0,989	0,984	0,974	0,981	0,974
A072	0,989	0,984	0,983	0,984	0,983
AA	0,983	0,978	0,954	0,974	0,96
AD	0,989	0,983	0,975	0,982	0,979
AH	0,989	0,985	0,968	0,984	0,978

A Figura 4.11 apresenta os parâmetros de esfericidade, circularidade, redondeza, compacidade e a relação de largura e comprimento, estes serão os índices usados para a análise de forma.

Ao observar as curvas dos índices de forma nota-se que as frações A170 e AA apresentaram maiores dispersões de resultados se comparadas as demais amostras.

Porém, mesmo apresentando dispersões, as amostras são consideradas esféricas quanto à forma, sendo possível considerar, como fator de maior influência nos parâmetros mecânicos, o tamanho das amostras.

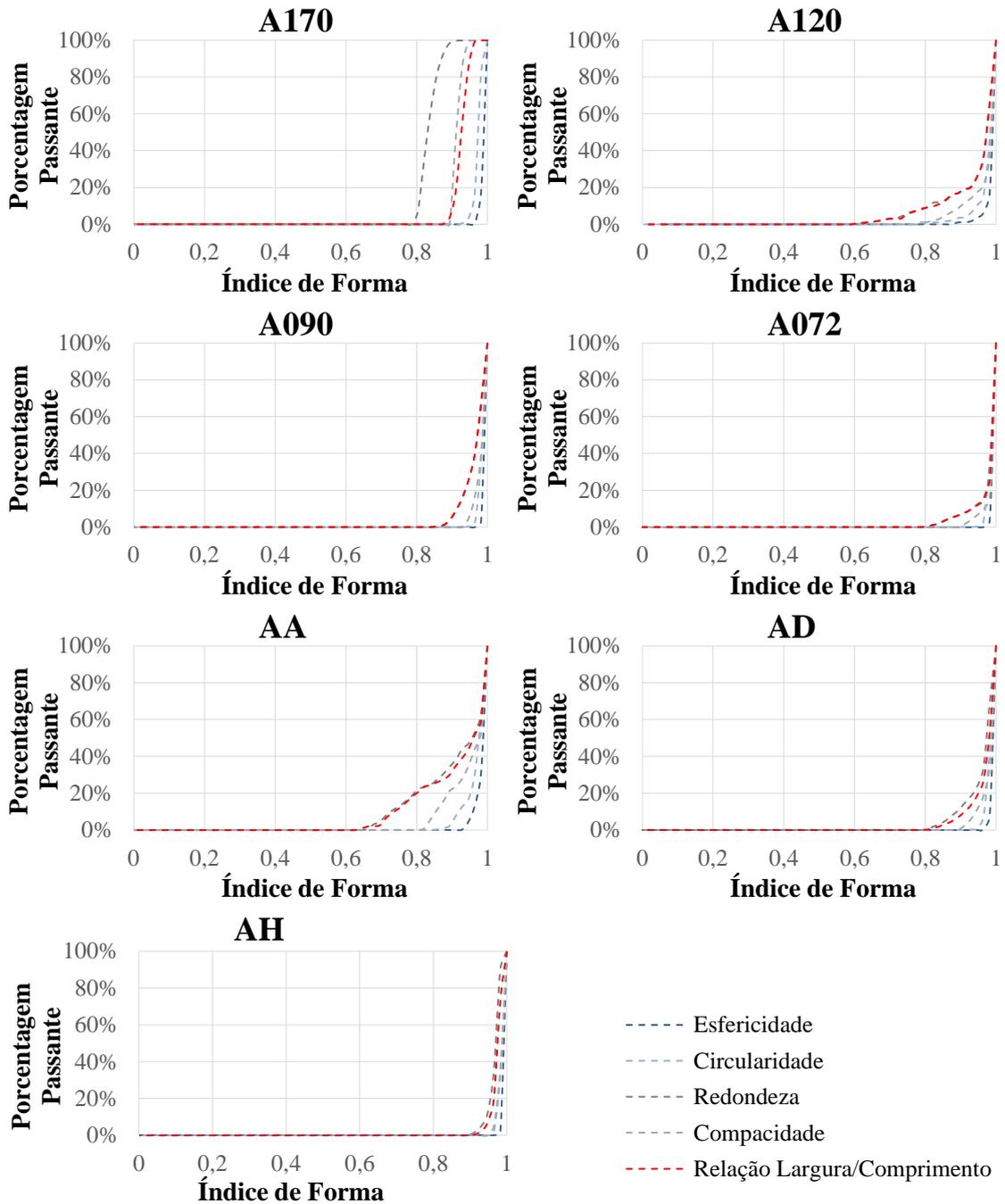


Figura 4.11. Parâmetros de Forma extraídos dos ensaios de análise de imagem, das Esferas.

Para verificação da textura superficial foram plotados na Figura 4.12 as curvas com os índices de convexidade, solidez e concavidade. Os resultados apontaram uma estrutura lisa e livre de superfícies pontiagudas, evidenciados na Tabela 4.14, pelos índices médios de textura superficial.

Tabela 4.14. Índices de Textura Superficial extraídos das análises de imagens para Esferas.

Amostra	Convexidade (V_{50})	Solidez (L_{50})	Concavidade (O_{50})
A170	0,986	0,986	0,014
A120	0,986	0,986	0,014
A090	0,986	0,986	0,014
A072	0,986	0,986	0,014
AA	0,986	0,986	0,014
AD	0,986	0,986	0,014
AH	0,986	0,986	0,014

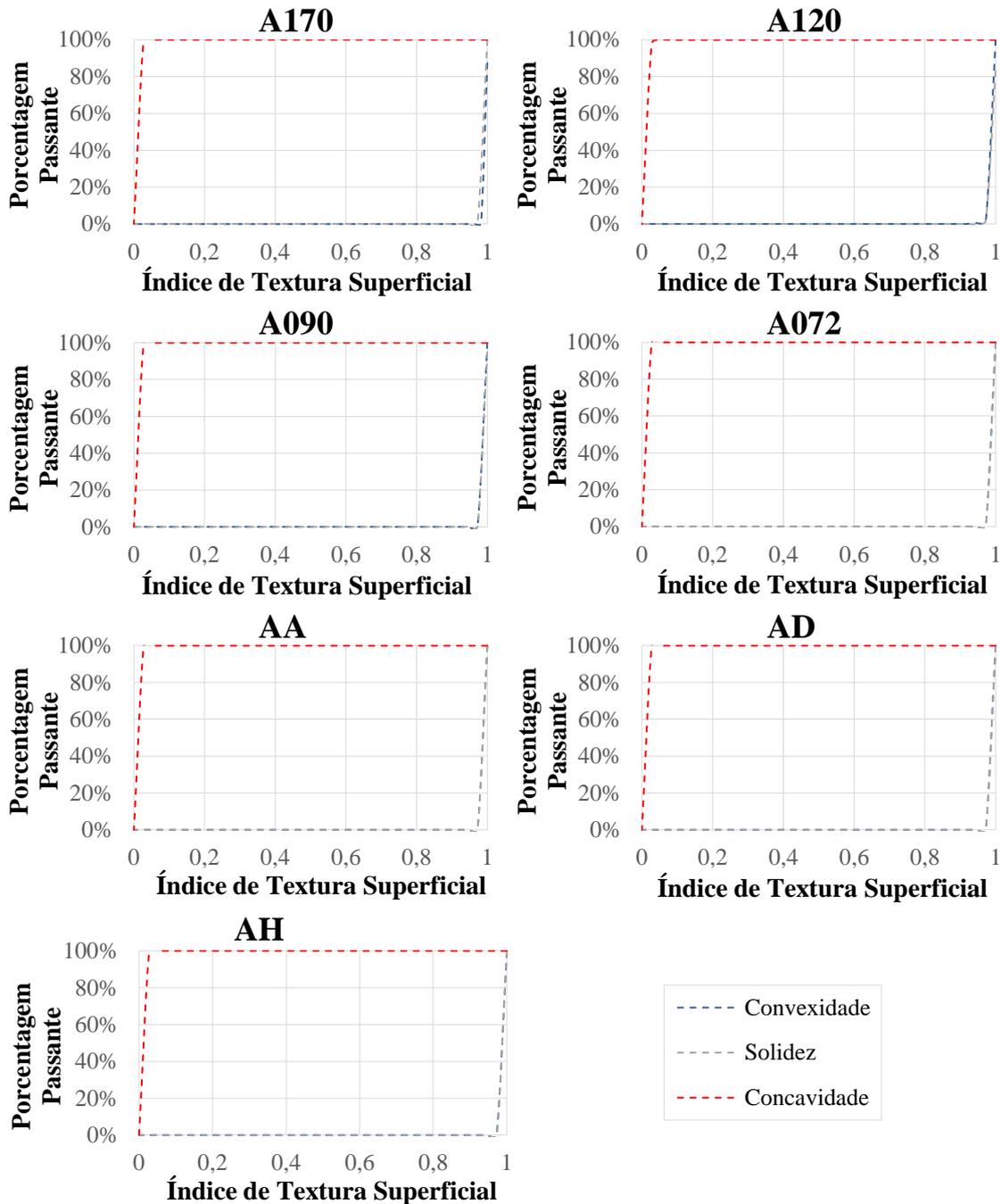


Figura 4.12. Curvas de Textura Superficial, das Esferas de Vidro.

4.3.2 Areia Padrão

As areias padrão de frações #50 e #100 tiveram as formas determinadas por meio de análises de imagens 2D enquanto as frações #16 e #30 utilizaram do equipamento que verifica imagens em 3D, a diferenciação dos instrumentos se deve as diferentes faixas de granulometria dos equipamentos. A Figura 4.13 apresenta as curvas dos parâmetros escolhidos para análise de forma, e na Tabela 4.15 são apresentadas as médias de cada índice.

Como esperado, as areias apresentam índices, de “esfericidade”, menores em relação às esferas, isso deve-se ao fato de se tratar de um material mais heterogêneo e alongado se comparado as partículas industrializadas.

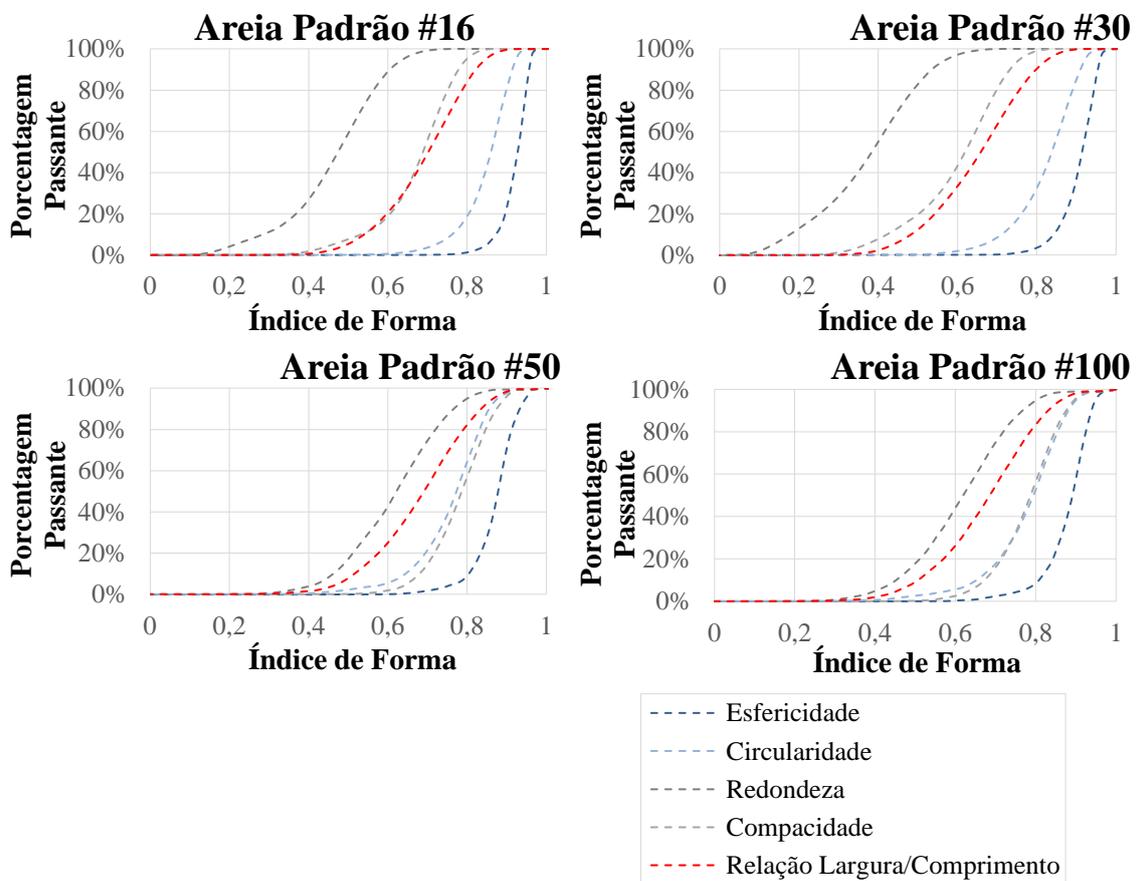


Figura 4.13. Curvas dos parâmetros de Forma, das Areias Padrão.

Tabela 4.15. Índices de Forma extraídos das análises de imagens, das Areias Padrão.

Amostra	Esfericidade (S_{50})	Circularidade (C_{50})	Redondeza (R_{50})	Compacidade (CO_{50})	Larg./Comp. (W/L_{50})
Areia Padrão #16	0,928	0,862	0,478	0,692	0,702
Areia Padrão #30	0,952	0,904	0,546	0,740	0,785
Areia Padrão #50	0,880	0,775	0,622	0,788	0,690
Areia Padrão #100	0,902	0,812	0,65	0,807	0,714

Os índices de textura superficial das amostras também foram analisadas e apresentadas na Figura 4.14 e as suas médias são mostradas na Tabela 4.16, esses resultados são de acordo com o volume amostral. Os resultados desses parâmetros fornecem como dado o tipo de formação mineral das partículas, portanto ao se tratar de um material natural, a variabilidade dos resultados encontrados já era esperada. Diferentemente das esferas e sólidos, que por se tratar de partículas fabricadas com o mesmo material, apresenta índices iguais.

Tabela 4.16 Índices de Textura extraídos das análises de imagens, das Areias Padrão.

Amostra	Convexidade (V_{50})	Solidez (L_{50})	Concavidade (O_{50})
Areia Padrão #16	0,985	0,978	0,021
Areia Padrão #30	0,986	0,986	0,014
Areia Padrão #50	0,960	0,948	0,052
Areia Padrão #100	0,975	0,956	0,044

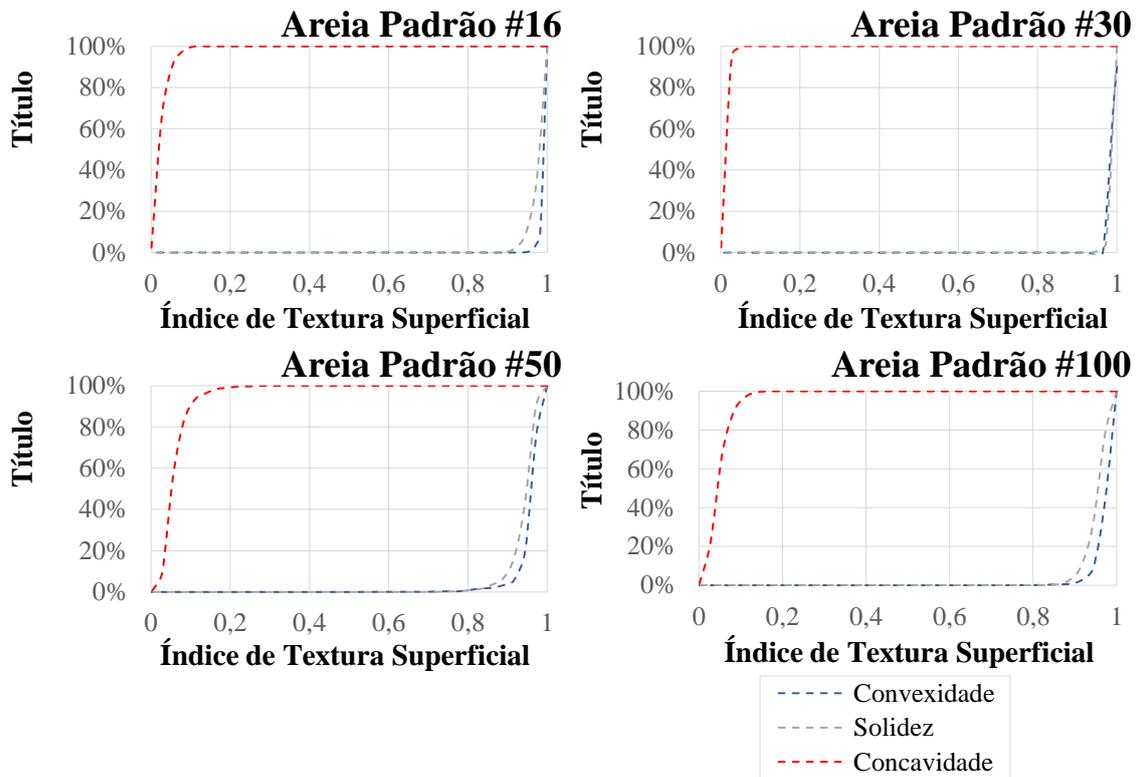


Figura 4.14. Curvas dos parâmetros de Textura Superficial, para areias.

4.3.3 Sólidos Platônicos

Todas as amostras, de sólidos platônicos, foram analisadas no PartAn3D. A Tabela 4.17 traz os índices extraídos dos ensaios e a Figura 4.15 as curvas de cada propriedade morfológica.

Tabela 4.17. Índice de Forma extraídos das análises de imagens das Esferas de Vidro.

Amostra	Esfericidade (S_{50})	Circularidade (C_{50})	Redondeza (R_{50})	Compacidade (CO_{50})	Larg./Comp. (W/L_{50})
Esfera	0,982	0,982	0,917	0,952	0,977
Cubo	0,946	0,903	0,684	0,829	0,838
Octaedro	0,943	0,873	0,618	0,784	0,753
Dodecaedro	0,982	0,946	0,722	0,910	0,919
Icosaedro	0,980	0,946	0,770	0,876	0,873

Os poliedros com maior número de faces mostram curvas de forma próximas. O aumento do número de faces aproxima o sólido de uma esfera, o que justifica índices mais homogêneos.

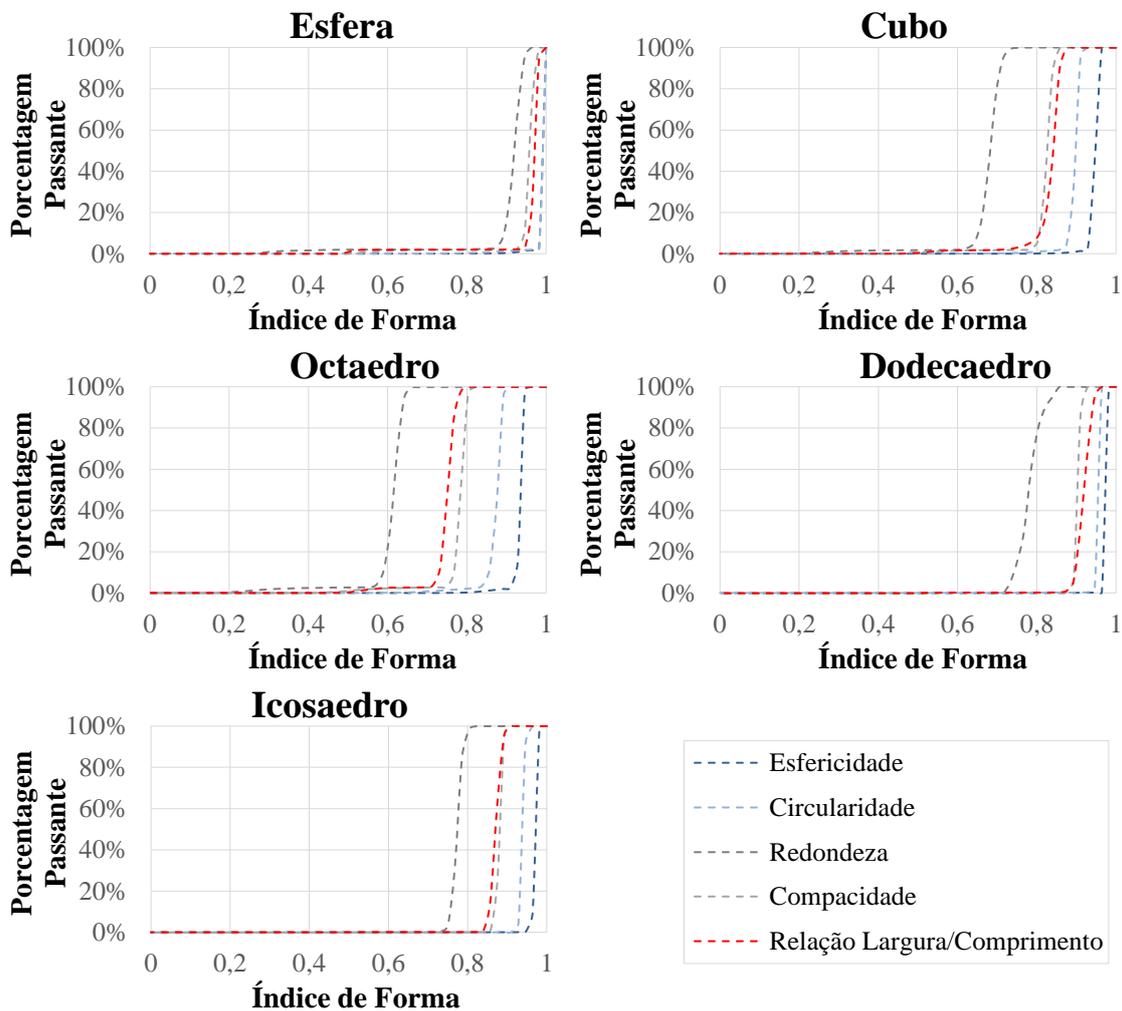


Figura 4.15. Curvas dos parâmetros de Forma, para sólidos platônicos.

Os índices de textura para os sólidos foram iguais em todas as amostras (ver Figura 4.16 e Tabela 4.18). Os resultados foram condizentes aos esperados por se tratarem de um material fabricado com o mesmo tipo de plástico.

Tabela 4.18. Índice de Forma extraídos das análises de imagens dos Sólidos Platônicos.

Amostra	Convexidade (V_{50})	Solidez (L_{50})	Concavidade (O_{50})
Esfera	0,982	0,982	0,016
Cubo	0,982	0,982	0,016
Octaedro	0,982	0,982	0,017
Dodecaedro	0,982	0,982	0,016
Icosaedro	0,982	0,982	0,016

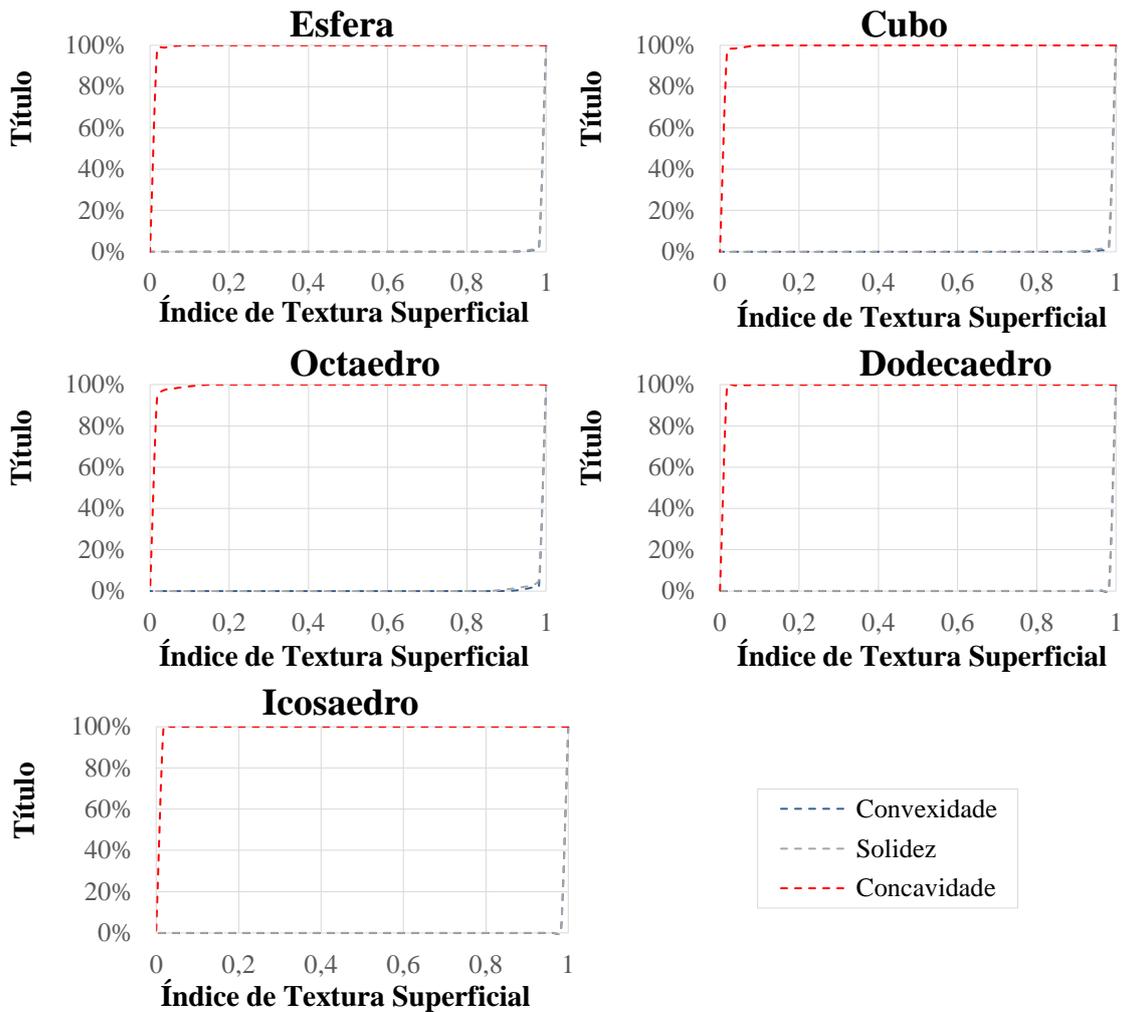


Figura 4.16. Curvas dos parâmetros de Textura Superficial, para sólidos platônicos.

4.4 ENSAIO DE ÂNGULO DE REPOUSO

Os resultados dos ensaios de repouso têm seus resultados exibidos abaixo, por tipo de material. As amostras formaram 30 cones, conforme relatado na metodologia, além de medir a inclinação das pilhas cônicas também foram pesadas as massas de cada uma das determinações.

4.4.1 Esferas de Vidro

Para as microesferas, a Figura 4.17 apresenta os histogramas de cada amostra ensaiada e a curva de distribuição normal, se nota com a imagem que o ângulo de maior frequência nem sempre é próximo da média. A Tabela 4.19 apresenta um resumo dos resultados de cada amostra, evidenciando, em conjunto com os gráficos, uma dispersão dos resultados devido ao equipamento manual.

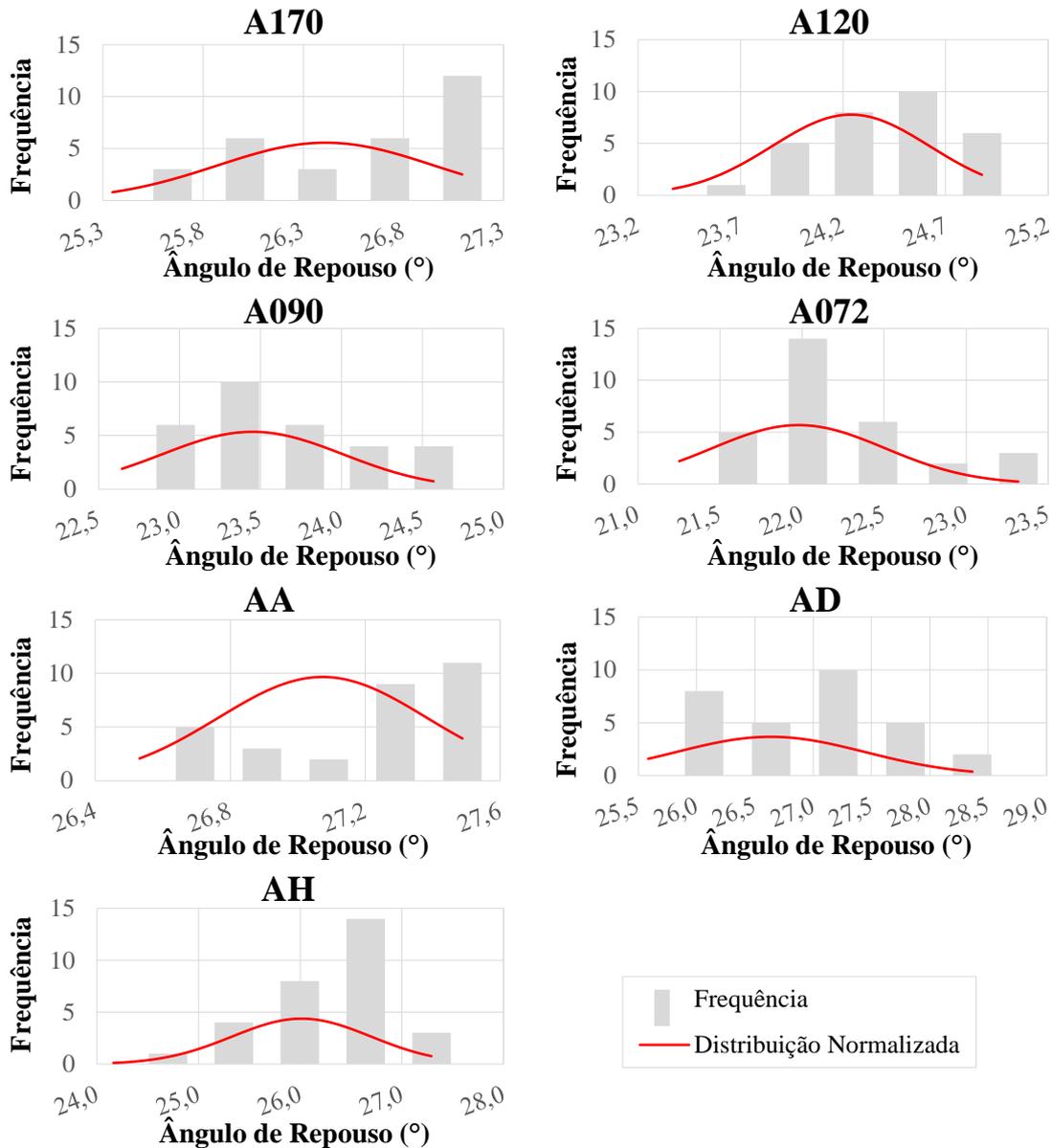


Figura 4.17. Apresentação dos resultados do ensaio de Ângulo de Repouso para Esferas.

Tabela 4.19. Dados retirados do ensaio de Ângulo de Repouso.

Amostra	ϕ_{Rf} (°)	ϕ_{Rm} (°)	$\phi_{Rmín}$ (°)	$\phi_{Rmáx}$ (°)	σ_p
A170	27,10	26,41	25,29	27,09	0,540
A120	24,60	24,24	23,32	24,88	0,385
A090	23,50	23,45	22,58	24,57	0,560
A072	22,10	21,98	21,18	23,32	0,528
AA	27,50	27,07	26,50	27,49	0,309
AD	27,30	26,64	25,49	28,36	0,811
AH	26,60	26,01	24,05	27,29	0,684

Além das determinações dos ângulos, gerados pelas pilhas de material, convencionou-se a medir a massa do material e calcular a densidade, índice de vazios e a compactidade relativa de cada amostra para validar os resultados (ver as Figura 4.18, Figura 4.19e Figura 4.20).

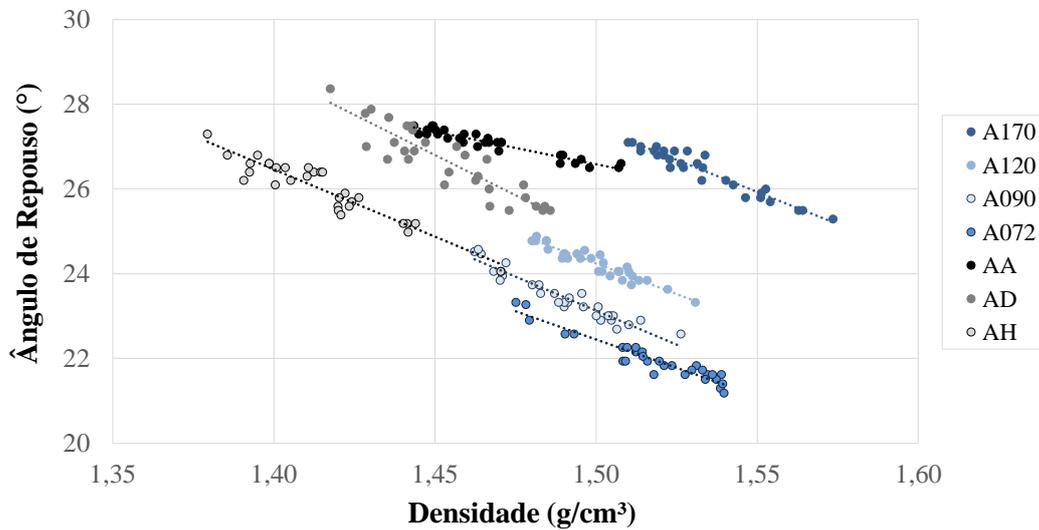


Figura 4.18. Relação da densidade com o Ângulo de Repouso, em Esferas de Vidro.

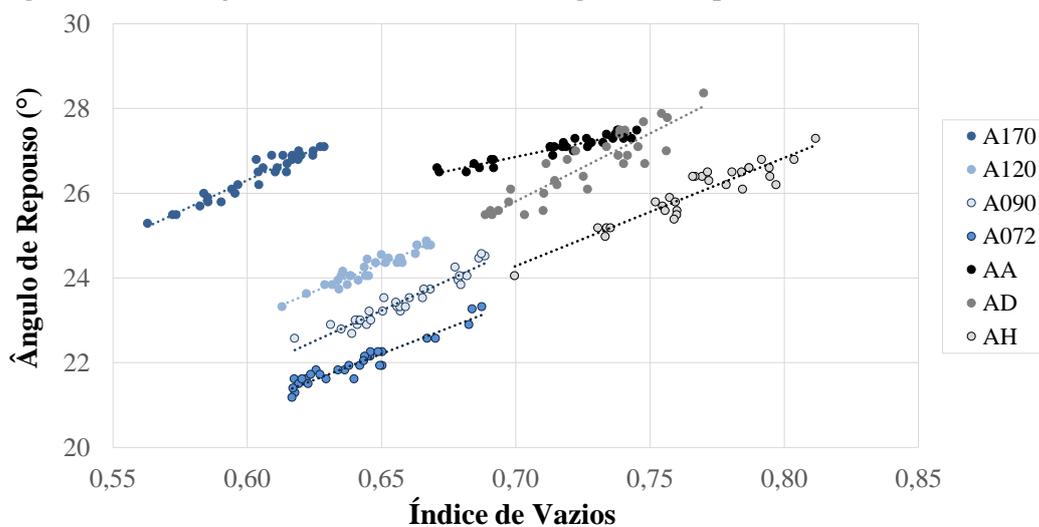


Figura 4.19. Relação do Índice de vazios com o Ângulo de Repouso, em Esferas de Vidro.

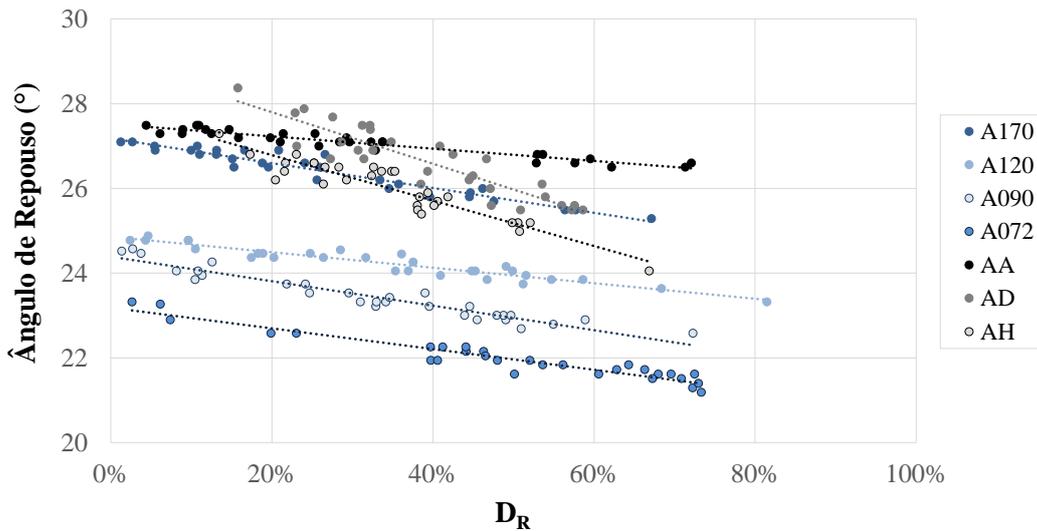


Figura 4.20. Relação da compactação amostral com o Ângulo de Repouso, em Esferas.

A Tabela 4.20 mostra as equações das funções geradas pela densidade, índice de vazios e densidade relativa, respectivamente, bem como os coeficientes de determinação.

Tabela 4.20. Índice de Forma extraídos das análises de imagens das Esferas de Vidro.

Amostra	Correlação do ϕ_R com a densidade	Correlação do ϕ_R com o índice de vazios	Correlação do ϕ_R com a D_R
A170	$y = -30,32x + 72,92$ $R^2 = 0,93$	$y = 29,35x + 8,69$ $R^2 = 0,93$	$y = -2,94x + 27,18$ $R^2 = 0,93$
A120	$y = -28,66x + 67,23$ $R^2 = 0,91$	$y = 26,17x + 7,32$ $R^2 = 0,91$	$y = -1,83x + 24,86$ $R^2 = 0,91$
A090	$y = -32,07x + 71,24$ $R^2 = 0,92$	$y = 28,87x + 4,46$ $R^2 = 0,92$	$y = -2,89x + 24,39$ $R^2 = 0,92$
A072	$y = -26,69x + 62,48$ $R^2 = 0,92$	$y = 24,47x + 6,30$ $R^2 = 0,92$	$y = -2,45x + 23,19$ $R^2 = 0,92$
AA	$y = -15,25x + 49,46$ $R^2 = 0,91$	$y = 13,16x + 17,65$ $R^2 = 0,91$	$y = -1,45x + 27,52$ $R^2 = 0,91$
AD	$y = -37,94x + 81,82$ $R^2 = 0,81$	$y = 32,02x + 3,40$ $R^2 = 0,81$	$y = -6,08x + 29,09$ $R^2 = 0,81$
AH	$y = -31,70x + 70,83$ $R^2 = 0,87$	$y = 25,53x + 6,41$ $R^2 = 0,87$	$y = -5,36x + 27,86$ $R^2 = 0,87$

4.4.2 Areias Padrão

As areias também foram submetidas as formações de pilhas cônicas para mensuração dos ângulos de formação. A Figura 4.21 apresenta as frequências e os ângulos encontrados, e a Tabela 4.21 os dados extraídos.

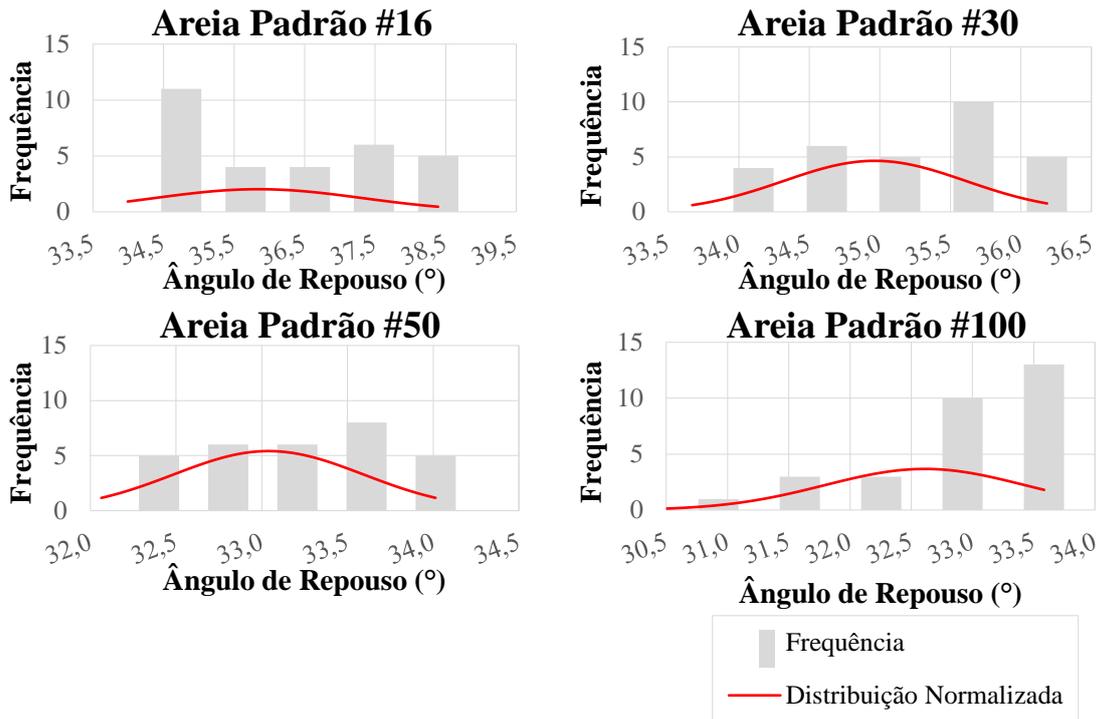


Figura 4.21. Relação da compactidade amostral com o Ângulo de Repouso, em Areias.

Tabela 4.21. Dados retirados do ensaio de Ângulo de Repouso.

Amostra	ϕ_{Rf} (°)	ϕ_{Rm} (°)	$\phi_{Rmín}$ (°)	$\phi_{Rmáx}$ (°)	σ_p
Areia Padrão #16	34,80	35,85	33,84	38,39	1,482
Areia Padrão #30	35,60	34,96	33,58	36,18	0,646
Areia Padrão #50	33,70	33,04	32,00	34,01	0,554
Areia Padrão #100	33,60	32,61	30,26	33,58	0,816

Abaixo são apresentadas as relações da densidade das amostras com o ângulo de repouso mostrados na Figura 4.22, dos espaços vazios na Figura 4.23 e de compactidade na Figura 4.24.

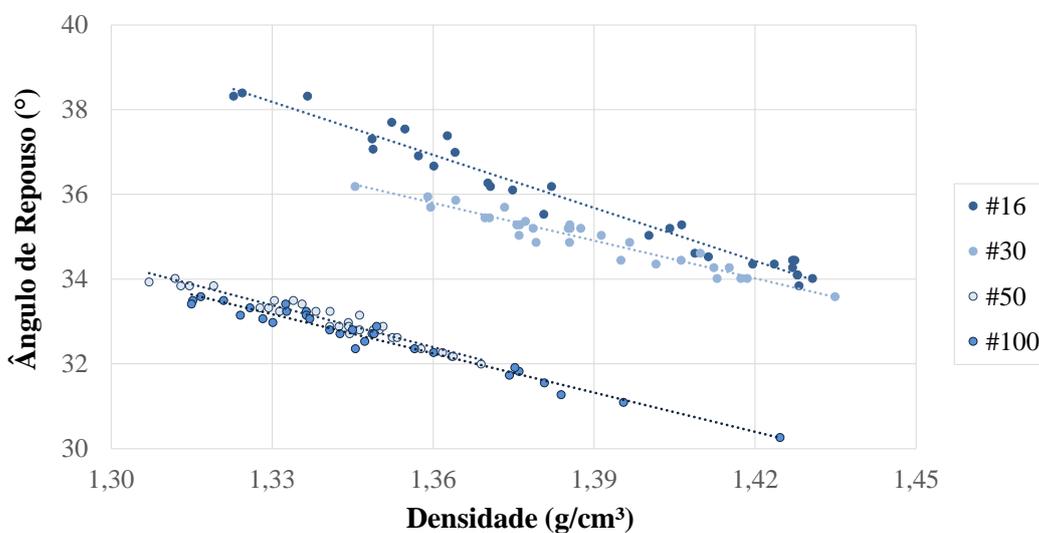


Figura 4.22. Relação da densidade com o Ângulo de Repouso, em Areias.

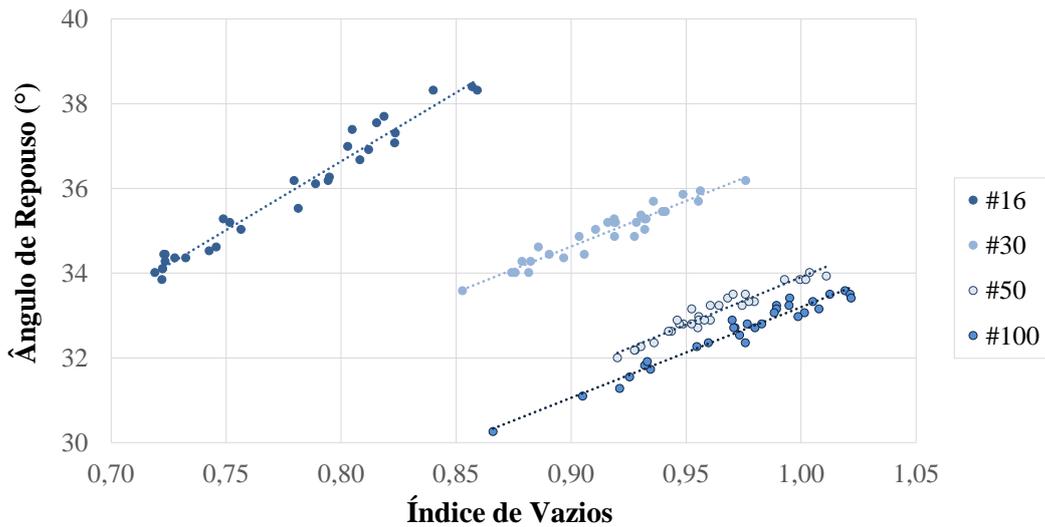


Figura 4.23. Relação do Índice de vazios com o Ângulo de Repouso, em Areias.

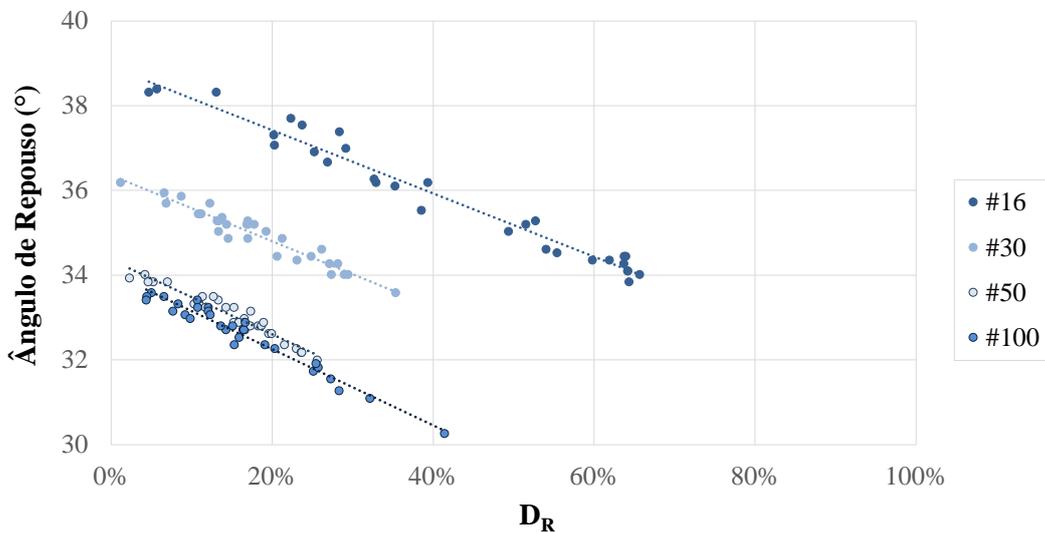


Figura 4.24. Relação da compactação amostral com o Ângulo de Repouso, em Areias.

A Tabela 4.22 mostra as funções de densidade, índice de vazios e densidade relativa em relação ao ângulo de repouso.

Tabela 4.22. Índice de Forma extraídos das análises de imagens das Areias.

Amostra	Correlação do ϕ_R com a densidade	Correlação do ϕ_R com o índice de vazios	Correlação do ϕ_R com a D_R
Areia Padrão #16	$y = -41,74x + 93,70$ $R^2 = 0,97$	$y = 32,44x + 10,69$ $R^2 = 0,97$	$y = -7,46x + 38,91$ $R^2 = 0,97$
Areia Padrão #30	$y = -29,70x + 76,19$ $R^2 = 0,92$	$y = 21,58x + 15,21$ $R^2 = 0,92$	$y = -7,77x + 36,36$ $R^2 = 0,92$
Areia Padrão #50	$y = -33,01x + 77,29$ $R^2 = 0,94$	$y = 22,43x + 11,48$ $R^2 = 0,94$	$y = -8,75x + 34,36$ $R^2 = 0,94$
Areia Padrão #100	$y = -30,79x + 74,12$ $R^2 = 0,96$	$y = 21,41x + 11,79$ $R^2 = 0,96$	$y = -8,99x + 34,05$ $R^2 = 0,96$

4.4.3 Sólidos Platônicos

A Tabela 4.23 apresenta os resultados, simplificados, dos ensaios de ângulo de repouso dos sólidos e a Figura 4.25 os diagramas de frequência dos ângulos encontrados para cada amostra.

Tabela 4.23. Dados retirados do ensaio de Ângulo de Repouso.

Amostra	ϕ_{Rf} (°)	ϕ_{Rm} (°)	$\phi_{Rmín}$ (°)	$\phi_{Rmáx}$ (°)	σ_p
Esfera	30,60	30,02	26,40	31,85	1,252
Cubo	33,30	31,73	29,91	33,19	1,030
Octaedro	34,90	35,01	31,58	39,52	2,451
Dodecaedro	37,50	36,42	31,71	38,90	1,445
Icosaedro	35,40	34,31	31,85	36,30	1,051

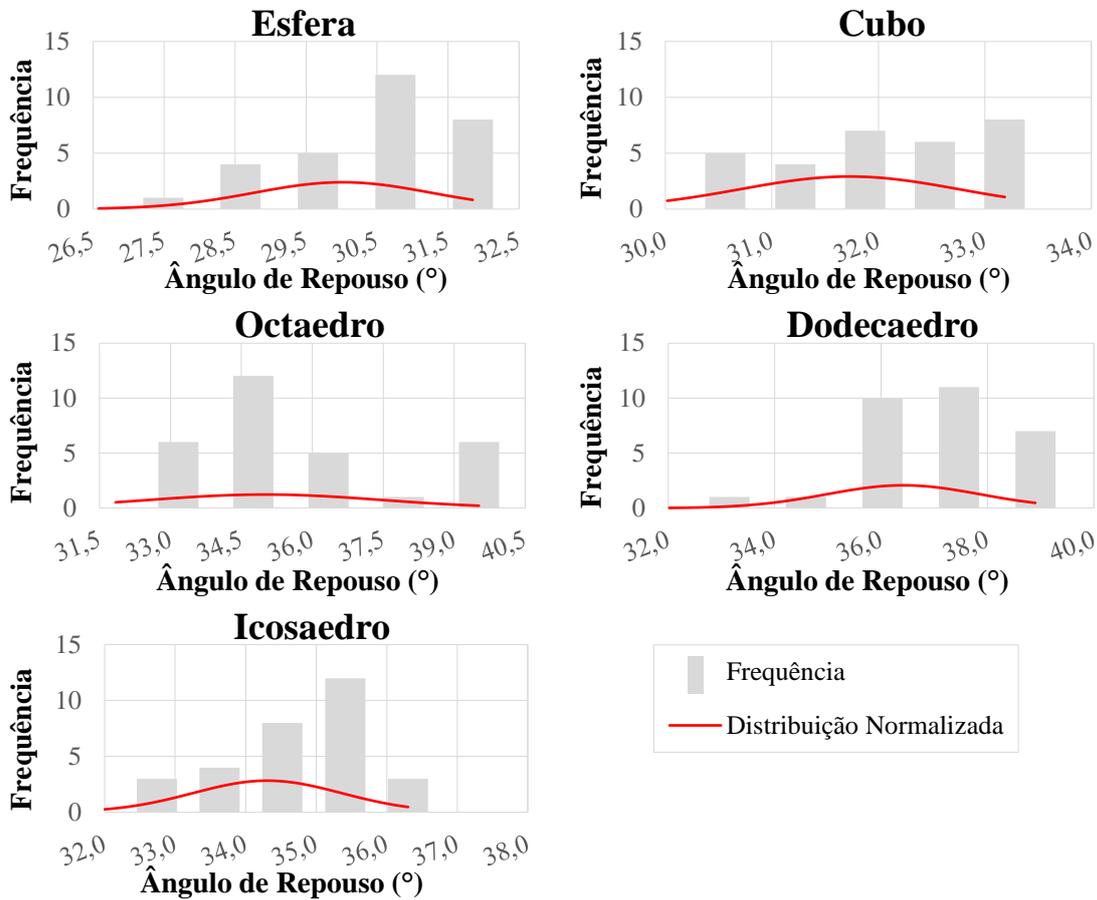


Figura 4.25. Relação da compacidade amostral com o Ângulo de Repouso, em Sólidos Platônicos.

As Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28 apresentam as relações do ângulo de repouso com a densidade, índice de vazios e a compacidade relativa de cada amostra e Tabela 4.24 apresenta as equações que relacionam cada parâmetro.

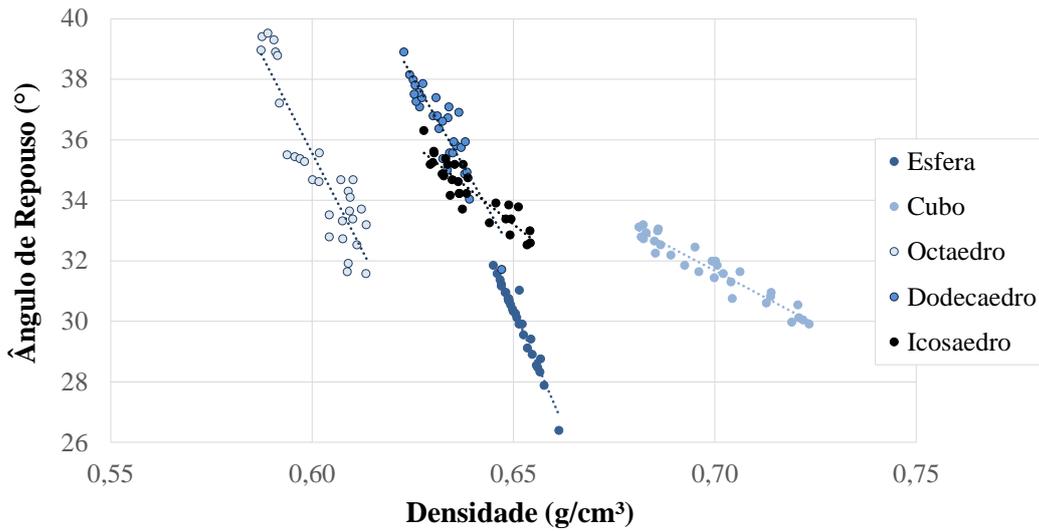


Figura 4.26. Relação da densidade com o Ângulo de Repouso, em Poliedros.

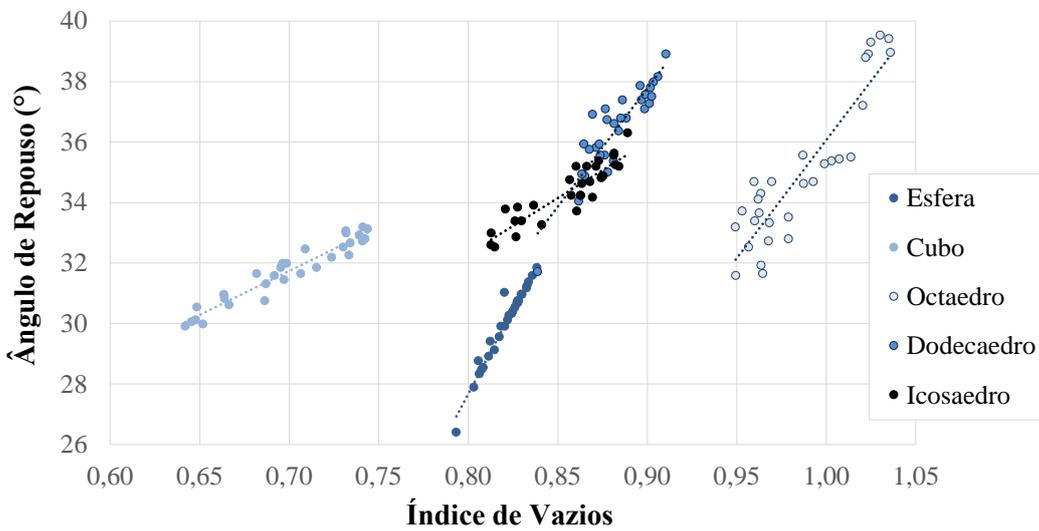


Figura 4.27. Relação do Índice de vazios com o Ângulo de Repouso, em Poliedros.

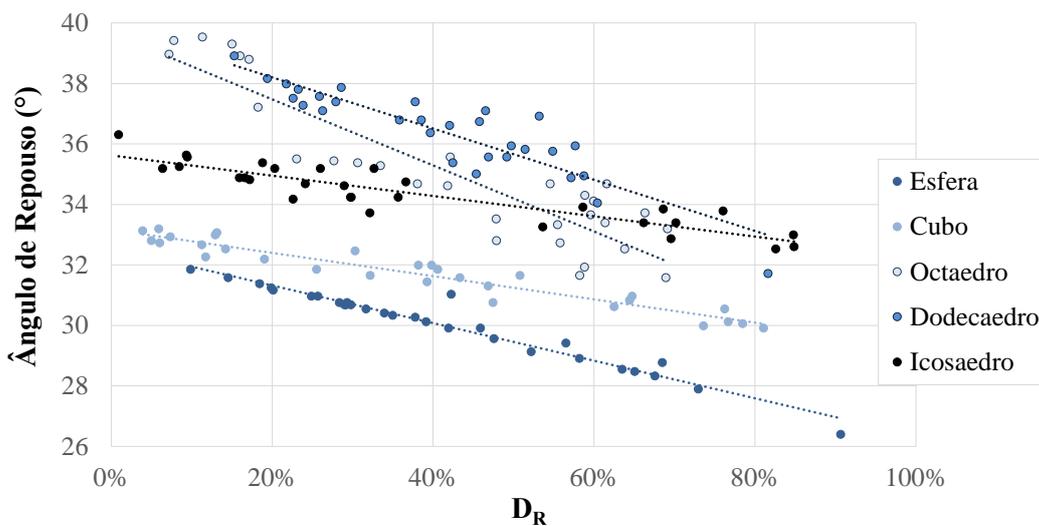


Figura 4.28. Relação da compacidade amostral com o Ângulo de Repouso, em Poliedros.

Tabela 4.24. Índice de Forma extraídos das análises de imagens dos Poliedros.

Amostra	Correlação do ϕ_R com a densidade	Correlação do ϕ_R com o índice de vazios	Correlação do ϕ_R com a D_R
Esfera	$y = -309,94x + 231,86$ $R^2 = 0,96$	$y = 111,19x - 61,27$ $R^2 = 0,96$	$y = -6,23x + 32,57$ $R^2 = 0,96$
Cubo	$y = -70,58x + 81,08$ $R^2 = 0,92$	$y = 29,19x + 11,31$ $R^2 = 0,92$	$y = -3,85x + 33,17$ $R^2 = 0,92$
Octaedro	$y = -258,27x + 190,52$ $R^2 = 0,82$	$y = 78,05x - 41,97$ $R^2 = 0,82$	$y = -10,93x + 39,66$ $R^2 = 0,82$
Dodecaedro	$y = -233,20x + 183,81$ $R^2 = 0,81$	$y = 78,37x - 32,75$ $R^2 = 0,81$	$y = -8,46x + 39,89$ $R^2 = 0,81$
Icosaedro	$y = -106,11x + 102,18$ $R^2 = 0,82$	$y = 36,85x + 2,83$ $R^2 = 0,82$	$y = -3,35x + 35,62$ $R^2 = 0,82$

4.5 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Os ensaios de cisalhamento direto seguiram as premissas tratadas no capítulo de metodologia, onde amostras em estado natural foram moldadas, consolidadas e cisalhadas.

4.5.1 Esferas de Vidro

Os ensaios de Cisalhamento Direto nas esferas forneceram o ângulo de atrito de pico e o ângulo de atrito residual (ver Figura 4.29 e Figura 4.30), o primeiro determinado pelas tensões cisalhantes máximas aplicadas durante o deslocamento horizontal, já o segundo foi determinado pelas tensões cisalhantes aplicadas quando a variação volumétrica das amostras passara a ser constante.

As amostras foram cisalhadas até atingir 10 mm de deslocamento horizontal e foi possível verificar as estabilizações de deformação volumétrica a partir de 7 mm, variando para cada fração, mas em suma o ângulo de atrito residual foi determinado com base nas tensões cisalhantes para deslocamento horizontal acima de 7 mm.

A Tabela 4.25 mostra os valores de D_R de cada corpo de prova usado na envoltória de resistência, nota-se que foi respeitada a premissa de mantê-los entre 45% e 55% de compacidade relativa.

Tabela 4.25. Densidade relativa de cada corpo de prova.

Amostra	40 kPa	80 kPa	160 kPa	320 kPa
A170	50,44%	49,42%	52,46%	53,47%
A120	54,33%	51,23%	52,78%	49,68%
A090	51,51%	50,41%	49,32%	48,22%
A072	49,32%	48,22%	52,60%	50,41%
AA	51,10%	52,16%	52,16%	50,04%
AD	50,34%	53,44%	52,20%	48,47%
AH	48,53%	50,29%	51,45%	52,03%

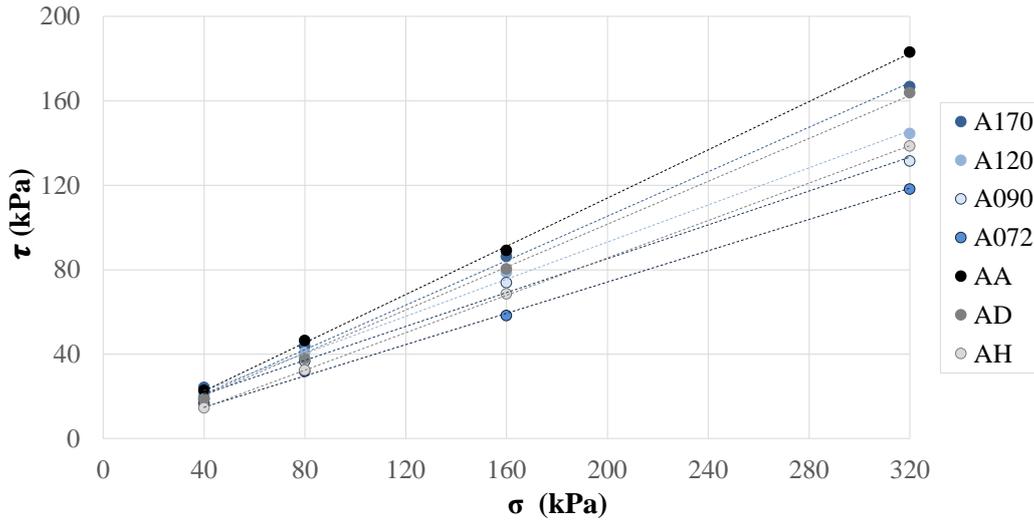


Figura 4.29. Envoltórias de resistência máxima (pico) das Esferas de Vidro.

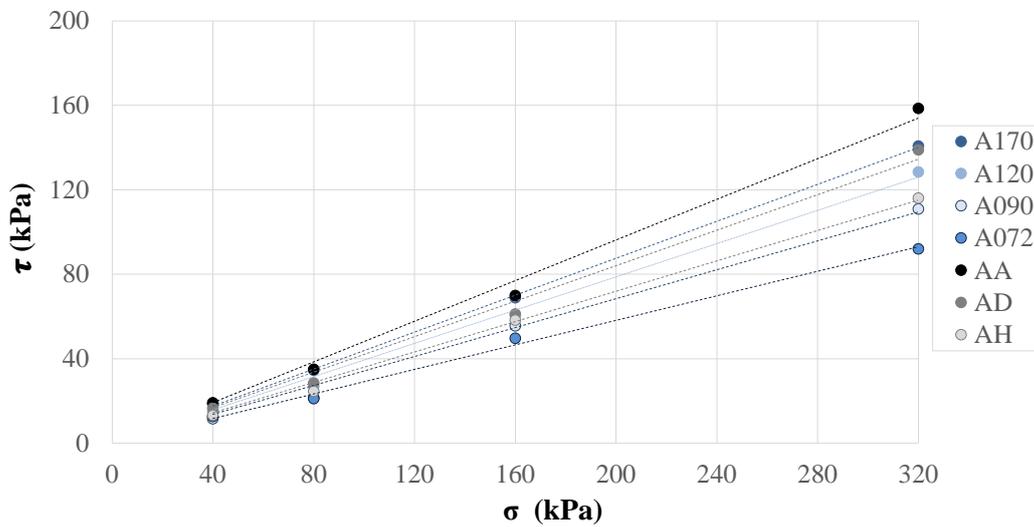


Figura 4.30. Envoltórias de resistência residual das Esferas de Vidro.

A Tabela 4.26 apresenta os ângulos de atrito tanto no estado crítico quanto no estado residual das amostras e suas respectivas envoltórias. A confiabilidade da linha de tendência foi a 0,9900 em todas as amostras analisadas garantindo uma boa execução dos ensaios e dos resultados.

Tabela 4.26. Resultados do ensaio de Cisalhamento Direto.

Amostra	$\phi_{\text{pico}} (^{\circ})$	$\phi_{\text{residual}} (^{\circ})$	Equação da Envoltória de Pico- R^2	Equação da Envoltória Residual- R^2
A170	27,78	23,64	$y=0,527x$ $R^2=0,99$	$y=0,438x$ $R^2=0,99$
A120	24,84	21,49	$y=0,463x$ $R^2=0,99$	$y=0,394x$ $R^2=0,99$
A090	22,94	18,90	$y=0,423x$ $R^2=0,99$	$y=0,342x$ $R^2=0,99$
A072	20,33	16,22	$y=0,371x$ $R^2=0,99$	$y=0,291x$ $R^2=0,99$
AA	29,68	25,71	$y=0,570x$ $R^2=0,99$	$y=0,482x$ $R^2=0,99$
AD	26,94	22,79	$y=0,508x$ $R^2=0,99$	$y=0,420x$ $R^2=0,99$

Amostra	$\phi_{\text{pico}} (^{\circ})$	$\phi_{\text{residual}} (^{\circ})$	Equação da Envoltória de Pico- R^2	Equação da Envoltória Residual- R^2
AH	23,27	19,79	$y=0,430x$ $R^2=0,99$	$y=0,360x$ $R^2=0,99$

4.5.2 Areias Padrão

As envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico e residual encontram-se plotadas nas Figura 4.31 e Figura 4.32, abaixo. As amostras cisalhadas tiveram estabilização de suas deformações volumétricas a partir de 8 mm, determinando os ângulos de atrito residual a partir desse ponto.

A Tabela 4.27 apresenta os controles de densidade de cada amostra cisalhada.

Tabela 4.27. Densidade relativa de cada corpo de prova.

Amostra	40 kPa	80 kPa	160 kPa	320 kPa
Areia Padrão #16	53,65%	48,57%	52,13%	52,13%
Areia Padrão #30	51,03%	50,69%	47,29%	52,04%
Areia Padrão #50	53,11%	50,53%	49,56%	49,88%
Areia Padrão #100	49,18%	52,17%	51,57%	51,27%

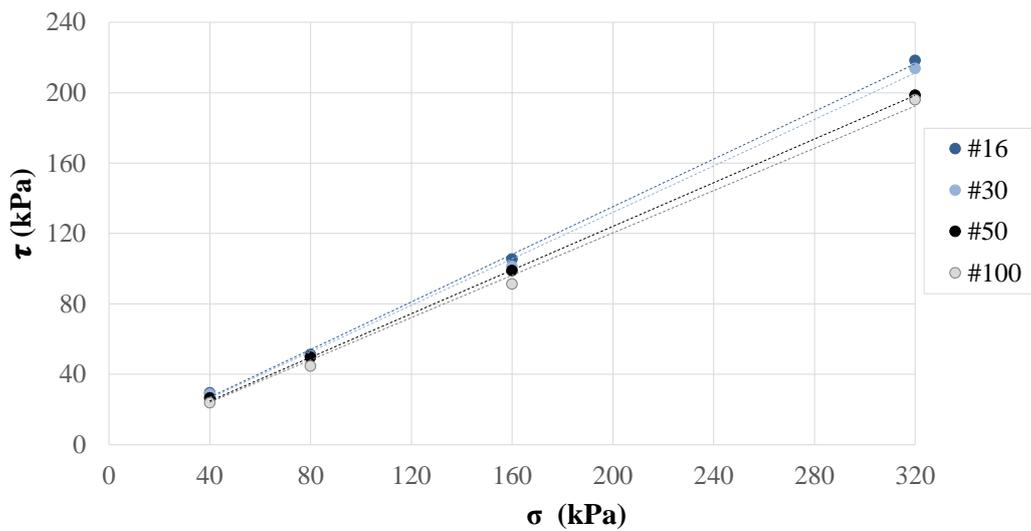


Figura 4.31. Envoltórias de resistência máxima (pico) das Areias.

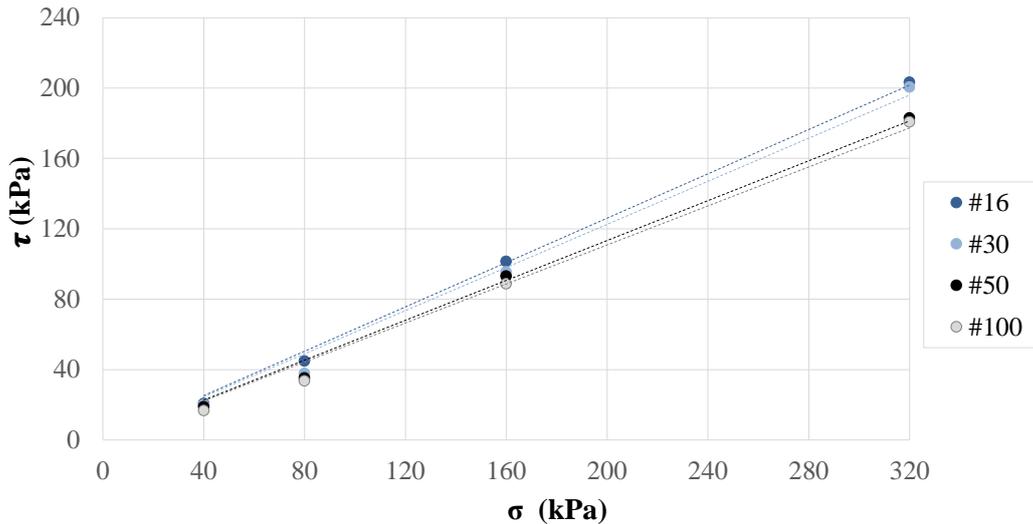


Figura 4.32. Envoltórias de resistência residual das Areias.

Os resultados dos ângulos de atrito máximo e no estado residual encontram-se na Tabela 4.28. Também foram elencadas as funções de cada envoltória e sua confiabilidade, de acordo com os ensaios.

Tabela 4.28. Resultados do ensaio de Cisalhamento Direto.

Amostra	$\phi_{\text{pico}} (^{\circ})$	$\phi_{\text{residual}} (^{\circ})$	Equação da Envoltória de Pico- R^2		Equação da Envoltória Residual- R^2	
Areia Padrão #16	34,08	32,21	$y=0,677x$	$R^2=0,99$	$y=0,630x$	$R^2=0,99$
Areia Padrão #30	33,42	31,49	$y=0,660x$	$R^2=0,99$	$y=0,613x$	$R^2=0,99$
Areia Padrão #50	31,81	29,53	$y=0,620x$	$R^2=0,99$	$y=0,567x$	$R^2=0,99$
Areia Padrão #100	31,02	28,99	$y=0,601x$	$R^2=0,99$	$y=0,554x$	$R^2=0,99$

4.5.3 Sólidos Platônicos

As amostras de sólidos platônicos tiveram suas densidades controladas, conforme apresentado na Tabela 4.29. As envoltórias de ruptura são apresentadas nas Figura 4.33 e Figura 4.34. Nesse caso as amostras tiveram a estabilização de suas deformações volumétricas a partir de 8 mm, ponto no qual foram determinados os ângulos de atrito no estado residual.

Tabela 4.29. Densidade relativa de cada corpo de prova.

Amostra	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
Esfera	47,43%	53,88%	50,91%	52,40%
Cubo	48,18%	51,25%	53,77%	49,45%
Octaedro	50,75%	48,41%	53,77%	49,11%
Dodecaedro	51,72%	50,63%	51,44%	48,99%
Icosaedro	49,45%	48,35%	49,45%	50,55%

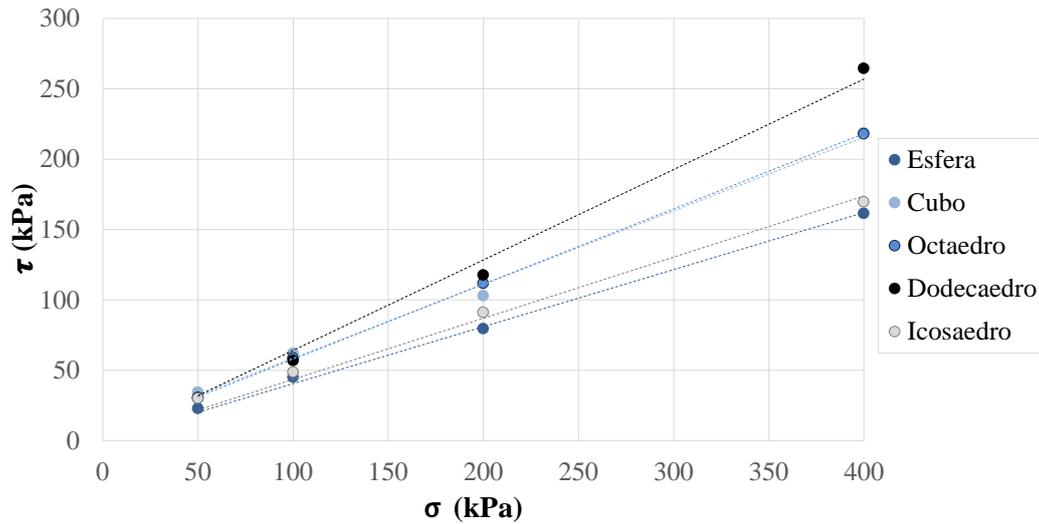


Figura 4.33. Envoltórias de resistência máxima (pico) dos Sólidos Platônicos.

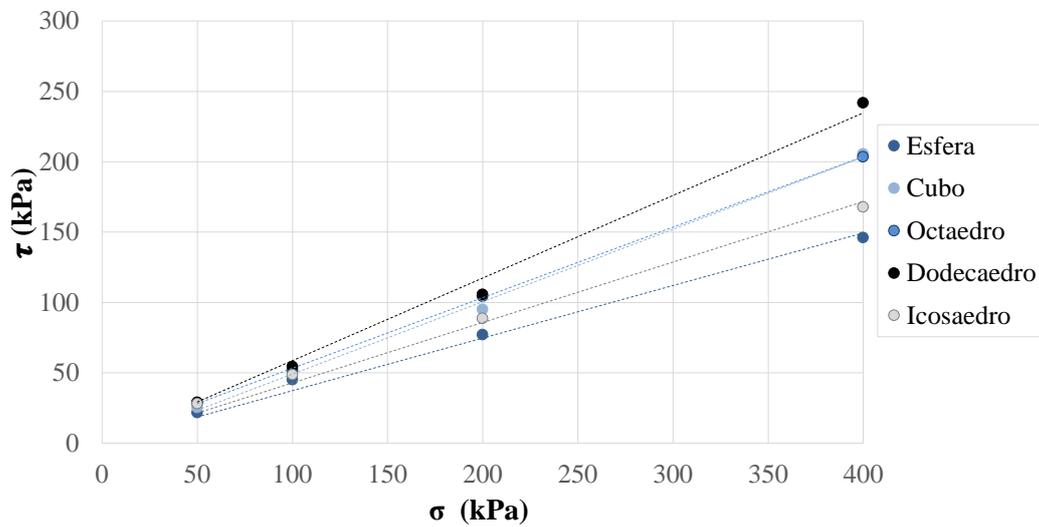


Figura 4.34. Envoltórias de resistência residual dos Sólidos Platônicos.

A Tabela 4.30 apresenta os principais parâmetros retirados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras de sólidos platônicos.

Tabela 4.30. Resultados do ensaio de Cisalhamento Direto.

Amostra	$\phi_{\text{pico}} (^{\circ})$	$\phi_{\text{residual}} (^{\circ})$	Equação da Envoltória de Pico- R^2	Equação da Envoltória Residual- R^2
Esfera	22,05	20,48	$y=0,405x$ $R^2=0,99$	$y=0,374x$ $R^2=0,99$
Cubo	28,62	26,84	$y=0,545x$ $R^2=0,99$	$y=0,506x$ $R^2=0,99$
Octaedro	28,80	27,11	$y=0,550x$ $R^2=0,99$	$y=0,512x$ $R^2=0,99$
Dodecaedro	32,70	30,40	$y=0,642x$ $R^2=0,99$	$y=0,587x$ $R^2=0,99$
Icosaedro	23,50	23,21	$y=0,435x$ $R^2=0,99$	$y=0,429x$ $R^2=0,99$

4.6 ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

Os ensaios de compressão triaxial realizados nas várias amostras foram do tipo consolidado, drenado e com as amostras saturadas para eliminar os efeitos da sucção.

4.6.1 Esferas de Vidro

Os corpos de prova moldados, seguiram as diretrizes apresentadas na metodologia, e na Tabela 4.31 são apresentados os controles de densidade relativa de cada amostra.

Tabela 4.31. Densidade relativa de cada CP moldado para o ensaio de Compressão Triaxial.

Amostra	40 kPa	80 kPa	160 kPa	320 kPa	640 kPa
A170	46,37%	50,44%	47,39%	51,45%	52,46%
A120	47,99%	51,09%	51,09%	54,17%	51,09%
A090	52,51%	47,06%	48,15%	48,15%	49,25%
A072	49,10%	50,18%	50,18%	51,26%	52,34%
AA	53,92%	54,95%	51,86%	50,82%	49,79%
AD	52,04%	51,43%	51,43%	50,82%	50,21%
AH	49,73%	50,88%	50,31%	51,45%	49,73%

A Tabela 4.32 apresenta os parâmetros, de atrito, extraídos dos ensaios e a Figura 4.35 apresenta as trajetórias de tensões e as envoltórias de ruptura para cada uma das microesferas, bem como os respectivos ângulos de atrito. Como se trata de materiais granulares a coesão foi nula em todas as amostras e as envoltórias traçadas obtiveram um bom coeficiente de determinação, com valores próximos a 1.

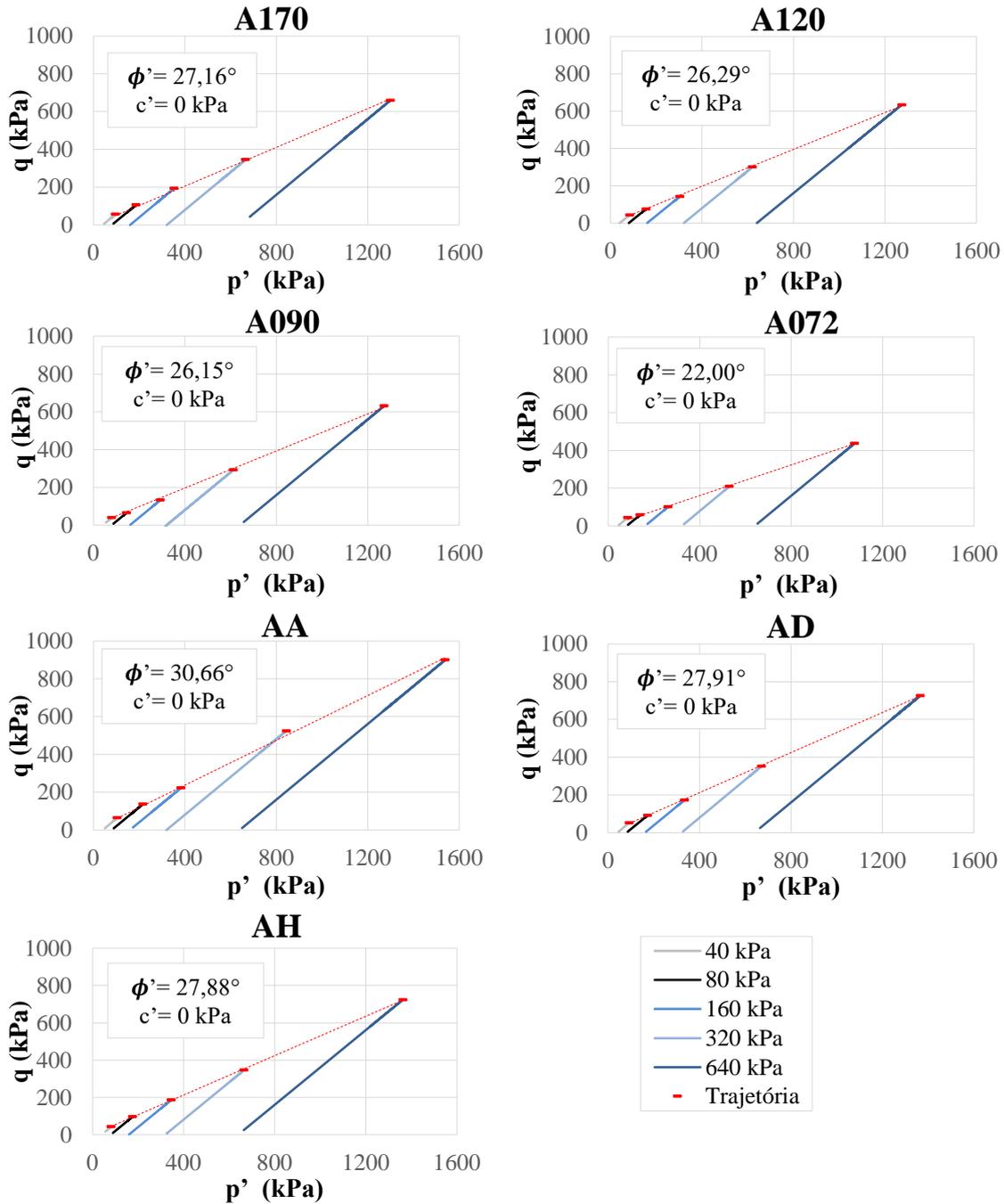


Figura 4.35. Representação do estado de tensões, das Esferas de Vidro, pelas trajetórias.

Tabela 4.32. Parâmetros extraídos do ensaio de Compressão Triaxial, das Esferas de Vidro.

Amostra	ϕ_{TX} (°)	c' (kPa)	Equação da Envoltória de Resistência- R^2	
A170	27,16	0,00	$y=0,513x$	$R^2=0,99$
A120	26,29	0,00	$y=0,494x$	$R^2=0,99$
A090	26,15	0,00	$y=0,491x$	$R^2=0,99$
A072	22,00	0,00	$y=0,404x$	$R^2=0,99$
AA	30,66	0,00	$y=0,593x$	$R^2=0,99$
AD	27,91	0,00	$y=0,530x$	$R^2=0,99$
AH	27,88	0,00	$y=0,529x$	$R^2=0,99$

4.6.2 Areias Padrão

Abaixo são apresentados os resultados dos ensaios de compressão triaxial, com as representações gráficas na Figura 4.36 e os controles de densidade das amostras moldadas na Tabela 4.33.

Tabela 4.33. Densidade relativa, de cada amostra de areia padrão, moldado.

Amostra	40 kPa	80 kPa	160 kPa	320 kPa	640 kPa
Areia Padrão #16	51,62%	50,10%	52,13%	53,65%	53,14%
Areia Padrão #30	53,71%	50,35%	49,68%	51,03%	52,04%
Areia Padrão #50	53,11%	50,86%	49,88%	50,53%	48,25%
Areia Padrão #100	48,87%	53,65%	49,18%	50,97%	53,94%

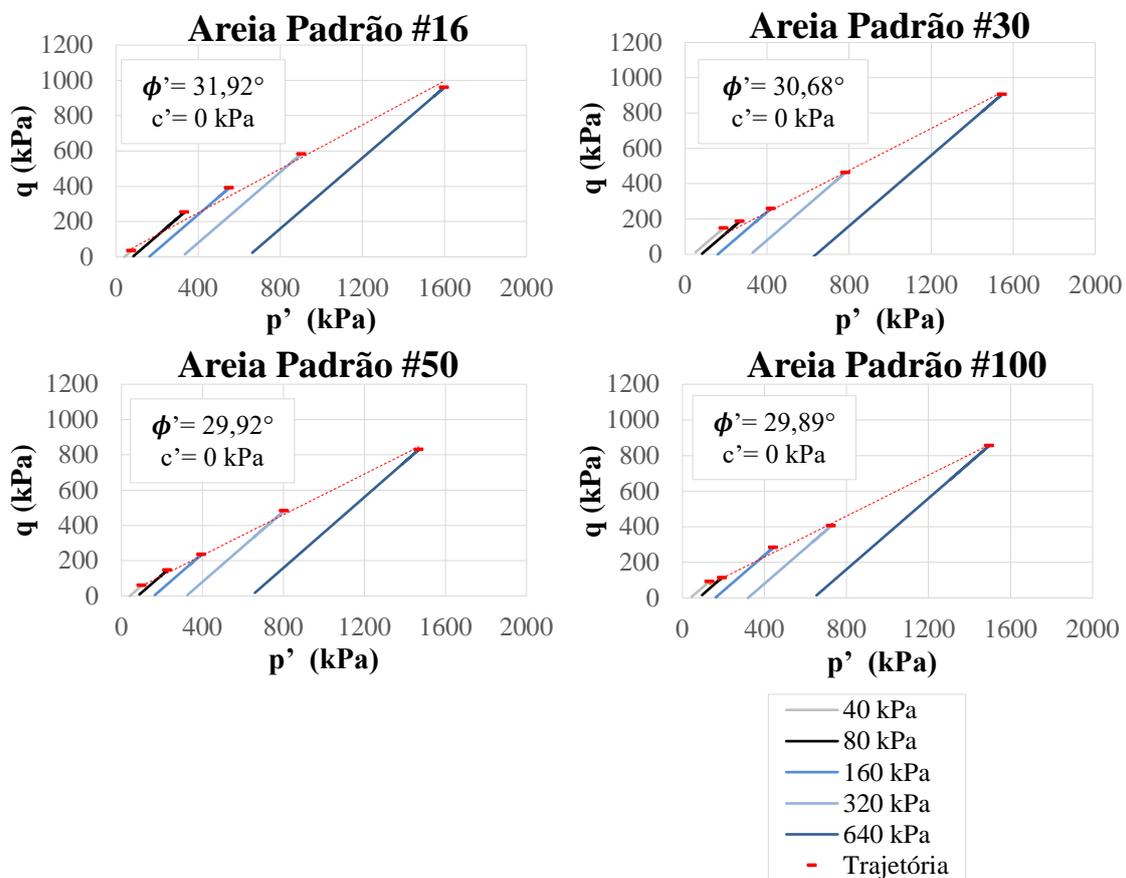


Figura 4.36. Representação do estado de tensões, das areias, pelas trajetórias.

A Tabela 4.34 apresenta os ângulos de atrito encontrados nos ensaios, bem como as equações das envoltórias e os coeficientes de determinação.

Tabela 4.34. Parâmetros extraídos do ensaio de Compressão Triaxial, das Esferas de Vidro.

Amostra	ϕ_{TX} (°)	c' (kPa)	Equação da Envoltória de Resistência- R ²	
Areia Padrão #16	31,92	0,00	y=0,623x	R ² =0,99
Areia Padrão #30	30,68	0,00	y=0,593x	R ² =0,99
Areia Padrão #50	29,92	0,00	y=0,575x	R ² =0,99
Areia Padrão #100	29,89	0,00	y=0,575x	R ² =0,99

4.6.3 Sólidos Platônicos

Assim como as demais amostras foram realizados os controles amostrais dos sólidos platônicos, garantindo que cada corpo de prova tivesse sua densidade relativa entre 45% a 55%. A Tabela 4.35 apresenta os valores de D_R para cada amostra.

Tabela 4.35. Densidade relativa, de cada corpo de prova, moldado.

Amostra	40 kPa	80 kPa	160 kPa	320 kPa	640 kPa
Esfera	54,87%	49,92%	49,92%	49,92%	54,87%
Cubo	48,54%	52,15%	53,95%	50,35%	52,15%
Octaedro	49,58%	47,24%	54,23%	49,58%	51,91%
Dodecaedro	46,52%	49,26%	51,99%	46,52%	49,26%
Icosaedro	49,45%	48,35%	49,45%	50,55%	51,65%

A Figura 4.37 traz as trajetórias de tensões de cada sólido platônico bem como suas envoltórias e na Tabela 4.36 os índices extraídos dos ensaios.

Tabela 4.36. Parâmetros extraídos do ensaio de Compressão Triaxial, das Esferas de Vidro.

Amostra	ϕ_{TX} (°)	c' (kPa)	Equação da Envoltória de Resistência- R ²	
Esfera	24,08	0,00	y=0,447x	R ² =0,99
Cubo	24,13	0,00	y=0,448x	R ² =0,99
Octaedro	24,65	0,00	y=0,459x	R ² =0,99
Dodecaedro	26,01	0,00	y=0,488x	R ² =0,99
Icosaedro	23,59	0,00	y=0,437x	R ² =0,99

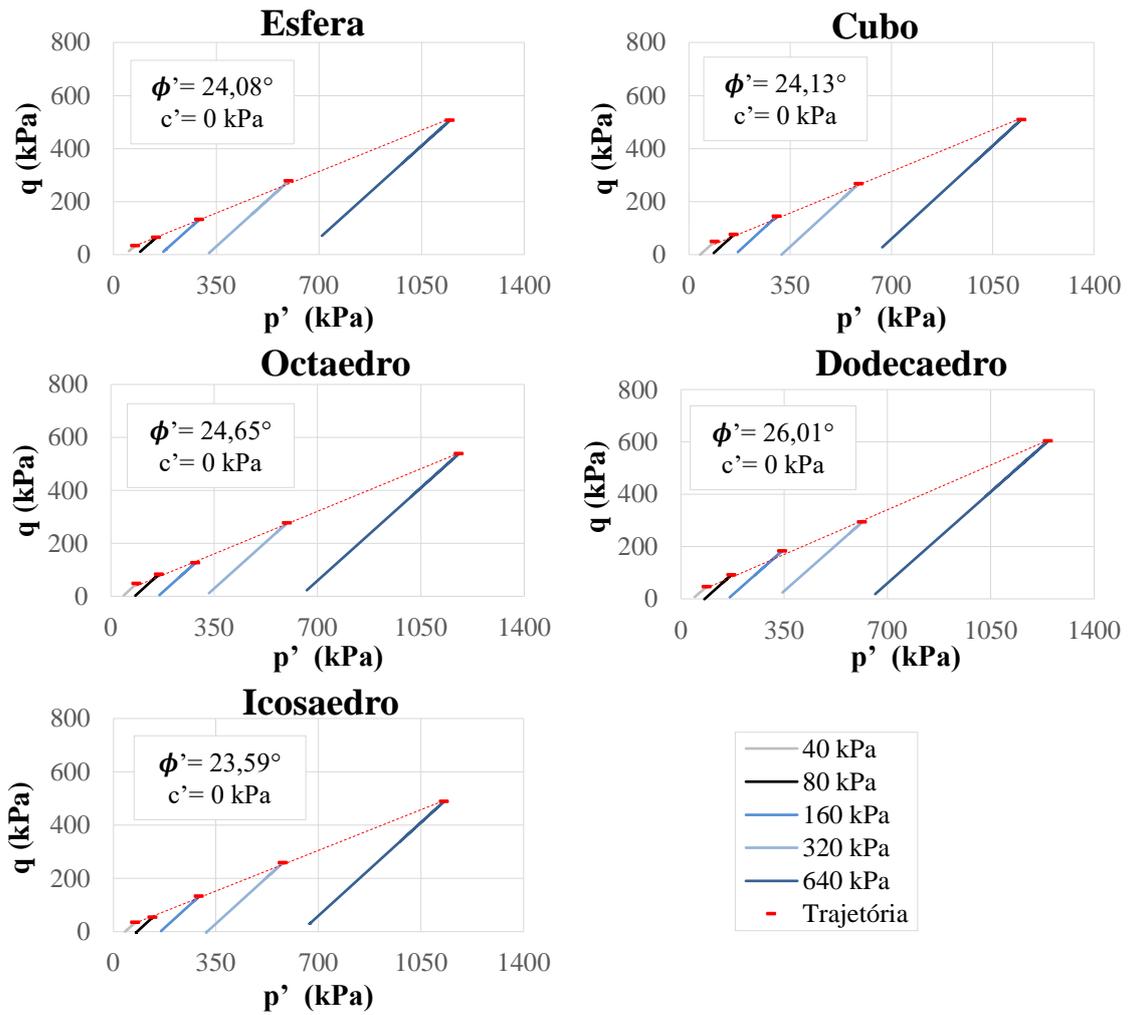


Figura 4.37. Representação do estado de tensões pelas trajetórias.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As análises dos resultados consistiram em encontrar uma função para cada tipo de ângulo ensaiado que melhor se relacione com os índices de forma e as propriedades de tamanho. Inicialmente com um parâmetro e por fim análises envolvendo duas características das amostras.

Por fim será realizada uma análise estatística determinado as melhores relações encontradas.

5.1 ANÁLISES DOS ÍNDICES DE TEXTURA NO COMPORTAMENTO GRANULAR

Os índices de textura superficial dizem respeito a constituição das partículas e o tipo de material que a compõe, porém não é uma característica que determina, por si só, as propriedades mecânicas dos grãos, conforme visto na Figura 5.1. Bem como a solidez, os outros índices de textura, concavidade e convexidade, tiveram a mesma tendência.

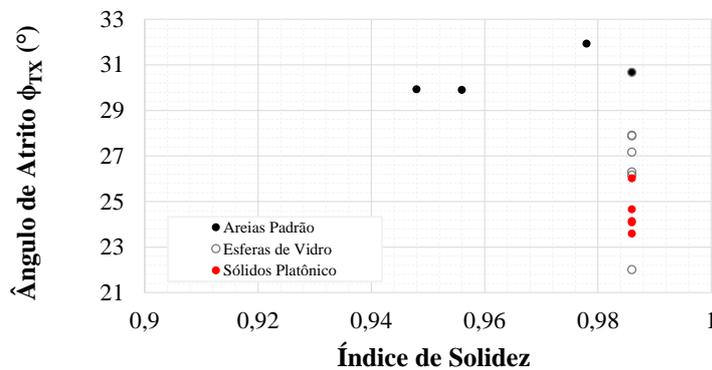


Figura 5.1. Análise da influência do Índice de Solidez no Ângulo de Atrito.

A Figura 5.2 mostra os índices que medem textura superficial, em todos eles os poliedros e as esferas são exatamente iguais, devido a superfície desses materiais serem lisas. Já as areias se divergem, uma vez que se trata de material natural que tem uma composição não controlada, consequentemente a superfícies são rugosas de forma distinta.

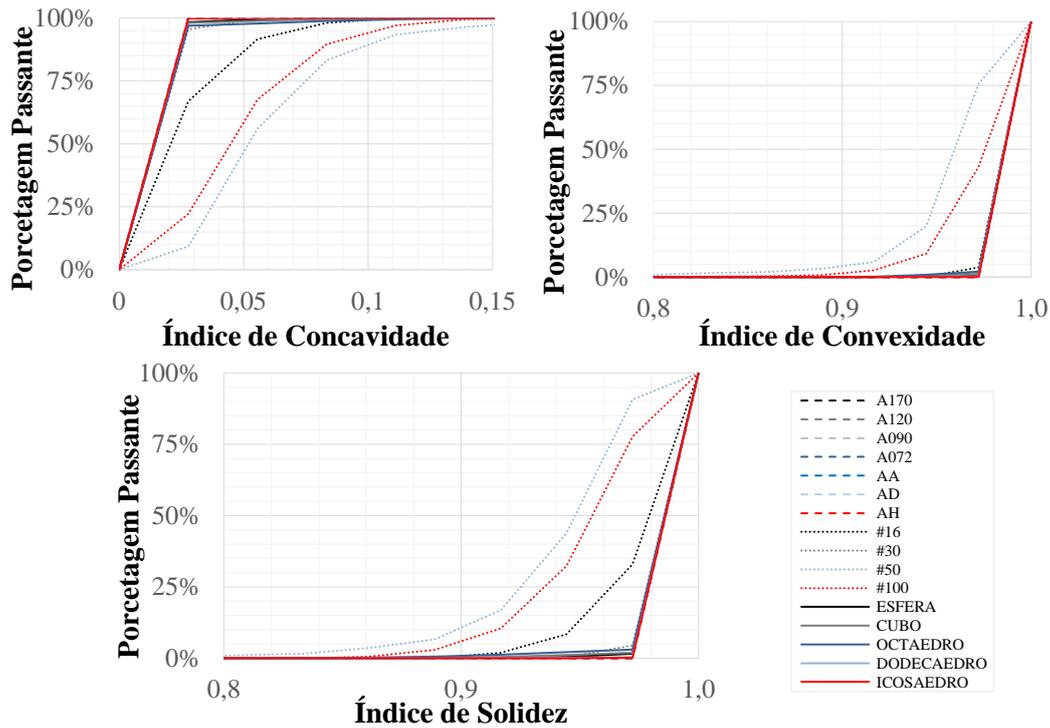


Figura 5.2. Comparativo entre os materiais dos índices de textura.

5.2 COMPARAÇÃO DO TAMANHO COM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A seguir serão realizadas as verificações de possíveis relações entre o tamanho médio das amostras com os ângulos de atrito e repouso. As esferas pouco divergem em forma portanto acredita-se que o principal fator de empacotamento seja suas propriedades granulométricas.

Já as areias são diferentes tanto em tamanho quanto em forma, e os platônicos tendem a possuir mesmo tamanho e diferentes parâmetros de forma. Os índices de curvatura e uniformidade não foram determinantes, uma vez que as amostras são uniformes e mal graduadas.

5.2.1 Esferas de Vidro

Analisando os resultados é necessário separar as amostras em dois grupos pelo D_{50} , o primeiro é composto por frações de tamanho similar a areia fina enquanto o segundo é composto por amostras que podem ser classificadas como areia média.

Em ambos os grupos há uma tendência de aumento do ângulo de repouso e do de atrito, com o diâmetro das amostras, com bons coeficientes de correlação, se comparadas a pesquisa de Rasti *et al.* (2021). Entretanto é importante procurar entender o que provoca a separação em dois grupos (materiais finos e médios).

A Figura 5.3 evidencia a relação focando em cada ensaio mecânico realizado. Caso não houvesse uma separação dos grupos, não seria possível correlacionar o tamanho médio das partículas com suas propriedades. Foi escolhido como parâmetro de tamanho, os resultados obtidos através do ensaio realizado no analisador de partículas por imagens.

Por ser tratar de partículas uniformes, o coeficiente de curvatura e o de uniformidade não apresentaram boas relações para as amostras em questão. A Tabela 5.1 mostra as relações encontradas.

Tabela 5.1. Relação do D_{50} das esferas, com os Ângulos.

Relação dos D_{50} com os Ângulos	Fração Média D_{50} (mm)	Fração Fina D_{50} (mm)
ϕ_R (°)	$y = 5,641x + 18,216$ $R^2 = 0,996$	$1,531x + 26,753$ $R^2 = 0,607$
ϕ_{PICO} (°)	$y = 8,257x + 15,030$ $R^2 = 0,968$	$y = 12,037x + 23,637$ $R^2 = 0,810$
$\phi_{RESIDUAL}$ (°)	$y = 8,254x + 11,123$ $R^2 = 0,924$	$y = 11,452x + 19,915$ $R^2 = 0,866$
ϕ_{TX} (°)	$y = 4,871x + 20,125$ $R^2 = 0,622$	$y = 6,566x + 27,184$ $R^2 = 0,979$

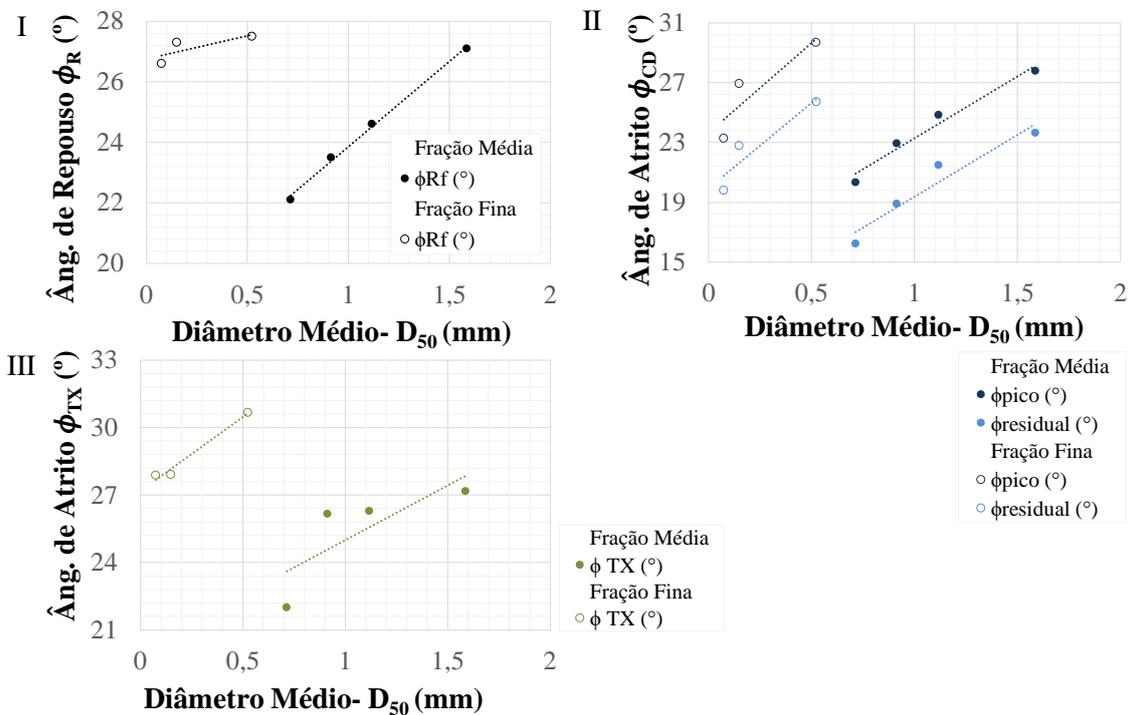


Figura 5.3. Efeito do D_{50} nos Ângulos; I) Repouso, II) Atrito de Pico e Residual no Cisalhamento Direto e III) Atrito no Triaxial.

5.2.2 Areias Padrão

As areias não precisaram ser divididas em grupos ou categorias. As quatro frações se correlacionaram de forma linear, em relação ao diâmetro médio, apresentado na Figura 5.4.

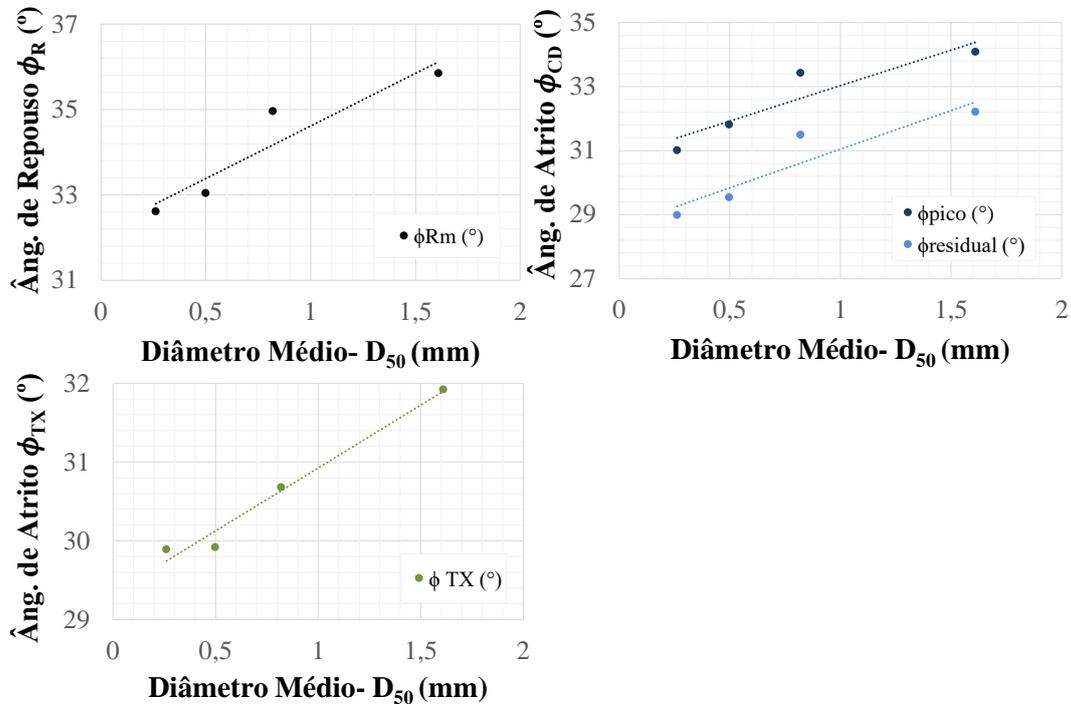


Figura 5.4. Efeito do tamanho nos ângulos de repouso e atrito das Areias Padrão.

As equações que relacionam o D_{50} aos ângulos de atrito e repouso possuem $R^2 > 0,85$, e são apresentadas na Tabela 5.2. Os dados usados nas análises de tamanho por ângulos de repouso e atrito foram os extraídos das análises de imagem.

Tabela 5.2. Relação do D_{50} das areias, com os Ângulos.

Relação dos D_{50} com os Ângulos	D_{50} (mm)
ϕ_R (°)	$y = 2,462x + 32,152$ $R^2 = 0,882$
ϕ_{PICO} (°)	$y = 2,218x + 30,813$ $R^2 = 0,855$
$\phi_{RESIDUAL}$ (°)	$y = 2,418x + 28,627$ $R^2 = 0,855$
ϕ_{TX} (°)	$y = 1,597x + 29,329$ $R^2 = 0,976$

5.2.3 Sólidos Platônicos

Os sólidos platônicos, diferentemente das outras amostras não se relacionam pelo tamanho, visto na Figura 5.5. Os poliedros tem tamanho padrão e como característica determinativa do seu intertravamento, a sua forma.

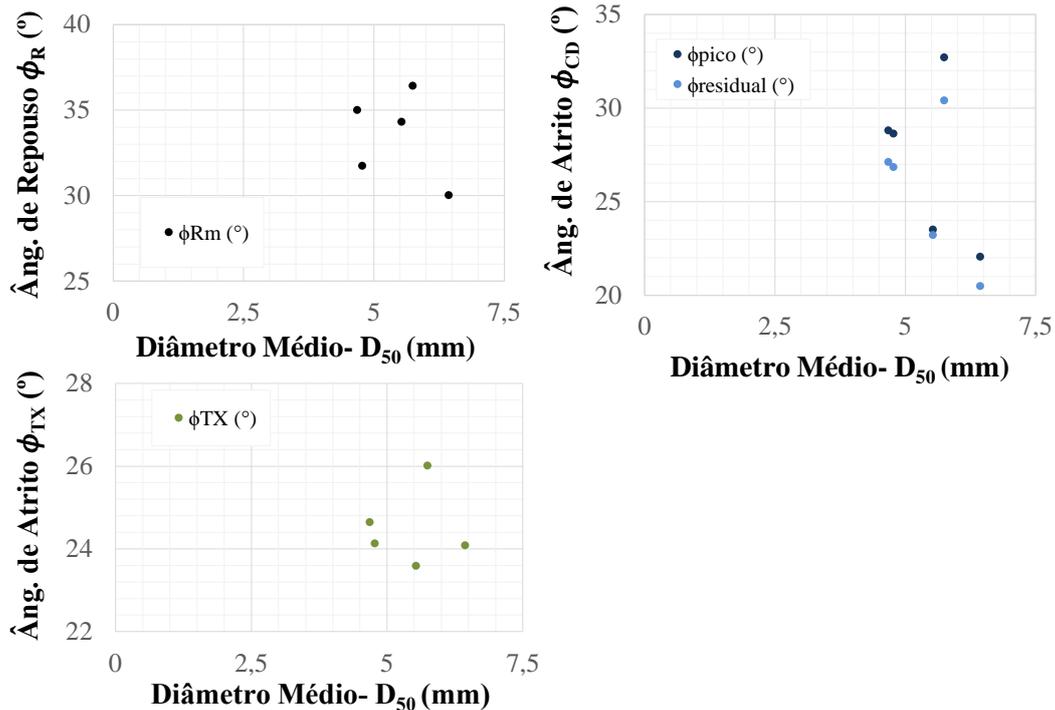


Figura 5.5. Tamanho dos sólidos pelos ângulos de repouso e atrito.

5.2.4 Análise de Tamanho com todos os materiais

A Figura 5.6 mostra as amostras ensaiadas onde o diâmetro médio (D_{50}) é relacionado aos ângulos encontrados nos experimentos. Visualmente nota-se que não há uma relação explícita de tamanho com as propriedades de atrito dos materiais.

O que se nota é a separação de grupos pelo tipo de material, onde as esferas se comportam como dois grupos de materiais diferentes. Isso ocorre até mesmo no ângulo de atrito encontrado no ensaio triaxial, onde as amostras foram saturadas afim de evitar o efeito da sucção.

Os materiais não se relacionam apenas pelo tamanho. Está ligado ao fato de ser tratar de tipos de materiais, formas e faixas granulométricas diferentes. Inclusive os poliedros são até três vezes maiores que os demais materiais.

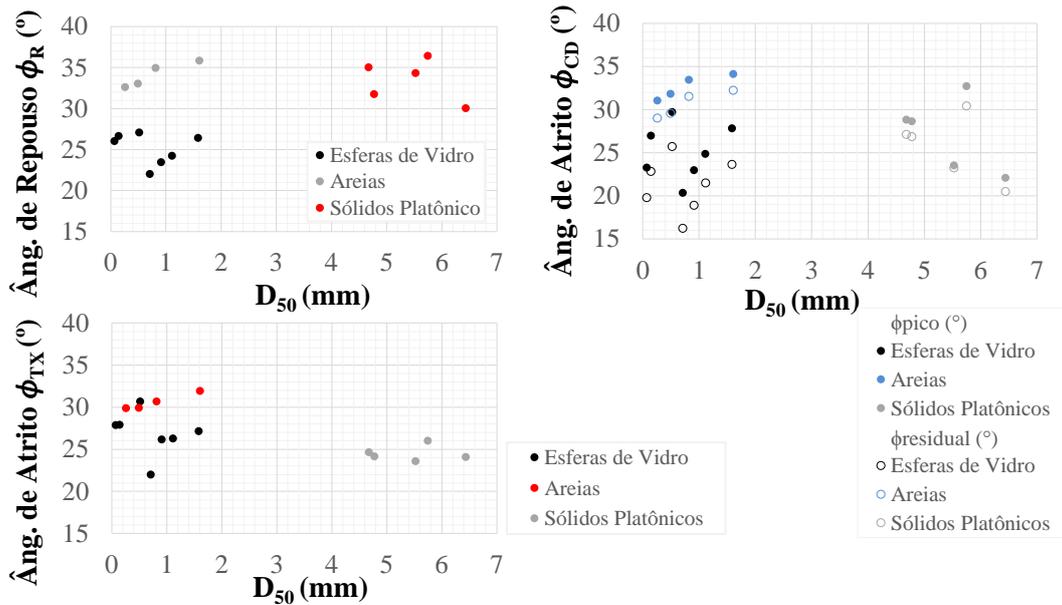


Figura 5.6. Efeito do D_{50} ângulos de repouso e atrito dos materiais ensaiados.

Afim de elucidar o comportamento de tamanho dos materiais, será aplicado as Equações (2-2), (2-3) e (2-4) de Han *et al.* (2018) e Rasti *et al.* (2021), respectivamente. Os dados dessas pesquisas também serão incorporados as análises. A Figura 5.7 apresenta os dados.

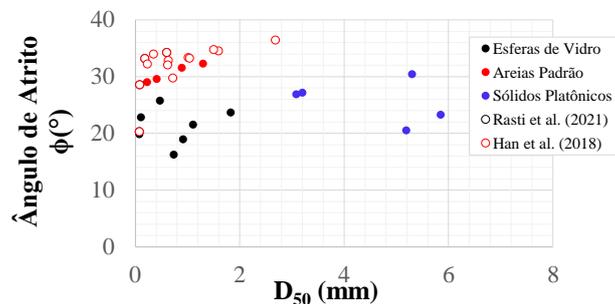


Figura 5.7. Relação do Ângulo de Atrito Residual com o D_{50} de materiais granulares.

5.2.4.1 Análise com Ângulo de Atrito determinado no Cisalhamento Direto

A pesquisa de Han *et al.* (2018) e Rasti *et al.* (2021) relacionaram o ângulo de atrito, determinados em ensaios CD, com o tamanho médio das partículas. Aplicando as Equações (2-2) e (2-4), aos materiais da dissertação e aos dos bancos de dado dos autores, nota-se uma dispersão de resultados acima de 20° para a equação de Rasti *et al.* (2021) e acima de 10° para a de Han *et al.* (2018) entre os ângulos calculados e os ensaiados.

A explicação da grande diferença pode estar no fato das pesquisas em questão, terem estudado areias com faixa de diâmetro entre 0,075 mm a 0,600 mm (Rasti *et al.* , 2021), e 0,2 mm a 3,0 mm (Han *et al.* , 2018). Aplicando a equação para a mesma faixa granulométrica o erro passa a ser menor que 5° , em ambas as equações.

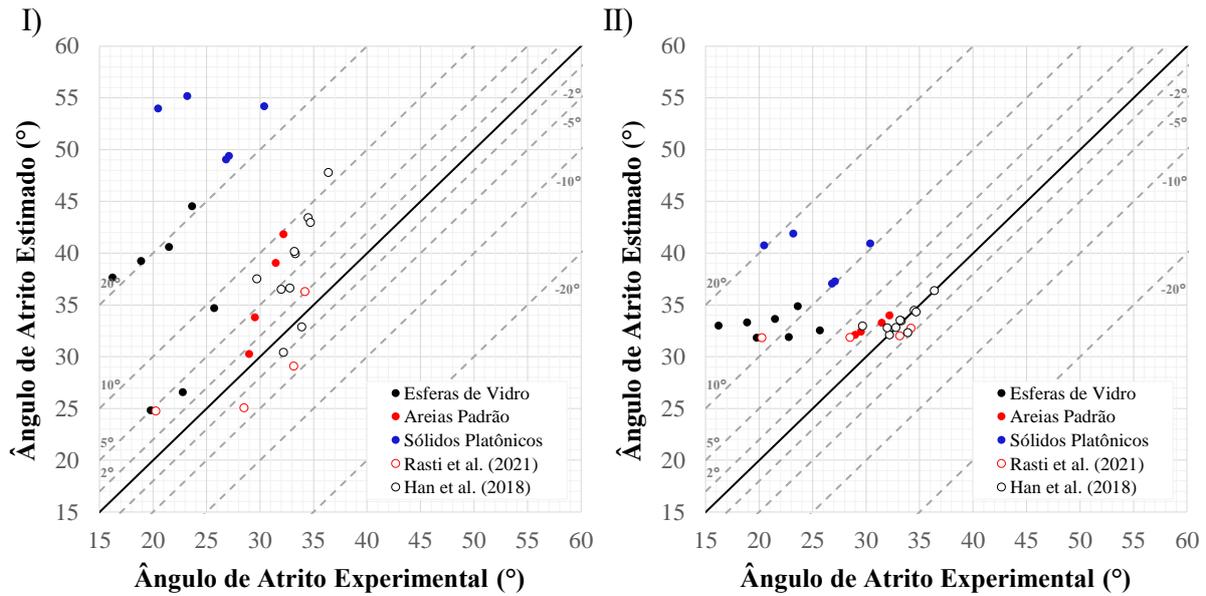


Figura 5.8. Comparativo entre os Ângulos de Atrito Residual calculados com as equações; I) de Rasti *et al.* (2021) e II) de Han *et al.* (2018).

O mesmo procedimento foi realizado para cálculo do ângulo de atrito de pico, mostrado na Figura 5.9. E os resultados foram semelhantes aos encontrados para os ângulos de atrito residual. Assim pode concluir que não é possível usar tais equações para todos os materiais para a determinação do ângulo de atrito de pico e para o residual, uma vez que somente as areias se adequaram.

Com as amostras analisadas também não foi proposto nenhuma equação que determinasse os ângulos somente com o diâmetro médio.

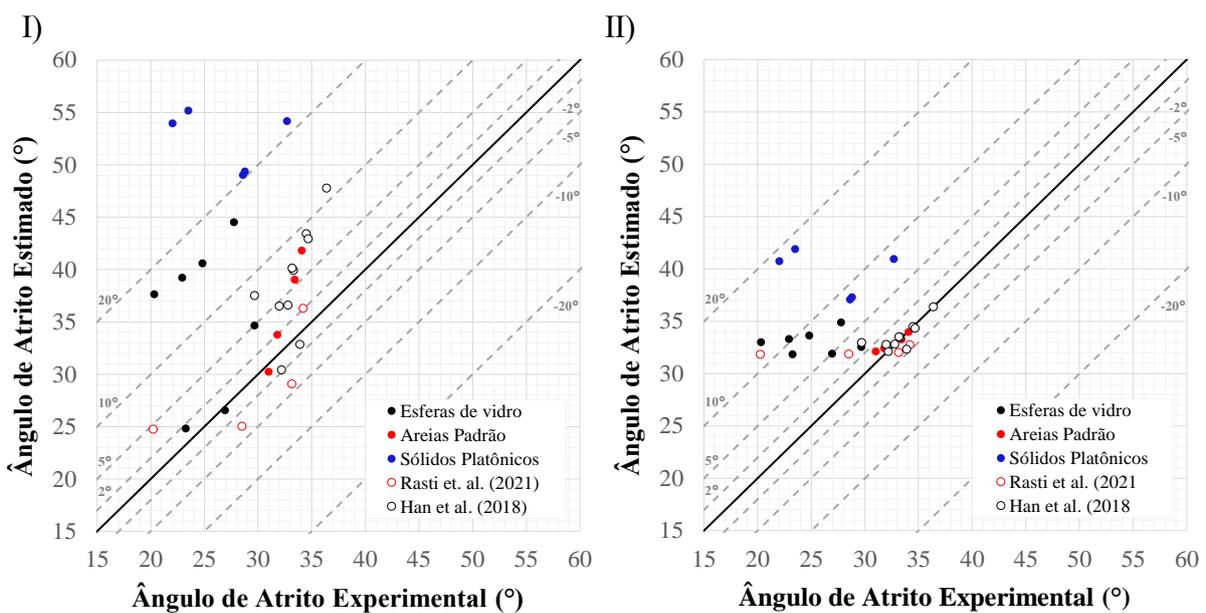


Figura 5.9. Comparativo entre os Ângulos de Atrito de Pico calculados com as equações; I) de Rasti *et al.* (2021) e II) de Han *et al.* (2018).

5.2.4.2 Análise com Ângulo de Repouso

As equações de Rasti *et al.* (2021) e de Han *et al.* (2018), não se relacionaram bem com as amostras desta pesquisa, em especial os poliedros e as esferas de vidro. A Figura 5.10 evidencia que a equação de Han *et al.* (2018) tem menor dispersão nos resultados.

Fica claro que as areias de comportaram de forma bem similar aos materiais ensaiados por Han *et al.* (2018). Enquanto as esferas e os poliedros não podem ser relacionados as equações em questão.

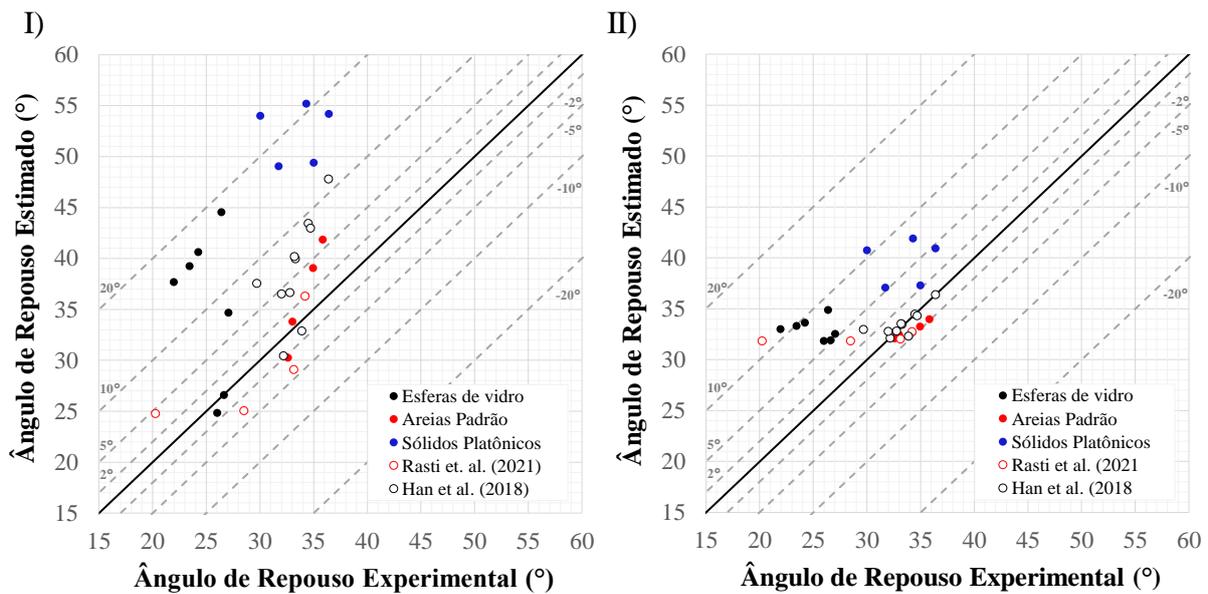


Figura 5.10. Comparativo entre os Ângulos de Repouso calculados com as equações; I) de Rasti *et al.* (2021) e II) de Han *et al.* (2018).

5.2.4.3 Análise com Ângulo de Atrito determinado no Triaxial

Para determinação do ângulo de atrito através do D_{50} foi usada a Equação (2-3) de Han *et al.* (2018). Os resultados encontrados foram satisfatórios para as areias e para a fração fina das esferas, conforme a Figura 5.11 apresenta.

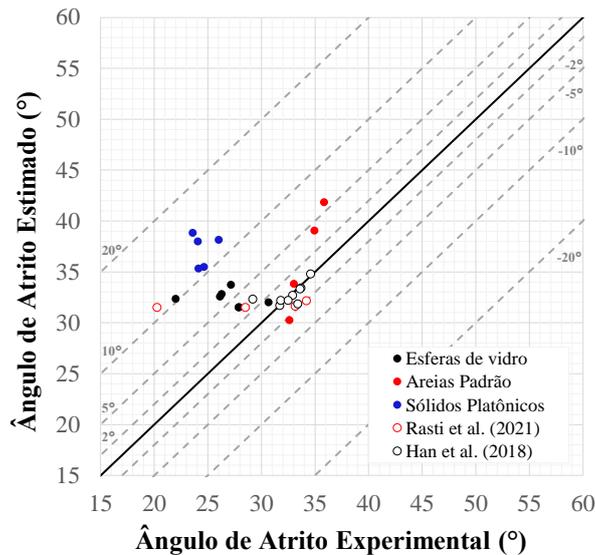


Figura 5.11. Comparativo entre os Ângulos de Atrito calculados com Han *et al.* (2018).

5.3 COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE FORMA COM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A seguir será apresentado os resultados dos índices de forma, relacionado com os ângulos de atrito e repouso. Posteriormente será analisado os matérias como um grupo único e relacionar com equações propostas na bibliografia.

5.3.1 Esferas de Vidro

Com a determinação dos parâmetros de formas e os resultados dos ângulos que medem a resistência do material, foi realizada as análises de que forma os índices de forma se relacionasse aos ângulos encontrados.

Primeiramente foi notada a mesma tendência dos quatros ângulos disponíveis, ou seja, mesmo se tratando de ângulos distintos e com valores diferentes, a tendência de aumento dos ângulos fora semelhante.

Os valores encontrados para as esferas de vidro foram semelhantes. Isso se deve ao fato de ser materiais fabricados e controlados, portanto é valido os resultados semelhantes. A Figura 5.12 mostra os índices de forma pelos ângulos de repouso, atrito de pico e residual encontrados no cisalhamento direto e o atrito realizado no triaxial CD saturado.

Os índices que melhor representaram uma relação foram o de redondeza e relação largura-comprimento. O índice de redondeza se relacionou linearmente com os quatro ângulos, embora

o conteúdo amostral não fosse suficiente para a validação a Tabela 2.1 traz as equações encontradas.

Tabela 5.3. Relação dos parâmetros de Redondeza com os de resistência.

Relação dos parâmetros de Forma com Ângulos	Redondeza (R_{50})
ϕ_R (°)	$y = -110,73x + 132,32$ $R^2 = 0,53$
ϕ_{PICO} (°)	$y = -200,22x + 218,95$ $R^2 = 0,61$
$\phi_{RESIDUAL}$ (°)	$y = -196,15x + 211,13$ $R^2 = 0,60$
ϕ_{TX} (°)	$y = -139,29x + 161,72$ $R^2 = 0,45$

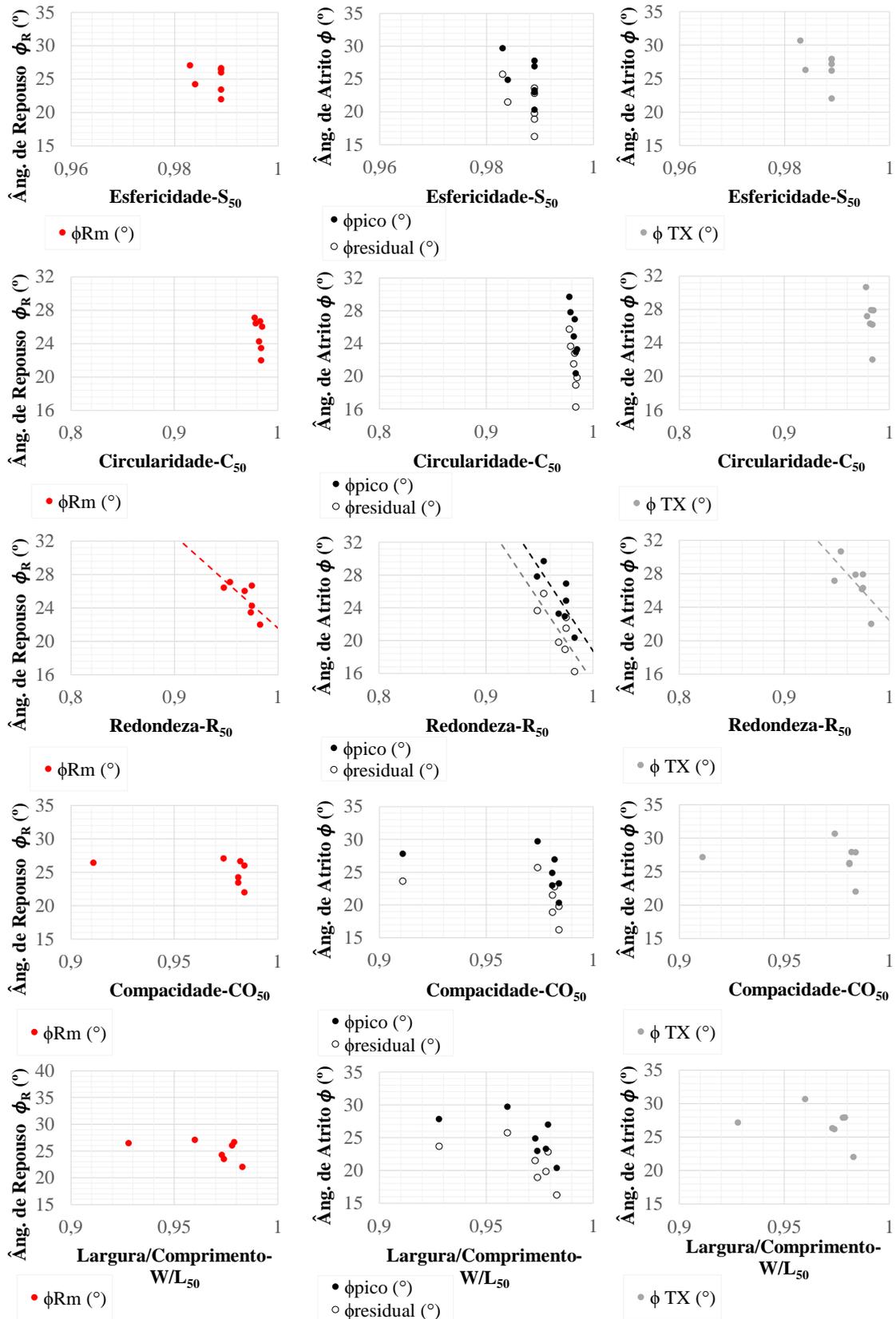


Figura 5.12. Efeito da Forma nos ângulos de repouso e atrito das esferas de vidro.

5.3.2 Areias Padrão

As areias padrão foram os materiais que mais divergiram nos resultados de forma. Por se tratar de um material natural já era esperado os resultados encontrados. As associações dos índices de forma com os parâmetros mecânicos tiveram melhor resposta com os índices de redondeza e compactidade.

Embora as amostras de areia não sejam suficientes para cravar uma relação dos ângulos de atrito e repouso com os parâmetros de forma, vê-se que quanto mais irregular é a partícula maior são os ângulos, isso pode ser observado na Figura 5.13.

A Tabela 5.3 traz as relações entre a redondeza media e os ângulos do trabalho assim como os índices de compactidade. As relações apresentam $R^2 > 0,95$. Os demais parâmetros não tiveram uma relação explícita entre os índices e os ângulos.

Tabela 5.4. Relação dos parâmetros de Redondeza com os de resistência.

Relação dos parâmetros de Forma com Ângulos	Redondeza (R_{50})	Compactidade (CO_{50})
ϕ_R (°)	$y = -19,70x + 45,42$ $R^2 = 0,98$	$y = -29,56x + 56,48$ $R^2 = 0,98$
ϕ_{PICO} (°)	$y = -17,87x + 42,84$ $R^2 = 0,97$	$y = -26,79x + 52,856$ $R^2 = 0,96$
$\phi_{RESIDUAL}$ (°)	$y = -29,28x + 52,71$ $R^2 = 0,96$	$y = -29,28x + 52,71$ $R^2 = 0,96$
ϕ_{TX} (°)	$y = -11,92x + 37,45$ $R^2 = 0,95$	$y = -18,02x + 44,24$ $R^2 = 0,95$

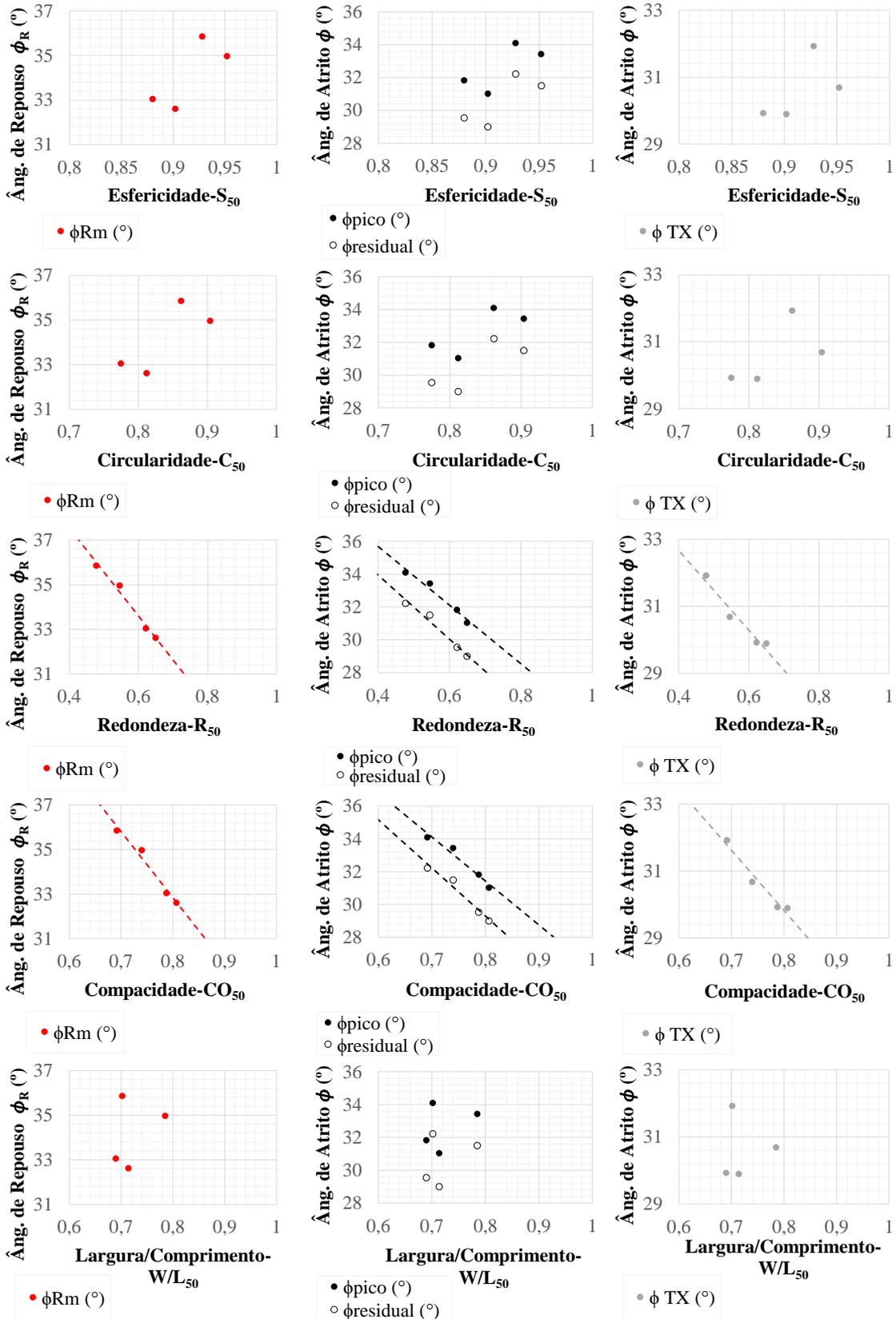


Figura 5.13. Efeito da Forma nos ângulos de repouso e atrito das areias padrão.

5.3.3 Sólidos Platônicos

A principal característica dos poliedros são a forma, eles possuem a quantidade de vértices, arestas e faces como propriedade de cada tipo de sólido. Os números de vértices, arestas e faces são crescentes até se atingir a forma esférica, isso fica evidente na Figura 5.14.

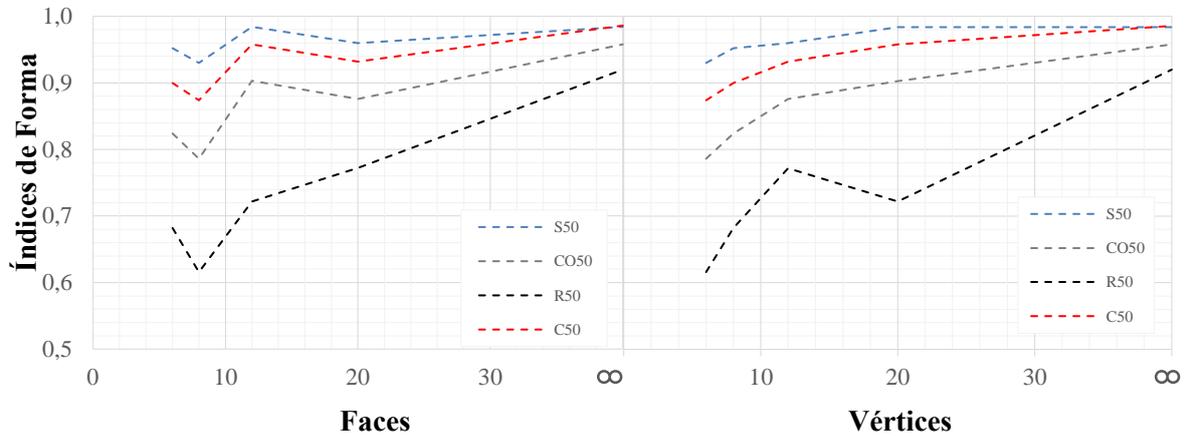


Figura 5.14. Efeito do Número de Faces e Vértices nos índices de forma dos Sólidos Platônicos.

Portanto foi usado o número de faces de cada poliedro para comparar com os ângulos de resistência. Nas formas ensaiadas foi encontrado um padrão os ângulos tendem a crescer até a figura do dodecaedro, que possui 12 faces, a partir daí o ângulo cai até atingir a forma perfeitamente esférica, ver Figura 5.15.

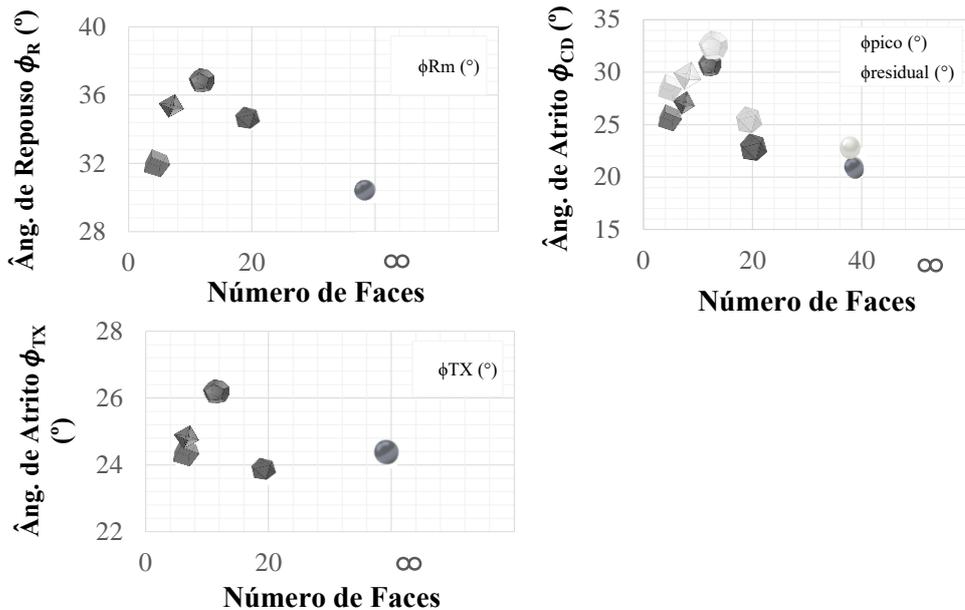


Figura 5.15. Efeito do Número de Faces nos ângulos de repouso e atrito dos Sólidos Platônicos.

Essa constatação foi divergente da relação encontrada por Zhao et al. (2019), que determinou o ângulo de repouso e o comparou pelo número de faces. Em seu artigo o ângulo de repouso cresceu até o poliedro de seis faces, no caso o cubo.

Analisando somente a influência dos índices de forma nos ângulos, nenhum se mostrou eficaz para relacionar os parâmetros. Na Figura 5.16 é possível notar que o índice mais eficaz para fazer uma relação é o de redondeza, entretanto os dados ainda continuam dispersos. A Tabela 5.5 apresenta as equações encontradas.

Tabela 5.5. Relação da Redondeza com os ângulos encontrados nos poliedros.

Relação dos parâmetros de Forma com Ângulos	Redondeza (R_{50})
ϕ_R (°)	$y = -14,06x + 43,94$ $R^2 = 0,39$
ϕ_{PICO} (°)	$y = -27,15x + 47,29$ $R^2 = 0,52$
$\phi_{RESIDUAL}$ (°)	$y = -25,61x + 44,62$ $R^2 = 0,59$
ϕ_{TX} (°)	$y = -2,46x + 26,32$ $R^2 = 0,09$

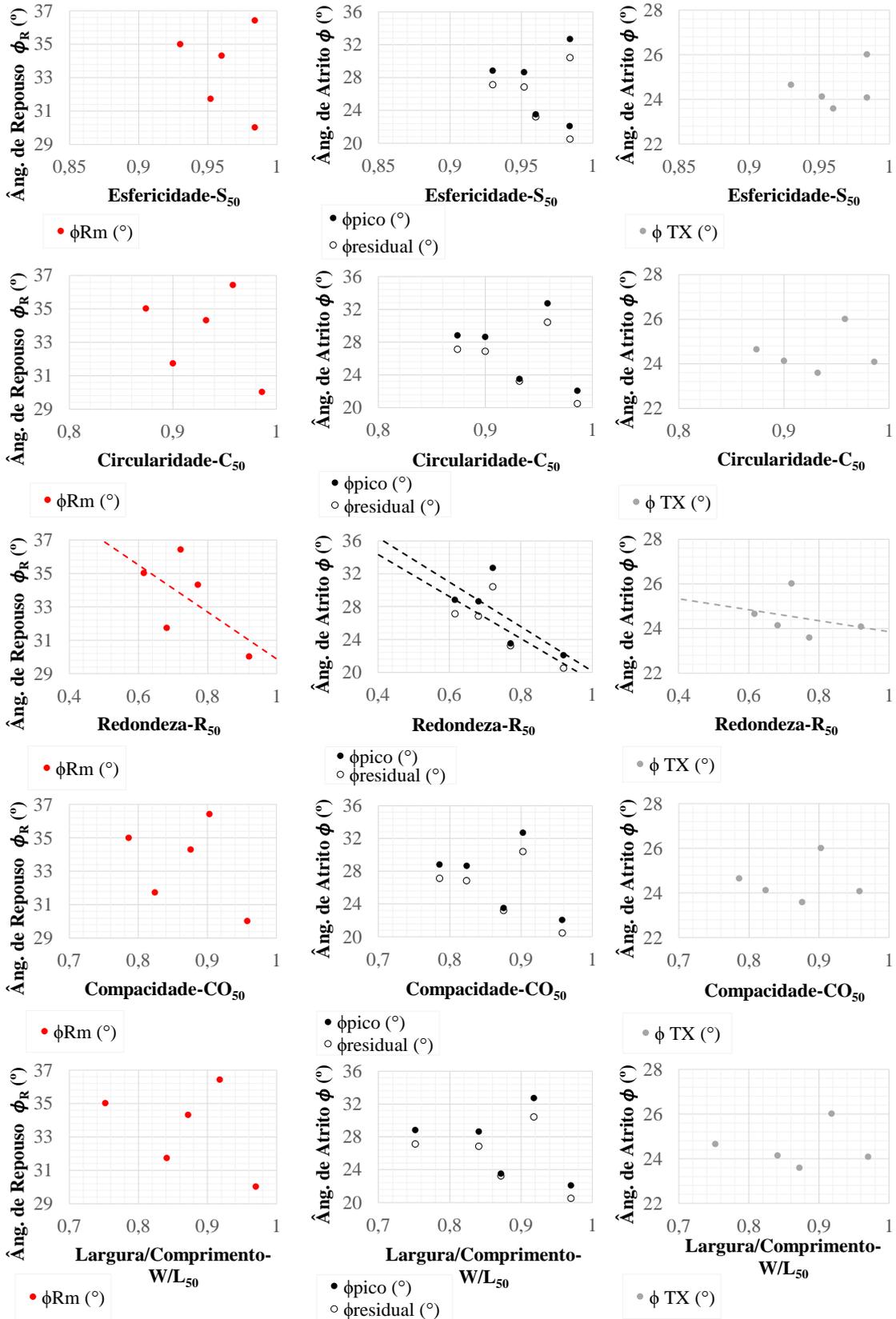


Figura 5.16. Efeito da Forma nos ângulos de repouso e atrito dos poliedros.

5.3.4 Análise com todas as amostras

As análises por grupo de material mostrou que o melhor índice de forma para relacionar com os ângulos de repouso foi a redondeza (R_{50}). Assim para todas as amostras será verificado a influência deste índice e dos índices de regularidade (ρ_{50}) e de largura/comprimento (W/L_{50}).

A Figura 5.17 nos mostra a relação linear dos ângulos com os índices de forma.

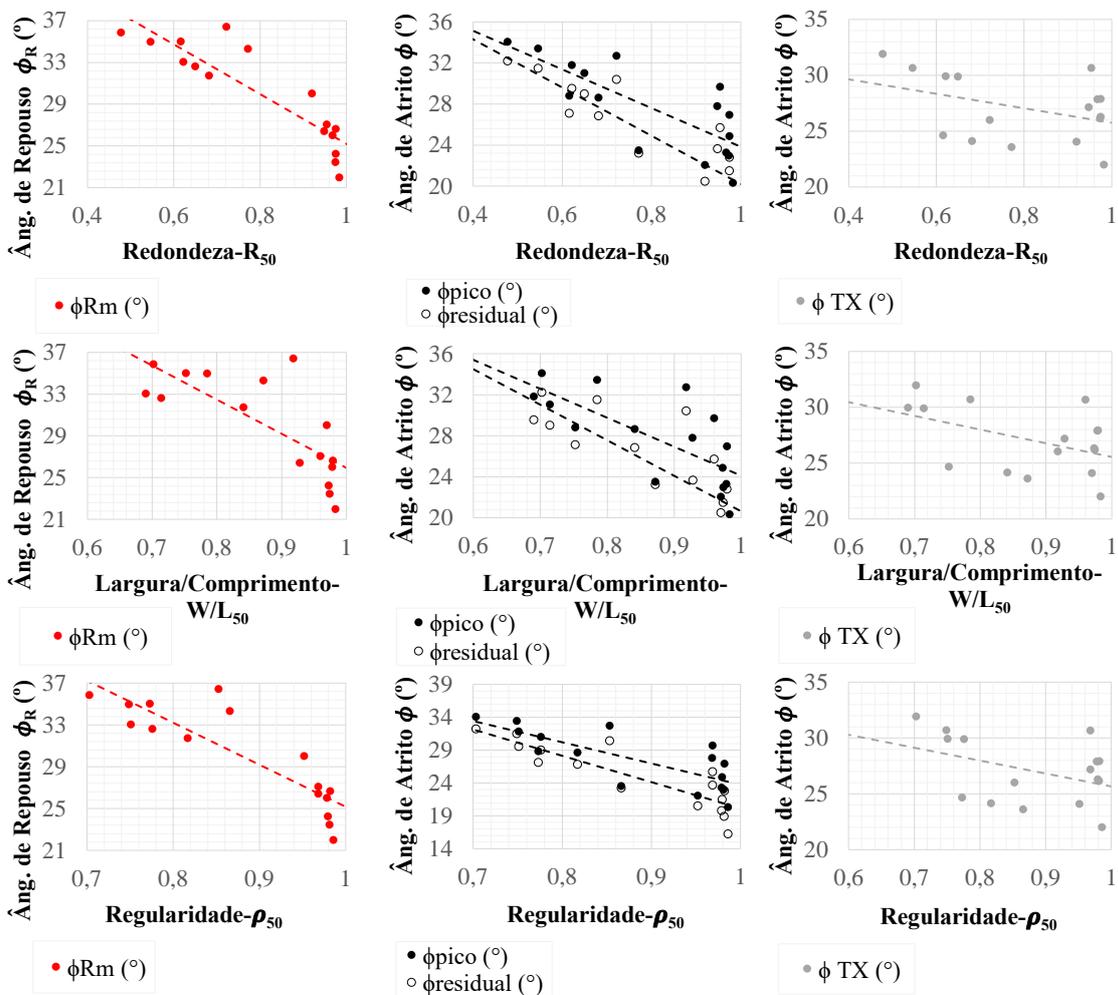


Figura 5.17. Efeito dos Índices de Forma nos ângulos de repouso e atrito de todas as amostras ensaiadas na pesquisa.

Analisando os parâmetros de Forma com o atrito e o repouso (ver Figura 5.17), verificou-se que os parâmetros mais significativos nas análises foram a redondeza e a regularidade, que é a média da esfericidade e da redondeza.

Funções lineares para as amostras foi calculada com razoáveis coeficientes de determinação, mostradas na Tabela 5.6. Porém, o erro para partículas arredondadas ($R_{50} > 0,70$) e com D_{50} menores que 1 mm foram mais consideráveis.

Tabela 5.6. Relação dos melhores índices de forma, para todas as amostras, com os ângulos.

Relação dos parâmetros de Forma com Ângulos	Redondeza (R_{50})	Largura/Comprimento (L/W_{50})	Regularidade (ρ_{50})
ϕ_R (°)	$y = -23,82x + 49,02$ $R^2 = 0,79$	$y = -32,63x + 58,57$ $R^2 = 0,57$	$y = -40,24x + 65,41$ $R^2 = 0,76$
ϕ_{PICO} (°)	$y = -18,84x + 42,67$ $R^2 = 0,61$	$y = -28,20x + 52,32$ $R^2 = 0,52$	$y = -32,14x + 55,90$ $R^2 = 0,59$
$\phi_{RESIDUAL}$ (°)	$y = -23,52x + 43,72$ $R^2 = 0,77$	$y = -34,60x + 55,24$ $R^2 = 0,64$	$y = -40,13x + 60,25$ $R^2 = 0,75$
ϕ_{TX} (°)	$y = -6,47x + 32,23$ $R^2 = 0,16$	$y = -12,25x + 37,79$ $R^2 = 0,22$	$y = -11,56x + 37,23$ $R^2 = 0,17$

5.3.4.1 Análise com Ângulo de Atrito determinado no Cisalhamento Direto

Para a validação das relações, foram usados dados e equações existentes na literatura. A pesquisa de Cho et al. (2006), forneceu uma equação linear relacionando o ângulo de atrito residual de granulares com a redondeza, visto na Equação (2-5).

Usando os valores de redondeza das amostras um novo ângulo de atrito residual foi calculado usando a Equação (2-5), seus resultados comparados ao dos ângulos experimentais. O erro encontrado foi de 3° para mais ou para menos. A Figura 5.18 apresenta o comparativo entre o ângulo experimental e o calculado.

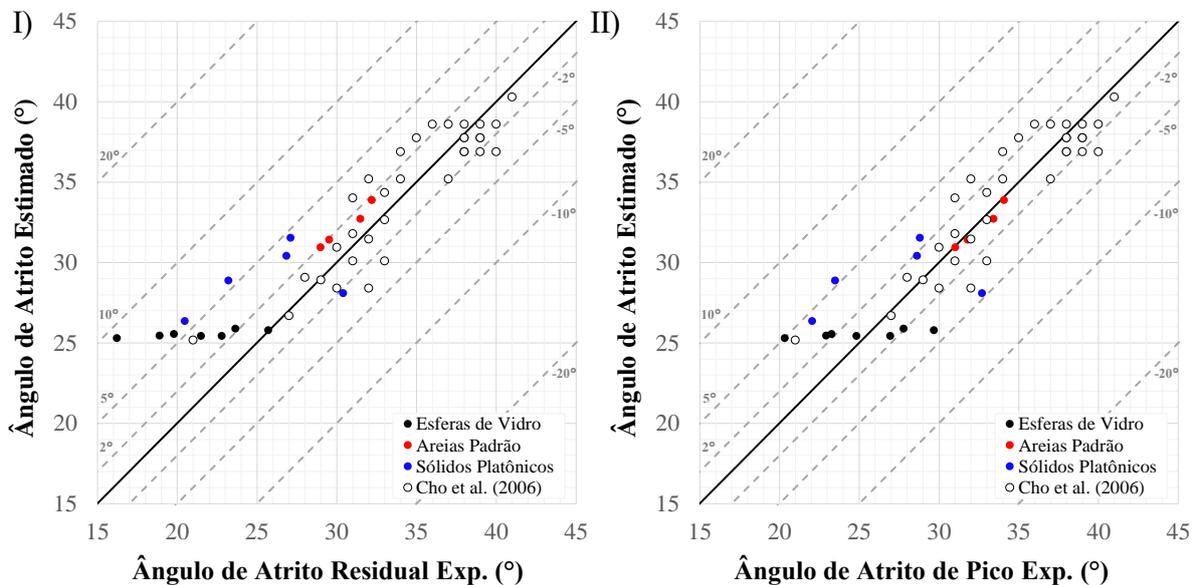


Figura 5.18. Comparativo entre os Ângulos de Atrito estimados com a equação de Cho et al. (2006) com os Ângulos de Atrito; I) Residual e II) Pico.

Os resultados encontrados com a equação empírica foram satisfatórios, porém usando os mesmos dados da pesquisa de Cho et al. (2006) e os dados obtido nos ensaios é proposto duas novas equações.

Ao plotar os dados da bibliografia, ver Figura 5.19, e dos materiais desta dissertação, percebe-se que as amostras arredondadas ($R_{50} \geq 0,70$) e finas ($D_{50} \leq 1$ mm) não se adaptaram a uma proposta linear. Assim o conjunto amostral foi dividido em dois grupos e determinadas novas relações.

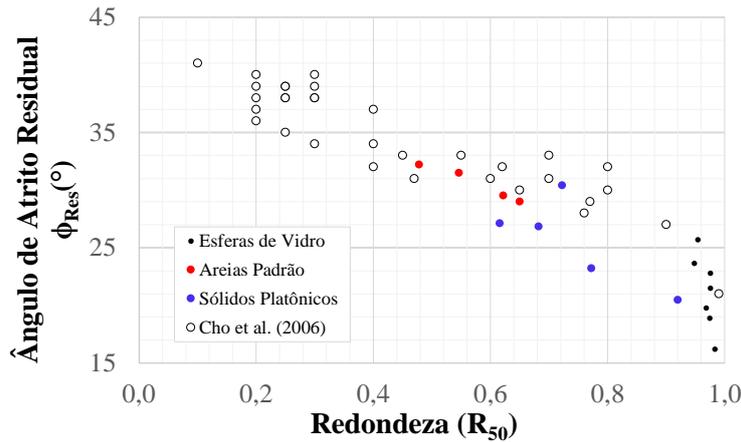


Figura 5.19. Materiais e Dados de artigos sendo relacionados com a R_{50} e o ϕ_{Res} .

O critério de divisão dos grupos consistiu em classificar as amostras quanto a redondeza e separá-las em um grupo com redondeza igual ou superior a 0,70 com partículas de até 1 mm de diâmetro médio, e outro grupo com redondeza inferior a 0,70 e partículas com D_{50} superior a 1 mm.

Inferre-se assim que tanto a forma quanto o tamanho das partículas afetam o ângulo de atrito residual. A Figura 5.20 apresenta as correlações de ambos os grupos, seguidas pelas Equações (5-1) e (5-2).

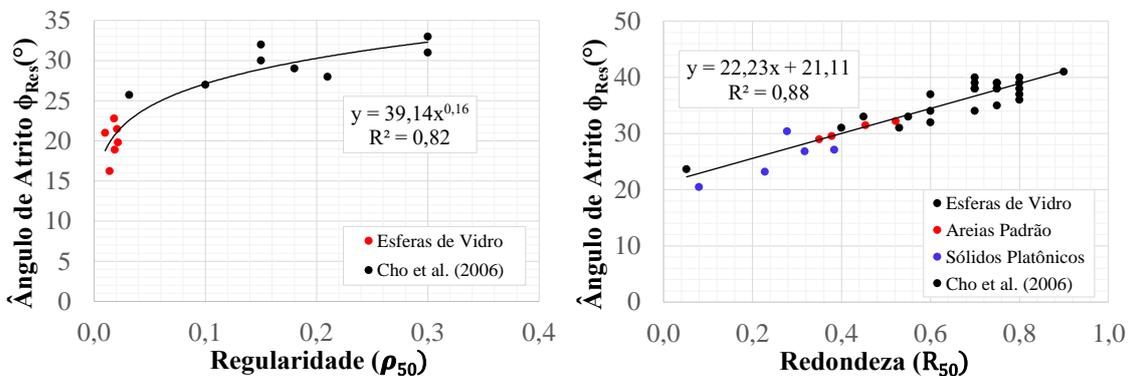


Figura 5.20. Relações encontradas onde I) Materiais com $R > 0,70$ e $D_{50} < 1,00$ mm e II) demais materiais.

$R_{50} \geq 0,70$, $D_{50} \leq 1\text{mm}$:

$$\phi_{Residualcal} = 39,14 - (19,57 * R^{0,16}) - (19,57 * S^{0,16}) \quad (5-1)$$

$R_{50} < 0,70$:

$$\phi_{Residualcal} = 22,23 + 21,11 - (21,11 * R) \quad (5-2)$$

O erro diminuiu significativamente ao aumentar a amostragem e separá-las em grupos diferentes relacionando forma e tamanho, para a divisão. A Figura 5.21 apresenta o comparativo do ângulo calculado e o medido, comparando com a Figura 5.18 que se relacionava com a equação de Cho et al. (2006) nota-se que as novas equações geram um erro de menos de 2°.

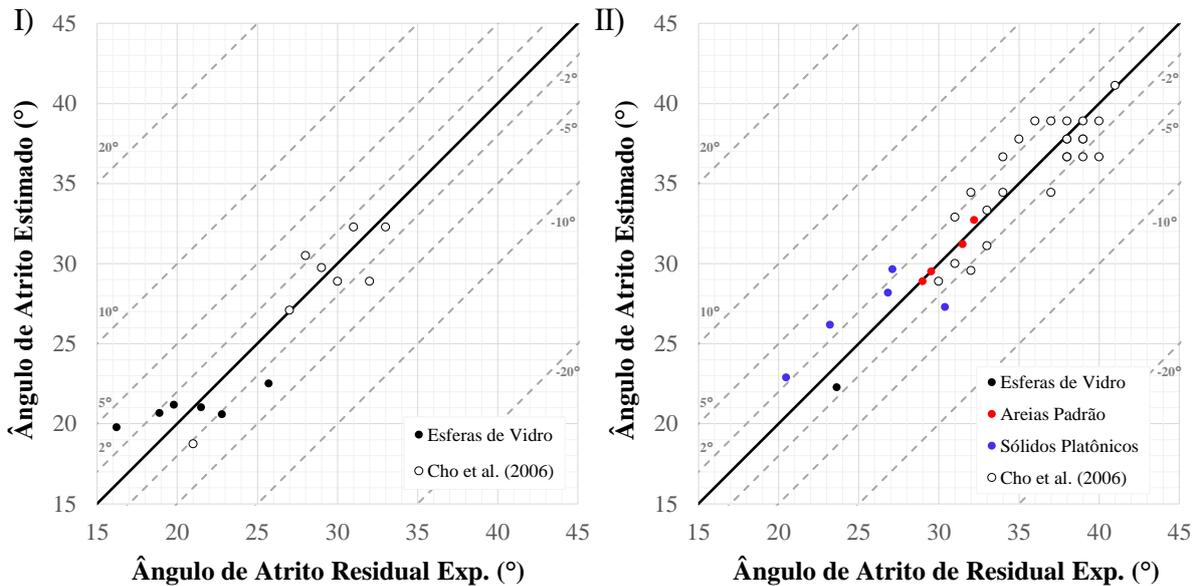


Figura 5.21. Comparativo entre os Ângulos de Atrito Residual experimentais e os Ângulos de Atrito estimados com as Equações; I) (5-1) e II) (5-2).

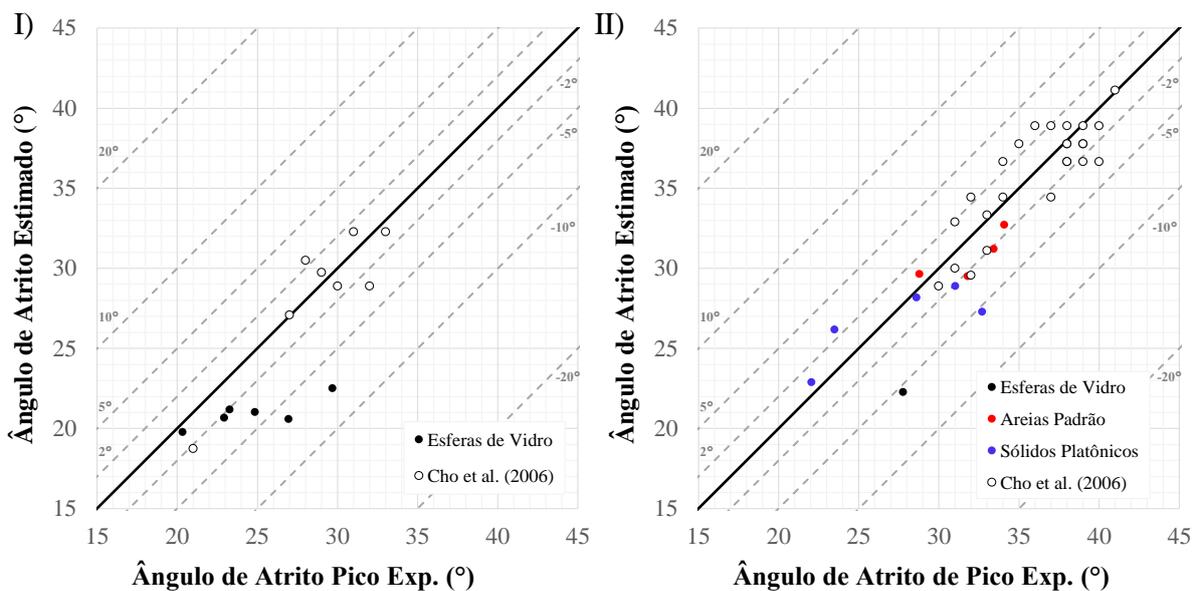


Figura 5.22. Comparativo entre os Ângulos de Atrito de Pico experimentais e os Ângulos de Atrito estimados com as Equações; I) (5-1) e II) (5-2).

5.3.4.2 Análise com Ângulo de Repouso

Rousé *et al.* (2008), encontrou uma relação linear entre o ângulo de repouso e a redondeza, mostrado na Equação (2-6). A equação é semelhante à de Cho *et al.* (2006). Tal fato está na explicação de Santamarina *et al.* (2004) que assume o ângulo de repouso como igual ao ângulo de atrito interno residual para solos granulares.

Aplicando a equação para os materiais desta pesquisa constatou uma dispersão maior que a própria equação de Cho *et al.* (2006), que utilizava de ângulo de atrito no estado crítico. Os resultados são mostrados na Figura 5.23.

Os materiais usados no artigo de Rousé *et al.* (2008) eram mais angulosos do que os usados nesta pesquisa, além de não se ter a informação das faixas granulométricas médias. Assim pode-se concluir que talvez a diferença entre os materiais possa ter causado um desvio maior nos resultados.

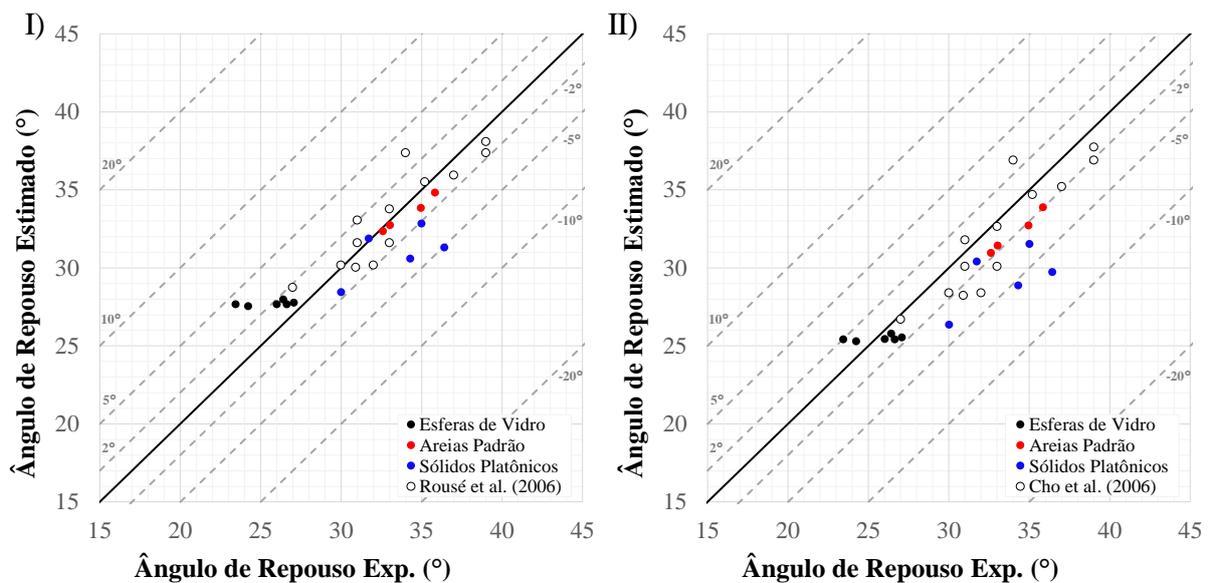


Figura 5.23. Comparativo entre os Ângulos de Repouso determinado em laboratório dos Ângulos de Repouso estimados com as equações; I) de Rousé *et al.* (2008) II) e de Cho *et al.* (2006).

Usando os dados de Rousé *et al.* (2008) e os materiais usados, propõe-se duas equações relacionando o ângulo de repouso e a redondeza. Notou-se que as amostras se dividem em comportamento em razão da redondeza. O critério da divisão dos grupos foi separar amostras muito arredondadas ($R \geq 0,70$), das demais. Os materiais com índice de redondeza abaixo de 0,70 formaram o segundo grupo, vistos na Figura 5.24.

A separação de materiais arredondados se deve ao fato de estes não possuírem a forma como fator determinante das características mecânicas.

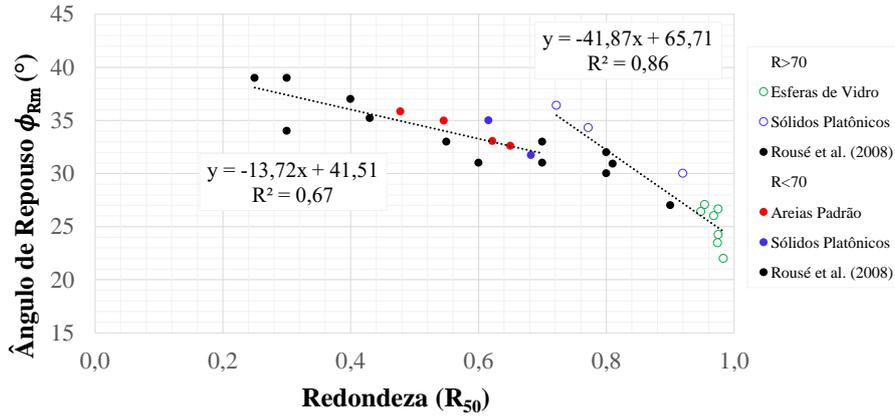


Figura 5.24. Proposta de novas equações que relacionem o R_{50} com os Ângulos de Repouso.

As Equações (5-3) e (5-4) foram propostas para determinar o ângulo de repouso através do um parâmetro de forma redondeza. Ambas as equações apresentaram bons resultados, vistos na Figura 5.25.

$$R_{50} \geq 0,70$$

$$\phi_{Repouso} = 65,71 - (41,87 * R) \tag{5-3}$$

$$R_{50} < 0,70$$

$$\phi_{Repouso} = 41,51 - (13,72 * R) \tag{5-4}$$

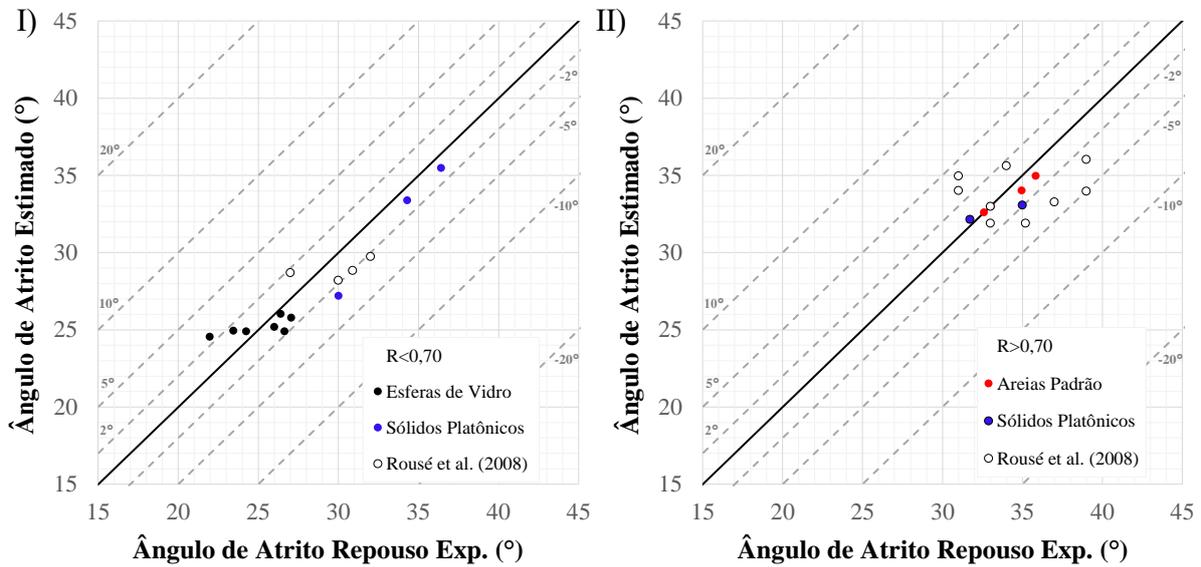


Figura 5.25. Comparativo entre os Ângulos de Repouso determinado em laboratório dos Ângulos de Repouso estimados com as equações; I) (5-5) II) (5-6).

5.3.4.3 Análise com Ângulo de Atrito determinado no Triaxial

Os dados encontrados nos ensaios de compressão triaxial consolidado e drenado para amostras saturadas tiveram grandes desvios e pouca precisão nas relações de forma encontradas.

Utilizando a base de dados de Bareither *et al.* (2008), que fornecia dados de amostras caracterizadas quanto a redondeza e o ângulo de atrito, foi realizada uma nova relação e determinada uma nova Equação (5-10).

$$\phi_{TX} = 48,30 - (24,37 * R) \quad (5-7)$$

A Figura 5.26 apresenta a relação encontrada e posteriormente os resultados. Visivelmente, os poliedros também não apresentaram boa relação com a equação proposta se comparados as esferas e areias.

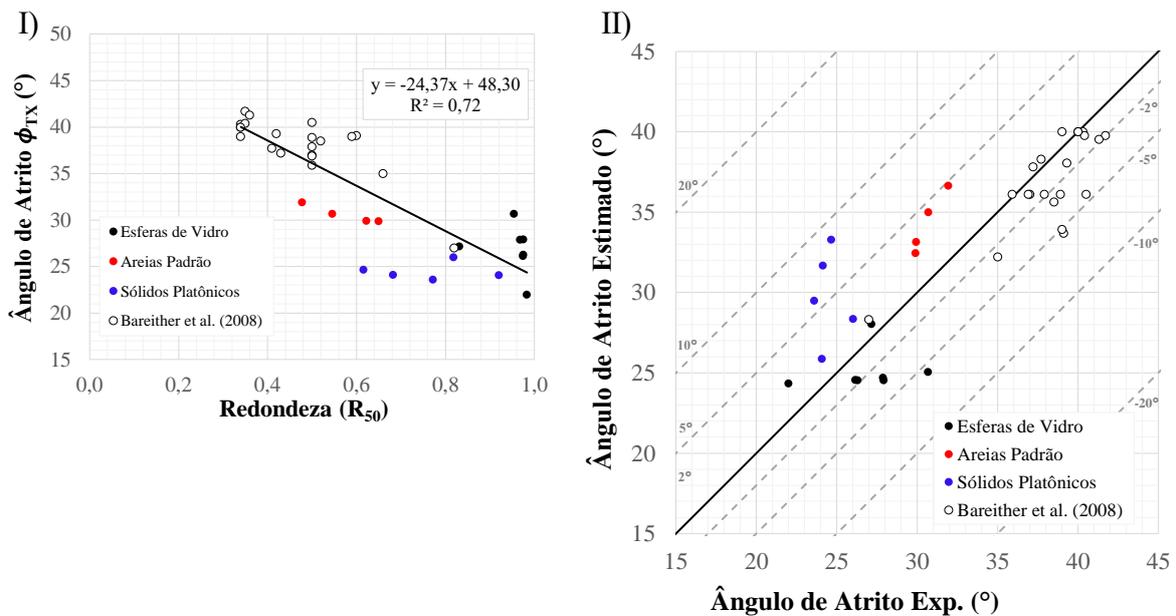


Figura 5.26. Comparativo entre os Ângulos de Atrito determinado em laboratório dos Ângulos de Atrito estimados com a equação (5-8).

5.4 INFLUÊNCIA DE DUAS VARIÁVEIS NO ATRITO

Por se tratar de materiais homogêneos, tanto o coeficiente de uniformidade quanto a curvatura não apresentaram nenhuma relação com os ângulos. Porém o diâmetro médio divergiu de amostra para amostra, mas sozinho não obteve uma boa relação com as propriedades mecânicas. Isso se deve ao fato de além de possuírem tamanhos distintos as amostras possuem formas, materiais e índices físicos diferentes.

Dentre os índices de forma estudados e determinados o que melhor explicou o comportamento dos granulares foi o índice de redondeza. Devido a isso resolveu usar os dois parâmetros e verificar o quanto a união destes melhorará a determinação dos ângulos. Os parâmetros escolhidos foram a redondeza, já que se relacionou melhor com os ângulos, e o D_{50} (para o atrito no cisalhamento direto), $e_{máx}$ (ângulo de repouso) e D_{10} (atrito no triaxial CD saturado).

5.4.1.1 Análise do Ângulo de Atrito determinado no Cisalhamento Direto

Foi usado, além das esferas, areias e poliedros, os dados da pesquisa de Cho et al. (2006). Determinado a melhor relação dos ângulos de atrito de pico e residual com a redondeza e o D_{50} . A Equação (5-9) foi a que mais se aproximou dos resultados experimentais, conseguindo um $R^2 > 0,85$. A Figura 5.27 apresenta a superfície, os pontos e a dispersão dos resultados, que foram maiores nos sólidos platônicos. Nas demais amostras o erro foi em média mais ou menos 2° .

$$\phi_{CDResidual} = 38,643 - (0,5323 * D_{50}) - [17,673 * (R_{50})^2] \quad (5-9)$$

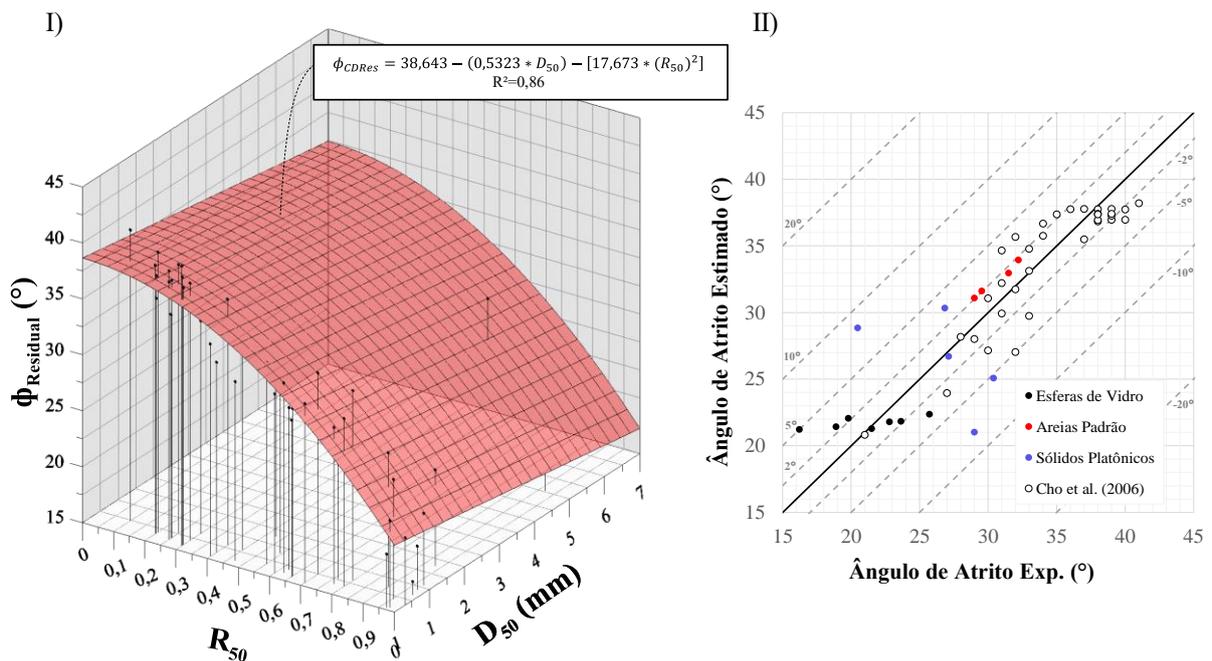


Figura 5.27. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Atrito Residual por meio de função potencial; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.

Uma equação linear foi determinada, ver Equação (5-10), para verificar o quanto uma equação simplificada perderia a precisão se comparada a equação potencial. A disposição dos pontos na superfície e a dispersão dos resultados são mostrados na Figura 5.28. Visualmente

comparando os resultados das equações, nota-se que a equação linear é mais conservadora que a função polinomial e que a diferença nos erros, é similar.

$$\phi_{CDResidual} = -(20,705 * R_{50}) - (0,402 * D_{50}) + 43,267 \quad (5-10)$$

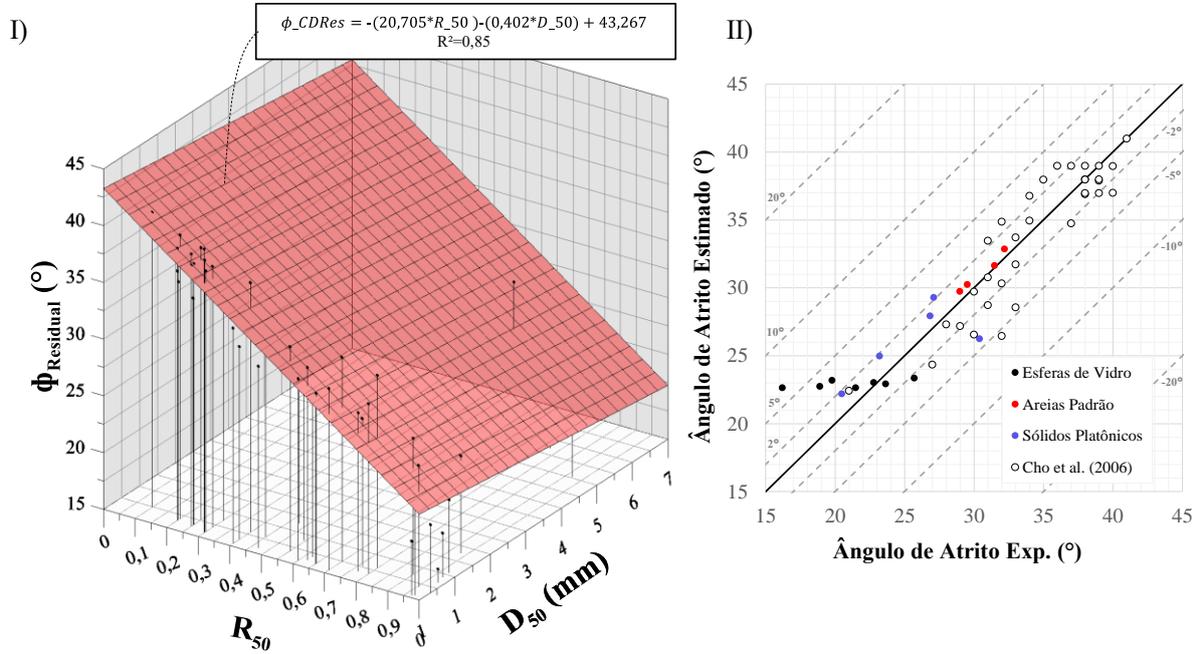


Figura 5.28. Relação do R50 e D50 com o Ângulo de Atrito Residual por meio de função linear; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.

As determinações realizadas pro ângulo residual foram repetidas e determinadas pro ângulo de atrito de pico. Primeiramente é apresentada a Equação (5-11), que é uma função potencial. A superfície encontrada e a distribuição dos ângulos estimados estão na Figura 5.29.

$$\phi_{CDPico} = 42,195 - (17,498 * R_{50}) - (0,086 * (D_{50}^2)) \quad (5-11)$$

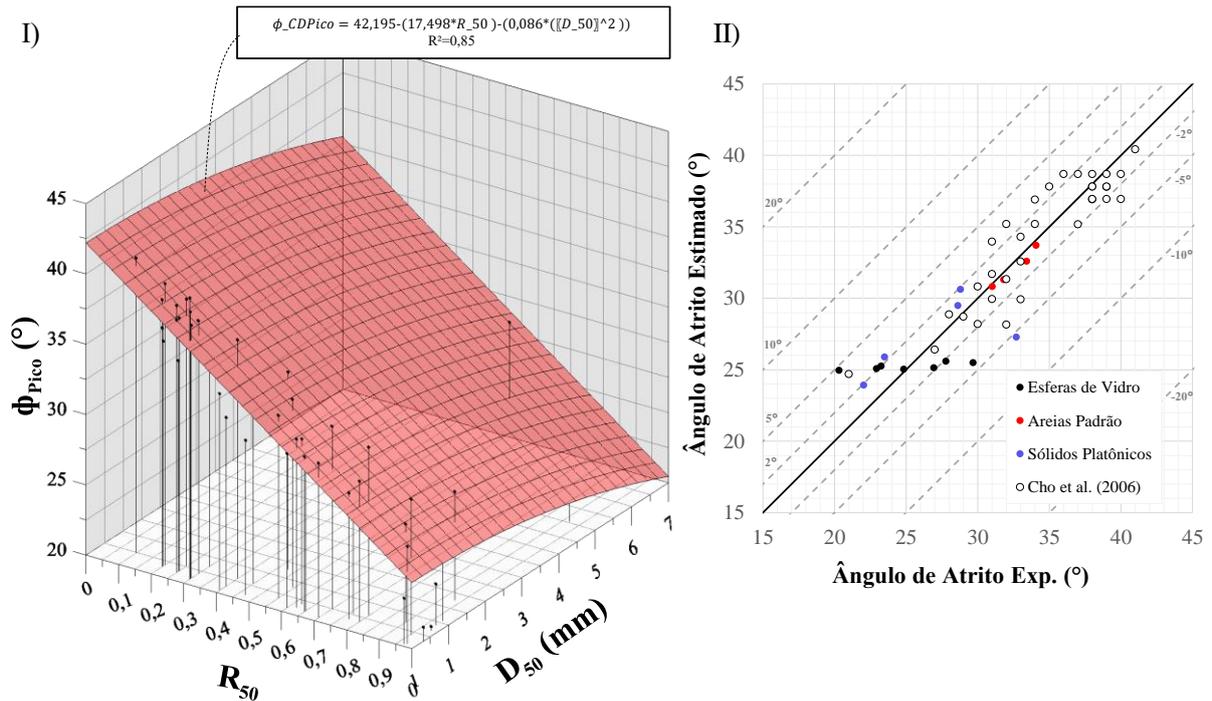


Figura 5.29. Relação do R_{50} e D_{50} com o $\hat{\text{Ângulo de Atrito de Pico}}$ por meio de função potencial; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.

O plano determinado para os ângulos de pico tivera resultados bem próximos dos encontrados com a função potencial. A Equação (5-12), do plano, é mostrada abaixo, bem como a Figura 5.30, que apresenta recursos gráficos para verificar os pontos e os resultados encontrados dos ângulos estimados com a equação.

$$\phi_{CDPico} = -(17,416 * R_{50}) - (0,456 * D_{50}) + 42,326 \quad (5-12)$$

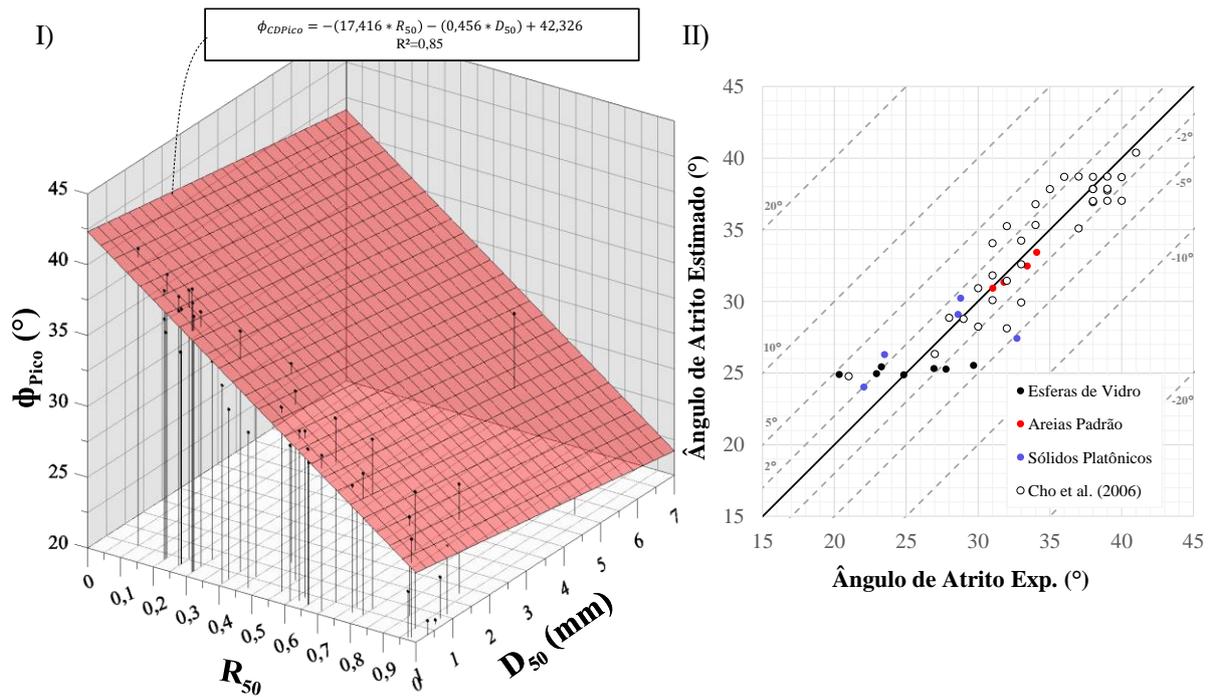


Figura 5.30. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Atrito de Pico por meio de função linear; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.

5.4.1.2 Análise do Ângulo de Repouso

Os ângulos de repouso foram analisados em função da redondeza e o índice de vazios máximos. Primeiramente foi determinada a melhor equação que relacionava os índices, encontrando a Equação (5-13). A função polinomial teve coeficiente de determinação igual a 0,83.

$$\phi_{Repouso} = 33,748 + (4,876 * e_{MÁX}) - (11,997 * (D_{50}^2)) \quad (5-13)$$

A Figura 5.31 apresenta a representação gráfica da função, bem como os pontos usados em sua determinação. Fica evidenciado ainda, que o erro fica em torno de 2° , para mais e para menos e os maiores erros estão concentrados nos poliedros.

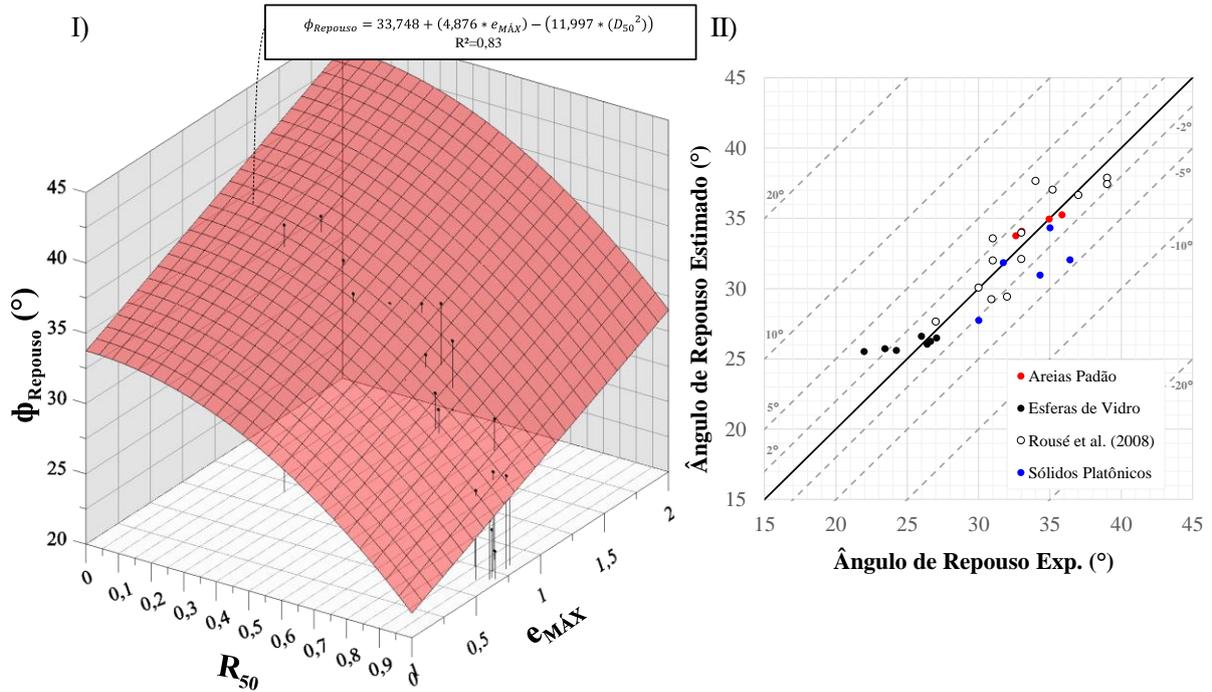


Figura 5.31. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Repouso por meio de função polinomial; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.

O coeficiente de determinação da equação linear foi bem similar a equação potencial. A Figura 5.34 apresenta a representação gráfica e a dispersão dos ângulos estimados com a função linear.

$$\phi_{Reposo} = (-14,538 * D_{50}) + (6,893 * e_{M\acute{A}X}) + 35,718 \quad (5-14)$$

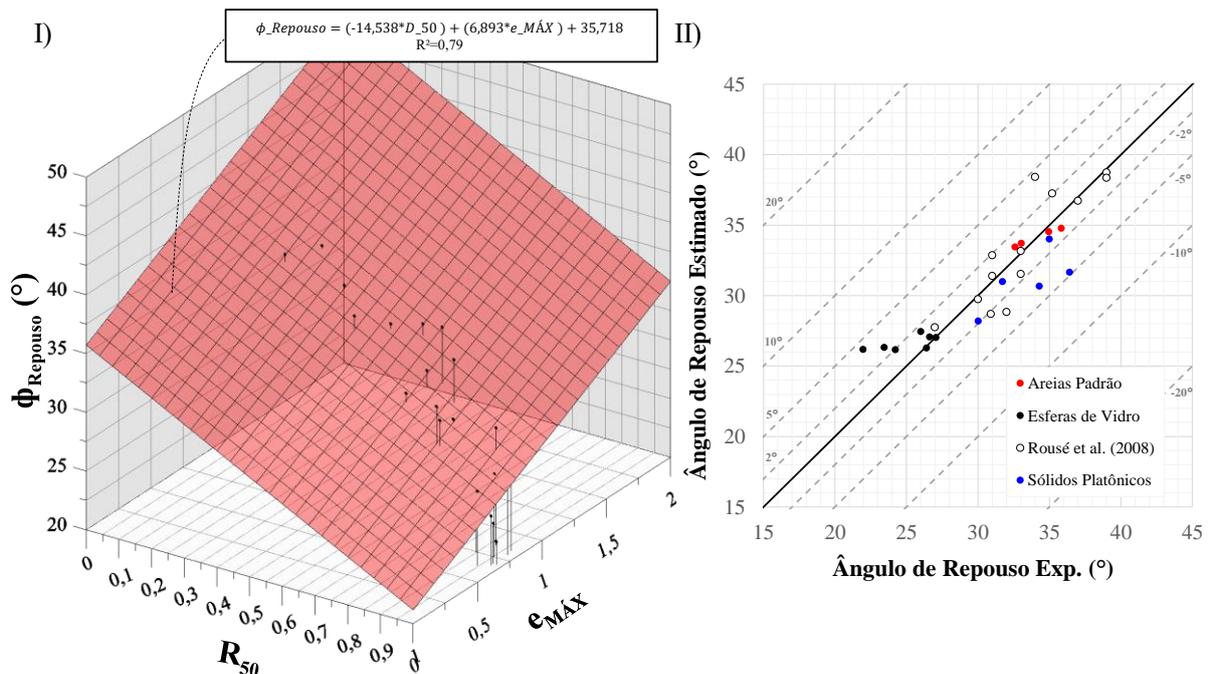


Figura 5.32. Relação do R_{50} e D_{50} com o Ângulo de Repouso por meio de função linear; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.

5.4.1.3 Análise do Ângulo de Atrito determinado no Triaxial

Usando esferas, areias, poliedros e dados da literatura (Bareither *et al.*, 2008), foi estabelecida duas equações onde o ângulo de atrito, ensaiado em triaxial consolidado-drenado, é função do D_{10} e do R_{50} . Primeiramente é evidenciado, a Função (5-15) que obteve o melhor R^2 .

$$\phi_{TX} = 46,11 * (0,521^{R_{50}}) * (D_{10}^{-0,068}) \quad (5-15)$$

A Figura 5.33 mostra os resultados dos ângulos estimados, observando que o erro fica em torno de 5°.

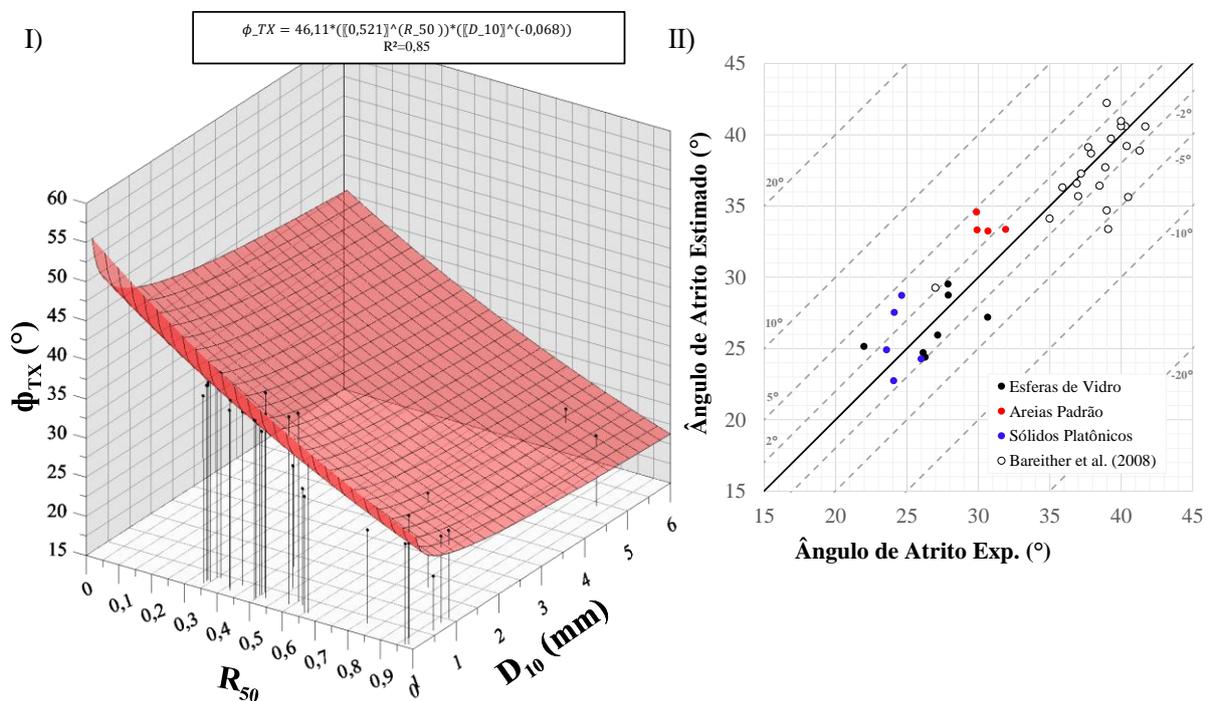


Figura 5.33. Relação do R_{50} e D_{10} com o Ângulo de Atrito por meio de função polinomial; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.

A Função (5-16) forma um plano (ver Figura 5.34), embora simplista a equação apresentou coeficiente de determinação bem similar a equação exponencial.

$$\phi_{TX} = 47,49 + (-20,75 * R_{50}) - (1,58 * D_{10}) \quad (5-16)$$

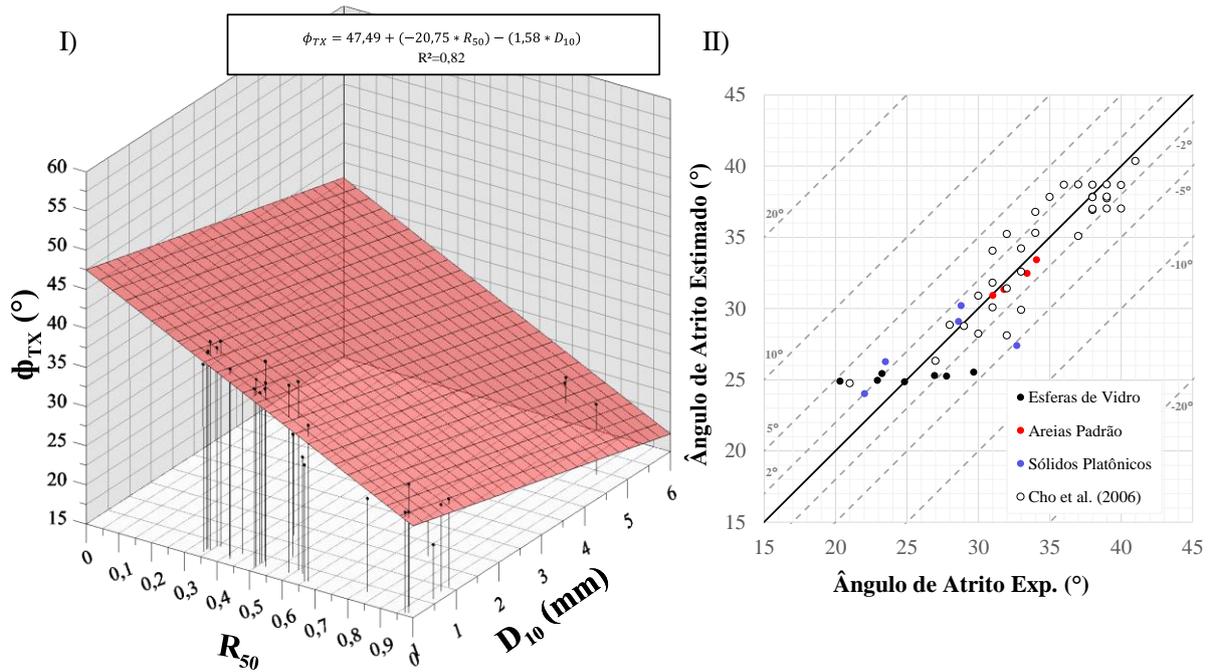


Figura 5.34. Relação do R_{50} e D_{10} com o $\hat{\text{Ângulo de Atrito}}$ por meio de função linear; I) Superfície encontrada; II) Dispersão dos resultados.

5.5 ANÁLISES ESTATÍSTICA DAS EQUAÇÕES DETERMINADAS

Para verificar a precisão e a acurácia das equações acima, foi utilizado o método estatístico denominado “*Rankink Distance-RD*”. O método consiste na determinação da média e do desvio padrão da razão entre os ângulos estimados com os ângulos experimentais, essa razão é chamada de K , vista na Equação (5-17).

$$K = \frac{\text{Valor}_{\text{Calculado}}}{\text{Valor}_{\text{Medido}}} \tag{5-17}$$

Através deste método avalia-se a capacidade de ajuste da função encontrada, aos resultados experimentais e faz-se a comparação com outras equações determinadas. A acurácia, de um método de cálculo, pode ser associada com a média, enquanto a precisão pode ser obtida pela avaliação de um índice de dispersão (o desvio padrão).

De acordo com Fonseca (2012), “*rankink distance*” consegue expressar um julgamento global da qualidade de um do método de cálculo, uma vez que utiliza da média e ao desvio padrão do conjunto amostral. O cálculo do RD é demonstrado na Equação(5-18).

$$RD = \sqrt{(1 - \mu_K)^2 + \sigma_K^2} \tag{5-18}$$

Entendendo o método estatístico, encontra-se nas Tabelas abaixo, as análises de cada equação usada e proposta nesse estudo. A Tabela 5.7 apresenta as análises das equações usadas para encontrar o ângulo de repouso. Nota-se que os **RD** são melhores para as equações propostas nesse estudo, do que para os autores citados.

A equação (2-6), proposta por Cho *et al.* (2006), subestima significativamente os valores do ângulo de repouso, visto que indicam que mais de 80% dos valores de K são menores que 1.

As equações que relacionam duas variáveis das amostras possuem acurácia e dispersão semelhantes, portanto o uso da equação linear é compensatório. Não há ganhos ao utilizar a equação de duas variáveis em relação a equação que utiliza somente a redondeza. Os ganhos ao usar essas equações e que não precisa verificar o R_{50} e o D_{50} das amostras.

Tabela 5.7. Ângulo de Repouso.

Equações	Referência	Variáveis	% de $K \leq 1$	μ de K	σ de K	RD
(5-19)	Rasti <i>et al.</i> (2021)	D_{50}	45,16	1,094	0,171	0,195
(5-20)	Han <i>et al.</i> (2018)	D_{50}	38,71	1,125	0,176	0,216
(2-6)	Cho <i>et al.</i> (2006)	R_{50}	82,76	0,962	0,069	0,079
(2-7)	Rousé <i>et al.</i> (2008)	R_{50}	48,28	1,014	0,080	0,082
(5-3)	Proposta Amostras $R_{50} > 0,70$	R_{50}	50,00	1,003	0,056	0,056
(5-4)	Proposta Amostras $R_{50} < 0,70$	R_{50}	60,00	1,001	0,041	0,042
(5-13)	Proposta Equação polinomial	$D_{50}, e_{máx}$	51,72	1,004	0,061	0,061
(5-14)	Proposta Equação linear	$D_{50}, e_{máx}$	55,17	0,990	0,069	0,070

Os ângulos de atrito de pico encontrados no cisalhamento direto, tiveram melhor **RD** nas equações que utilizavam duas variáveis. A equação (5-2) para amostras mais angulares também conseguiu μ próximo a 1 e σ próximo a 0, entretanto nela os materiais arredondados não são usados.

A equação 5-1, proposta para materiais arredondados, obteve 70% dos valores de K inferior a 1, o que significa que a equação subestima os ângulos de atrito de pico.

Tabela 5.8. Ângulo de Atrito de Pico Cisalhamento Direto.

Equações	Referência	Variáveis	% de $K \leq 1$	μ de K	σ de K	RD
(5-21)	Rasti <i>et al.</i> (2021)	D_{50}	40,00	1,126	0,229	0,262
(5-22)	Han <i>et al.</i> (2018)	D_{50}	33,33	1,157	0,249	0,295
(2-6)	Cho <i>et al.</i> (2006)	R_{50}	57,14	1,016	0,084	0,085

Equações	Referência	Variáveis	% de $K \leq 1$	μ de K	σ de K	RD
(5-1)	Proposta Amostras $R_{50} > 0,70$, $D_{50} < 1$	R_{50}	71,43	0,932	0,094	0,116
(5-2)	Proposta Amostras $R_{50} < 0,70$	R_{50}	62,86	0,984	0,066	0,068
(5-11)	Proposta Equação polinomial	D_{50}, R_{50}	57,14	1,006	0,074	0,075
(5-12)	Proposta Equação linear	D_{50}, R_{50}	57,14	1,006	0,075	0,075

O ângulo de atrito residual teve melhor determinação na proposta com duas variáveis, μ próximo a 1 e σ próximo a 0. Sendo possível utilizar da função linear, uma vez que a dispersão e bem pequena e a acurácia praticamente similar.

As equações (5-1) e (5-2) também propostas, com única variável, tiveram média e desvio mais próximos à 1 e 0 que as equações da literatura.

Tabela 5.9. Ângulo de Atrito Residual Cisalhamento Direto.

Equações	Referência	Variáveis	% de $K \leq 1$	μ de K	σ de K	RD
(5-23)	Rasti <i>et al.</i> (2021)	D_{50}	33,33	1,230	0,301	0,379
(5-24)	Han <i>et al.</i> (2018)	D_{50}	26,67	1,235	0,320	0,397
(2-6)	Cho <i>et al.</i> (2006)	R_{50}	42,86	1,057	0,125	0,138
(5-1)	Proposta Amostras $R_{50} > 0,70$, $D_{50} < 1$	R_{50}	50,00	1,002	0,092	0,093
(5-2)	Proposta Amostras $R_{50} < 0,70$	R_{50}	57,14	1,003	0,058	0,059
(5-9)	Proposta Equação polinomial	D_{50}, R_{50}	51,02	1,007	0,087	0,008
(5-10)	Proposta Equação linear	D_{50}, R_{50}	46,94	1,010	0,097	0,009

No caso do ângulo de atrito para materiais saturados e cisalhados no triaxial, a equação que relaciona o ângulo a redondeza teve excelente RD , bem como a equação polinomial de duas variáveis.

Tabela 5.10. Ângulo de Atrito Triaxial.

Equações	Referência	Variáveis	% de $K \leq 1$	μ de K	σ de K	RD
(2-3)	Han <i>et al.</i> (2018)	D_{50}	46,94	1,095	0,296	0,311
(5-7)	Proposta	R_{50}	51,35	1,012	0,117	0,014
(5-15)	Proposta Equação polinomial	D_{10}, R_{50}	45,95	1,006	0,078	0,006
(5-16)	Proposta Equação linear	D_{10}, R_{50}	51,35	0,949	0,331	0,112

6 CONCLUSÃO

Os ensaios de caracterização e mecânicos realizados para o estudo da influência do tamanho e da forma das partículas no comportamento mecânico dos solos granulares forneceram a base necessária para iniciar e concretizar os estudos constantes no presente trabalho.

Para o estudo foram realizados ensaios de índices físicos, curva granulométrica e análise de imagens em dezesseis amostras. Os materiais pertenciam a três grupos diferentes, o primeiro composto por sete tipos de esferas de vidro, o segundo por quatro tipos de areias e o último por cinco tipos de poliedros.

Além da morfologia e tamanho das amostras, foram realizados os ensaios de ângulo de repouso e atrito. O ensaio de ângulo foi reproduzido seguindo as determinações de Guzmán (2008), em um equipamento manual ainda foram acopladas determinações de massa e verificada as relações de índice de vazios e densidade relativa de cada pilha. As relações encontradas geraram bons coeficientes de determinação, o que valida os resultados encontrados nos ensaios.

A execução dos ensaios de ângulo de repouso foi uma importante ferramenta no estudo do comportamento mecânico, uma vez que, o ângulo em questão não sofre influência do confinamento. Tornando mais eficaz as verificações quanto a morfologia das partículas.

Dos ensaios de cisalhamento direto foram retirados dois ângulos, o atrito de pico e o residual, dos materiais secos. E por fim o ensaio de compressão triaxial, executado com amostras consolidadas, drenadas e saturadas. O ensaio triaxial foi realizado com o objetivo de retirar o impacto da sucção presentes em amostras não saturadas.

Ao comparar os resultados dos quatro ângulos encontrados e as amostras foi constatada a mesma tendência nas amostras analisadas. Configurando que os resultados obtidos foram fieis ao proposto no início da pesquisa.

Após a determinação dos ângulos foi realizada a caracterização amostral por imagem. Os ensaios realizados no SYNC e no PartAn 3D geraram dados quanto a tamanho e forma. Os dados de tamanho foram comparados com os ensaios de curva granulométrica. Embora os dados gerados nas análises fossem mais descritivos, os parâmetros de curvatura e uniformidade foram semelhantes, bem como o tamanho médio das partículas extraídos do analisador com os tamanhos encontrados no ensaio convencional.

Os ângulos foram relacionados ao D_{50} , extraído do ensaio por imagem. As amostras naturais (areias), demonstraram aumento dos ângulos com o aumento no tamanho das

partículas. Isso ocorreu para os quatro ângulos determinados, variando somente os coeficientes lineares das equações lineares encontradas.

As esferas também se relacionaram por tamanho aos ângulos, entretanto foi preciso separá-las em dois grupos. O primeiro contendo grãos com tamanho menor que 0,60 mm e o segundo com amostras médias variando entre 0,70 mm a 1,60 mm. Neste grupo a relação também foi linear variando os coeficientes para cada ângulo estudado.

Os poliedros não apresentaram relações dos ângulos com o tamanho. A explicação pode estar no fato de terem sido produzidos com único fator determinante, o tamanho. Todos os sólidos foram produzidos com o diâmetro circunscrito da esfera de 6,30 mm.

Após a análise por grupo de materiais, foi realizada as análises com todos os materiais. Na faixa de diâmetros analisadas, não houve uma relação clara entre os diâmetros e os ângulos estudados. Concluindo que ao relacionar o diâmetro com os ângulos de repouso e atrito, por grupo de materiais, ainda é possível encontrar relações, já para todas as amostras não há como propor nenhum método de correlação empírico.

A morfologia das partículas foi determinada em dois grupos. O primeiro analisou a textura superficial, e o segundo a forma. Os índices de textura superficial estudados foram a solidez, a concavidade e a convexidade, sendo capazes de detectar mudanças no tipo de material das partículas, mas sozinhos não geraram nenhum tipo de relação. Subtende-se que os índices de textura apresentados são robustos para representar as características superficiais.

Os índices de forma estudados na dissertação foram a redondeza, circularidade, compacidade, relação entre largura-comprimento e a redondeza. Para as amostras estudadas o índice de redondeza fora o que gerou melhores relações com os ângulos. Principalmente os de repouso e de atrito residual.

Ao unir todos os materiais ainda constatou boas relações, além da R_{50} , com a relação largura-comprimento (W/L_{50}) e com a regularidade (ρ_{50}), média dos parâmetros de redondeza e esfericidade. A partir da união dos materiais e dados da literatura ouve propostas de equações empíricas para determinação dos ângulos através dos índices de forma, além de testar equações propostas por outros autores.

Foi, neste estudo, utilizado de duas variáveis para verificar se as relações empíricas melhorariam na determinação dos ângulos de atrito e repouso. As superfícies encontradas com melhores coeficientes de determinação foram comparadas à planos. Para os ângulos de repouso e de atrito determinados no cisalhamento direto (pico e residual) o uso de equações lineares de duas variáveis tiveram índice RD semelhantes as polinomiais. Já para o atrito encontrado no

triaxial a equação polinomial obteve melhor precisão e acurácia, gerando diferenças consideráveis ao comparar com o plano.

A conclusão geral é que o uso de equações com uma única variável de forma teve resultados de precisão e acurácia bem próximos das equações de duas variáveis. Necessitando de mais tipos de amostras para uma se realmente há ganhos em se tratar de mais de um parâmetro micromecânico, principalmente nos ângulos de atrito.

Com base nesta dissertação, não é determinado um índice de forma, textura ou uma propriedade granulométrica que por si só é capaz de determinar os ângulos de atrito e repouso. Os ângulos são influenciados por um conjunto de fatores, como forma, textura e granulometria.

Ângulos de repouso e de atrito residual tiveram melhor relação com as características de tamanho e forma, isso é explicado por desconsiderar o confinamento nas amostras.

Aspectos como a quebra e a abrasão foram desconsideradas nesta pesquisa, entretanto esses fatores podem ter influenciado nos resultados, principalmente das esferas de vidro. Onde as frações menores apresentaram maiores ângulos de atrito e repouso se comparado as frações maiores.

Utilizando de uma função linear, o melhor modelo empírico encontrado nessa pesquisa, para estimativas dos ângulos de atrito residual, tem como variáveis, o índice de forma (redondeza) e tamanho (D50). O *RD* encontrado para esta função foi de 0,009, o que significa uma boa acurácia e precisão do método.

Para a caracterização das partículas foram usados os equipamentos usados SYNC e PartAn 3D, os resultados encontrados por esses equipamentos foram satisfatórios e condizentes com dados extraídos dos fabricantes e a propriedades determinadas em outros ensaios.

As ferramentas de análises de imagens são objetivas, tornam os resultados rápidos e trabalha com maior quantidade de informações, mas ainda precisa ser aprimorada para materiais de baixo contraste. Ainda é necessário verificar e entender a resolução da lente utilizada pelo equipamento PartAn 3D. Partículas menores devem ser usadas lentes de maior alcance e resolução, a escolha desse objeto afeta, de forma significativa, os resultados da caracterização.

6.1 SUGESTOES PARA PESQUISAS FUTURAS

Em complementação aos resultados obtidos neste trabalho são feitas as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Realização de ensaios de caracterização das amostras, no PartAn 3D utilizando de lentes de maior precisão para conseguir resultados mais precisos de caracterização para as

amostras grosseiras e conseguir caracterizar as esferas e as areias finas com o analisador 3D

- Aumentar o número de amostras com tamanhos distintos para entender o comportamento do tamanho entre a faixa de materiais finos e médios.
- Caracterizar materiais naturais de formas distintas, para verificar uma gama maior de partículas angulares.
- Simular numericamente os efeitos de tamanho e forma das partículas, utilizando o método dos elementos discretos, nos ensaios de ângulo de repouso e cisalhamento direto.
- Simular numericamente os efeitos de tamanho e forma das partículas, utilizando o método dos elementos discretos, nos ensaios de ângulo de repouso e cisalhamento direto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afzali-Nejad, A., Lashkari, A., & Shourijeh, P. T. (2017). Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(1), 54–66.

Al-Hashemi, H. M., e Al-Amoudi, O. S., (2018). A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology*, 397-417.

Alshibli, K. A., e Alsaleh, M. I., (2004). Characterizing Surface Roughness and Shape of Sands Using Digital Microscopy. *Journal of Computing in Civil Engineering*. ASCE.

Andersson T. (2010) “Estimating particle size distributions based on machine vision”. Doctoral Thesis. Department of Computer Science and Electrical Engineering. Luleå University of Technology. ISSN: 1402-1544. ISBN 978-91-7439-186-2.

Bareither, C. A., Edil, T. B., Benson, C. H., Mickelson, D. M., (2008). Geological and physical factors affecting the friction angle of compacted sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(10), 1476-1489.

Braga, A.L.M., Zuluaga, R.A.G., Girardi, J.R., Garcia, L.M., Farias, M.M., (2019). Avaliação do Ângulo de Repouso de Materiais Granulares. GEOCENTRO, Brasília/DF, Brasil.

Cabalar, A.F., Hasan, R.A., 2013. Compressional behaviour of various size/shape sand-clay mixtures with different pore fluids. *Eng. Geol.* 164, 36–49.

Chang, C.S., Deng, Y., Meidani, M.: A multi-variable equation for relationship between limiting void ratios of uniform sands and morphological characteristics of their particles. *Eng. Geol.* 237, 21–31 (2018).

Chmielowska, D., Woronko, B., & Dorocki, S. (2021). Applicability of automatic image analysis in quartz-grain shape discrimination for sedimentary setting reconstruction. *CATENA*, 207, 105602.

Cho, G.C., Dodds, J. e Santamarina, J.C., (2006). Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 132(5): 591–602.

Cox, M.R., and Budhu, M., 2008. A Practical Approach to Grain Shape Quantification. *Engineering Geology*, 96 (1), Jan., 1-16.

Dai, B. B., Yang, J., & Zhou, C. Y. (2016). Observed effects of interparticle friction and particle size on shear behavior of granular materials. *International Journal of Geomechanics*, 16(1), 04015011.

Donzé, F. V., Richefeu, V., Magnier, S., (2009). Advances in Discrete Element Method Applied to Soil, Rock and Concrete Mechanics. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8:1-44.

Dunn, C., Bora, P. (1972). Shear strength of untreated road base aggregates measured by variable lateral pressure triaxial cell, *J. Mater.* 7 (2).

Fernlund, J.M.R., 1998. The effect of particle form on sieve analysis: a test by image analysis. *Engineering Geology* 50, 111–124.

Fuggle, A. R. (2011). Geomaterial gradation influences on interface shear behavior. Georgia Institute of Technology.

Girardi, J. R. J., (2016). Atrito em Materiais Granulares, utilizando Esferas de Vidro. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49 p.

Guo P, Su X (2007) Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials. *Can Geotech J* 44:579–591.

Guo, Y., Markine, V., Song, J., & Jing, G. (2018). Ballast degradation: Effect of particle size and shape using Los Angeles Abrasion test and image analysis. *Construction and Building Materials*, 169, 414–424.

Guzmán, D., (2008). Comparación del ángulo de fricción crítico con el ángulo de reposo. Análisis de la influencia de algunos factores en la determinación del ángulo de reposo. 125 p. Dissertação (Mestrado). Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Bogotá.

Kara, E. M.; Meghachou, M.; Aboubekr, N., (2013). Contribution of Particles Size Ranges to Sand Friction. *Labo. Civil Engineering e Environment (LGCE) Sidi Bel Abbes, Algeria*, Vol. 3, No. 4, 497-501.

Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, p. 653.

Krumbein, W.C., Pettijohn, F.J., 1938. *Manual of Sedimentary Petrography*. D. Appleton Century Company, Inc., New York.

Han, F., Ganju, E., Salgado, R., Prezzi, M. (2018). Effects of interface roughness, particle geometry, and gradation on the sand–steel interface friction angle. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 144, 04018096.

Hassanlourad, M., Salehzadeh, H., & Shahnazari, H. (2010). Mechanical properties of ungrouted and grouted carbonate sands. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4(4), 507–516.

Hyslip, J. P., & Vallejo, L. E. (1997). Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials. *Engineering Geology*, 48(3-4), 231–244.

Ibañez, J.P. (2008). Modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 394 p.

Jiang, M. & Yu, H.S. (2006). Application of Discrete Element Method to Geomechanics. *Springer Proceedings in Physics: Modern Trends in Geomechanics – Volume 106*, Springer, Berlin Heidelberg, Germany. pp. 241-269.

Lambe, T. W. , and Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.

Lee, S. J., Lee, C. H., Shin, M., Bhattacharya, S., & Su, Y. F. (2019). Influence of coarse aggregate angularity on the mechanical performance of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 204, 184–192.

Lees, G. (1964). “A new method for determining the angularity of particles”. *Sedimentology*.

Lees, G. (1964). “The measurement of particle shape and its influence in engineering materials”. Vol., 3, pp. 2- 21. *British Granite Whinstone Federation*.

Lei, H., Chen, Z., & Kang, X. (2022). Examination of particle shape on the shear behaviours of granules using 3D printed soil. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(9), 4200-4219.

Liu, Q. B., Xiang, W., Budhu, M., & Cui, D. S. (2011). Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 32(1), 190–197.

Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B. (1900). Evaluation of properties of rockfill materials, *J. Soil Mech. Found. Div.* 97 (SM1).

Mitchell, J.K., Soga, K., 2005. *Fundamentals of soil behavior*. Wiley, New York, p. 557.

Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M., & Toki, S. (1998). Mechanical Characteristics of Sands with Different Primary Properties. *Soils and foundations*, 38(4), 159–172. doi:10.3208/sandf.38.4_159

Neves, C. E. V., (2009). *Comportamento de materiais granulares usando o método dos elementos discretos*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

Norsyahariati, N. D. N., Hui, K. R., Juliana, A. G. A., (2016). The Effect of Soil Particle Arrangement on Shear Strength Behavior of Silty Sand. *EDP Sciences*.

Oleszko, K., Młynarczuk, M., Sitek, L., Staś, L., 2015. Application of image processing and different types of imaging devices for three-dimensional imaging of coal grains. *Eng. Geol.* 196, 286–292.

Pettijohn, F. J., 1957. *Sedimentary Rocks*. Harper and Bros., New York, 718.

Rasti, A., Adarmanabadi, H., Pineda, M., & Reinikainen, J. (2021). Evaluating the effect of soil particle characterization on internal friction angle. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*.

Rousé, P. C.; Fennin, R. J. and Shuttle, D. A. (2008). Influence of roundness on the void ratio and strength of uniform sand. *Geotechnique*. Vol. 58, No. 3, 227-231

Salot, C., Gotteland, P., & Villard, P. (2009). Influence of relative density on granular materials behavior: DEM simulations of triaxial tests. *Granular Matter*, 11(4), 221–236.

Santamarina, J.C., e Cho, G.C., (2004). *Soil Behavior: The Role of Particle Shape*, Proc. Skempton Conf., London.

Sarkar, D., König, D., Goudarzy, M., (2018). The influence of particle characteristics on the index void ratios in granular materials. *Chair of Foundation Engineering, Soil and Rock Mechanics, Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum, Germany*.

Simoni, A., & Houlsby, G. T. (2006). The direct shear strength and dilatancy of sand–gravel mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(3), 523–549.

Su, Y. F., Bhattacharya, S., Lee, S. J., Lee, C. H., & Shin, M. (2020). A new interpretation of three-dimensional particle geometry: M-A-V-L. *Transportation Geotechnics*, 23, 100328.

Tafesse, S., Fernlund, J. M. R., & Bergholm, F. (2012). Digital sieving-Matlab based 3-D image analysis. *Engineering Geology*, 137-138, 74–84.

Zong-chuan, J., (2018). Study of natural repose angle of calcareous sand and engineering application. *Rock and Soil Mechanics*: 39(7).

Zuluaga, R. A. G., (2016). *Relação entre características microestruturais e o comportamento macroscópico de solos granulares*. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

Wadell, H., 1932. Volume, Shape and Roundness of Rock Particles. *J of Geology*, 40, 443- 451.

Wei, H., Tang, X., Ge, Y., Li, M., Saxén, H., Yu, Y., (2019). Numerical and experimental studies of the effect of iron ore particleshape on repose angle and porosity of a heap. *Powder Technology*: 353 (2019), 526–534.

Wood, D.M. (2004). *Geotechnical Modelling*. Taylor & Francis, Inc., Portland, USA, 496p.