

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Danieli Klein Rodrigues

**AVALIAÇÃO DA ANGULARIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS DE  
DIFERENTES LITOLOGIAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

Santa Maria, RS  
2019



**Danieli Klein Rodrigues**

**AVALIAÇÃO DA ANGULARIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS DE DIFERENTES  
LITOLOGIAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Santa Maria, RS  
2019



Rodrigues, Danieli Klein

AVALIAÇÃO DA ANGULARIDADE DO AGREGADO MIÚDO DE  
DIFERENTES ORIGENS LITOLÓGICAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO / Danieli Klein  
Rodrigues.- 2019.

135 p.; 30 cm

Orientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2019

1. Angularidade do agregado miúdo 2. Agregado miúdo  
3 . Ensaio FAA (angularidade do agregado miúdo) I. Pinheiro, Rinaldo José  
Barbosa II. Título.



Daniell Klein Rodrigues


**AVALIAÇÃO DA ANGULARIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS DE DIFERENTES  
LITOLOGIAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 30 de agosto de 2019

  
Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

  
Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)  
(Examinador)

  
Léo Antônio Teixeira Brito, Dr. (UFRGS)  
(Examinador)

Santa Maria, RS  
2019





## **AGRADECIMENTOS**

Expresso meus agradecimentos e gratidão aos seguintes:

Ao meu orientador Rinaldo Pinheiro confiança depositada em mim, pelos ensinamentos transmitidos, pelo tempo disponibilizado à pesquisa.

Aos Professores Luciano Pivoto Specht e Lélío Antônio Teixeira Brito pela disponibilidade em fazer parte da banca examinadora, pelo tempo disponibilizado e pelos conhecimentos agregados à pesquisa.

Aos membros do grupo GEOMA: Jéssica Venturini, Elisa Porto, Juliana Scapin, Tiane Jaskulski, Ildomar Tavares, Leila Fernandes e Thaís.

Empresas de Mineração pelo fornecimento de agregado britado e disponibilidade de visitação.

Ao LMCC, PPGEC e à UFSM pelo suporte e disponibilização de equipamentos.

Aos meus pais Cláudia M. Klein Rodrigues e Amauri J. Rodrigues bem como meu irmão Bernardo Klein Rodrigues, avó Maria F. Klein e ao avô José Rodrigues por me oferecerem uma oportunidade de estudo, desviando e menosprezando quaisquer dificuldades encontradas no período destinado a pós-graduação.



## RESUMO

### AVALIAÇÃO DA ANGULARIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS DE DIFERENTES LITOLOGIAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO

AUTORA: DANIELI KLEIN RODRIGUES

ORIENTADOR: Prof. Dr. RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

Os agregados são de grande importância na composição de misturas de concreto asfálticas (CA) ocupando um volume entre 80 e 90% do volume total, onde a angularidade interfere no desempenho dos revestimentos asfálticos. A presente pesquisa busca avaliar a forma, a angularidade e a textura superficial dos agregados finos (como pó-de-pedra e areia) através da implantação do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) na Universidade Federal de Santa Maria – RS. Os agregados finos a serem utilizados são provenientes de diversas localidades do estado do Rio Grande do Sul, amostras já estudadas de agregados finos e grãos por outros pesquisadores, associando suas características físicas, esfericidade, angularidade e textura superficial e resistência ao cisalhamento direto. Iniciou-se com a implantação do equipamento e coleta dos materiais; a avaliação da angularidade dos agregados finos se obtém através do volume de vazios não compactados seguindo a normativa da ASTM C 1252/06. O ensaio de análise visual da angularidade, esfericidade e textura superficial através de microscópio e AIMS (*Aggregate Image Measurement System*), de acordo com os resultados obtidos será especificado para utilização de acordo com o volume de tráfego. A textura superficial e a angularidade dos agregados finos interfere na resistência ao cisalhamento direto os agregados de textura polida, lisa, esfericidade e arredondamento/angularidade arredondado e alongados não resistiram a tensão normal imposta. Levando em consideração apenas resultados obtidos do ensaio de FAA não podemos definir quais os agregados finos são mais adequados, para misturas asfálticas para alto volume de tráfego deve-se analisar e comparar com as análises visuais através de microscópio.

Palavras-Chave: Agregados fino; Caracterização física; Angularidade; Cisalhamento direto; Correlação linear.



## **ABSTRACT**

### **EVALUATION OF ANGULARITY OF FINE AGGREGATES OF DIFFERENT LITOLOGIES FOR PAVING**

**AUTHOR: DANIELI KLEIN RODRIGUES  
ADVISOR: PROF. DR. RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO**

Aggregates are of great importance in the composition of asphalt concrete mixtures (AC) occupying a volume between 80 and 90% of the total volume, where angularity interferes with the performance of asphalt coatings. This research aims to evaluate the shape, angularity and surface texture of fine aggregates (such as stone dust and sand) by implementing the fine aggregate angularity test (FAA) at the Federal University of Santa Maria - RS. The fine aggregates to be used come from various locations in the state of Rio Grande do Sul, samples already studied of fine and coarse aggregates by other researchers, associating their physical characteristics, sphericity, angularity and surface texture and direct shear strength. It began with the implementation of equipment and collection of materials; the evaluation of the angularity of fine aggregates is obtained through the volume of uncompressed voids following ASTM C 1252/06. The test of visual analysis of angularity, sphericity and surface texture by microscope and AIMS (Aggregate Image Measurement System) according to the obtained results will be specified for use according to the traffic volume. The surface texture and angularity of the fine aggregates interfere with the direct shear strength. The polished, smooth texture, sphericity and rounded and elongated roundness / angularity aggregates did not resist the imposed normal stress. Taking into account only results obtained from the FAA test we cannot define which fine aggregates are most suitable, for high traffic volume asphalt mixtures should be analyzed and compared with the visual analysis by microscope.

**Keywords: Fine aggregates; Physical characterization; Angularity; Direct shear; Linear correlation.**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comportamento do agregado quanto ao carregamento cisalhante .....	29
Figura 2.2 - Dilatância de duas partículas de agregado quando cisalhadas .....	31
Figura 2.3 - Esquema volume da partícula do agregado. ....	35
Figura 2.4 - Esquema da partícula superfície saturada seca. ....	36
Figura 2.5 - Ilustração da massa específica efetiva dos agregados. ....	37
Figura 2.6 - Desgaste. ....	46
Figura 2.7 - Ensaio de angularidade do agregado fino (FAA). ....	53
Figura 3.1 - Metodologia da pesquisa. ....	55
Figura 3.2 - Mapa de localização de coleta das amostras. ....	57
Figura 3.3 - Pontos de coletas rochas ígneas basalto e granito. ....	58
Figura 3.4 - Pontos de coletas rochas ígneas diabásio e mármore. ....	59
Figura 3.5 - Pontos de coletas rochas ígneas riódacito e areia. ....	60
Figura 3.6 – Conjunto de peneiras. ....	62
Figura 3.7 - Equipamento utilizado no ensaio de massa específica. ....	64
Figura 3.8 – Procedimento ensaio MEA, MER e absorção, (a) material imerso 24H; (b) material após retirado de imersão; (c) material após imersão; (d) material sendo seco com ar quente; (e) material secando; (f) teste para ver grau de umidade, continuar secando; (g) material úmido aparentemente seco; (h) material em repouso. ....	65
Figura 3.9 – Dispositivos utilizados nos ensaios para determinação da massa específica e equivalente de areia. ....	67
Figura 3.10 - Procedimento ensaio FAA, (a) equipamento; (b) agregado fino acomodado; (c) queda livre do agregado fino; (d) após a queda; (e) agregado fino rasado para pesagem; (f) pesagem do agregado. ....	69
Figura 3.11 - Frações do FAA método A, (a) passante # 8 e retido # 16; (b) passante # 16 e retido # 30; (c) passante # 30 e retido # 50 e (d) passante #50 e retido # 100. ....	70
Figura 3.12 - Graus de angularidade e esfericidade. ....	71
Figura 3.13 - Equipamento AIMS. ....	73
Figura 4.1 – Análise Granulométrica. ....	80
Figura 4.2 – Análise graduação agregados. ....	80
Figura 4.3 – Análise dos três métodos de M.E.R. (a) picnômetro x chapmann; (b) ASTM C 128 x chapmann; (c) ASTM C 128 x picnômetro. ....	84

Figura 4.4 – Análise porosidade x absorção.....	84
Figura 4.5 – Análise absorção x M.E.A.....	85
Figura 4.6 – M.E.A. e absorção agregados finos e graúdos. ....	86
Figura 4.7 – Imagem visual agregado fino de Eldorado do Sul, (a) retido # 16; (b) retido # 30; (c) retido # 50 e (d) retido # 100 (aumento 50x).....	90
Figura 4.8 – Imagem visual agregado fino Santa Antônio da Patrulha, (a) retido # 16; (b) retido # 30; (c) retido # 50 e (d) retido # 100 (aumento 50x).....	91
Figura 4.9 – Imagem visual areia natural de cava, (a) retido # 16; (b) retido # 30; (c) retido # 50 e (d) retido # 100 (aumento 50x).....	92
Figura 4.10 – Textura superficial agregados finos AIMS.....	94
Figura 4.11 – Resultados FAA método A.....	96
Figura 4.12 – FAA método A x FAA método B. ....	96
Figura 4.13 – FAA x Angularidade AIMS (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.....	98
Figura 4.14 – FAA x Textura AIMS (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.....	99
Figura 4.15 – FAA x Forma 2D AIMS (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.....	100
Figura 4.16 – FAA x Esfericidade AIMS (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.....	101
Figura 4.17 – FAA x Ângulo de atrito (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.....	102
Figura 4.18 – Ângulo de atrito x textura (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.....	103
Figura 4.19 – Resultados de FAA autor e Gouveia (2002). ....	104
Figura 4.20 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A20.....	108
Figura 4.21 – Tensão vertical x tensão cisalhante, (a) basalto ;( b) riodacito; (c) granito; (d) mármore e (e) areia. ....	109



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação de agregados .....	26
Tabela 2.2 - Especificação Superpave para o equivalente de areia .....	34
Tabela 2.3 - Frações granulométricas usadas no Método A, B e C.....	54
Tabela 2.4 - Especificação Superpave para valores mínimos da FAA (método A) ...	54
Tabela 3.1 - Localização e identificação das diferentes amostras coletadas.....	56
Tabela 3.2 - Localização e identificação das diferentes amostras coletadas.....	61
Tabela 3.3 - Frações método A ensaio FAA.....	71
Tabela 3.4 – Referencia tabela para análise. ....	71
Tabela 3.5 – Exemplo da planilha de análise esfericidade, grau de angularidade e textura superficial.....	72
Tabela 3.6 – Valores limites .....	74
Tabela 4.1 – Coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (CC). ....	81
Tabela 4.2 – Índice físicos, porosidade e massa unitária. ....	83
Tabela 4.3 – Equivalente de areia.....	87
Tabela 4.4 – Combinação das somas. ....	88
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de avaliação visual de angularidade, esfericidade e textura superficial.....	89
Tabela 4.6 – Resultados AIMS 2.....	93
Tabela 4.7 – Resultados ensaios de FAA. ....	95
Tabela 4.8 – Resultados ensaios de Cisalhamento Direto. ....	106
Tabela 4.9 – Resultados ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão (c). ....	107



## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

AASHTO = American Association of State Highway and Transportation.

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AIMS = Aggregate Image Measurement System.

ASTM = American Society of Testing and Materials.

CA = Cimento Asfáltico.

CAP = Cimento Asfáltico de Petróleo.

Cc = Coeficiente de Curvatura.

CNT = Confederação Nacional de Transporte.

CU = Coeficiente de Uniformidade.

COPPE = Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.

DAER = Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem.

DNER = Departamento Nacional de Estradas e Rodagem.

DNIT = Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

FAA = Angularidade do Agregado Fino.

FHWA = Federal Highway Administration.

GEPPASV = Grupo de

LCMM = Laboratório de Matérias de Construção Civil.

M.E.A = Massa Específica Aparente.

M.E.R = Massa Específica Real.

MPD = Profundidade de Média do Perfil.

MTD = Profundidade de Textura Média.

NBR = Norma Brasileira.

R = Coeficientes De Correlação.

R<sup>2</sup> = Coeficiente de Determinação.

SHRP = Strategic Highway Research Program.

UFES = Universidade Federal de Santa Maria.

VAM = Vazios do Agregado Mineral.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1	OBJETIVOS .....	24
1.1.1	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>24</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>25</b>
2.1	AGREGADOS .....	25
2.1.1	<b>Produção de agregados.....</b>	<b>28</b>
2.1.2	<b>Comportamento do Agregado Mineral.....</b>	<b>29</b>
2.2	PROPRIEDADES DOS AGREGADOS .....	32
2.2.1	<b>Propriedades físicas dos agregados .....</b>	<b>32</b>
2.2.1.1.	<i>Forma, angularidade e textura da partícula.....</i>	<i>32</i>
2.2.1.2.	<i>Limpeza e materiais deletérios.....</i>	<i>33</i>
2.2.1.3.	<i>Massa específica .....</i>	<i>34</i>
2.2.1.3.1.	<i>Massa especifica real.....</i>	<i>34</i>
2.2.1.3.2.	<i>Massa especifica aparente .....</i>	<i>35</i>
2.2.1.3.3.	<i>Massa especifica efetiva .....</i>	<i>36</i>
2.2.1.4.	<i>Absorção.....</i>	<i>37</i>
2.2.1.5.	<i>Granulometria.....</i>	<i>37</i>
2.2.1.6.	<i>Tamanho máximo do agregado.....</i>	<i>39</i>
2.2.1.7.	<i>Dureza e resistência à abrasão .....</i>	<i>39</i>
2.2.1.8.	<i>Durabilidade e sanidade .....</i>	<i>40</i>
2.2.2	<b>Mineralogia dos agregados .....</b>	<b>41</b>
2.3	A IMPORTÂNCIA DOS AGREGADOS NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS.....	42
2.3.1	<b>Deformação permanente .....</b>	<b>43</b>
2.3.2	<b>Desgaste .....</b>	<b>45</b>
2.3.3	<b>Trincas por fadiga .....</b>	<b>46</b>
2.3.4	<b>Resistência à derrapagem .....</b>	<b>47</b>
2.4	ESPECIFICAÇÃO SUPERPAVE, ANGULARIDADE E TEXTURA DOS AGREGADOS FINOS .....	48
2.4.1	<b>Método superpave.....</b>	<b>48</b>
2.4.2	<b>Angularidade do agregado fino.....</b>	<b>49</b>
2.4.2.1.	<i>Ensaio de angularidade do agregado fino (FAA).....</i>	<i>51</i>

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
3.1	DEFINIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	55
3.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	61
3.2.1	Ensaio de caracterização física .....	61
3.2.1.1.	<i>Granulometria</i> .....	61
3.2.1.2.	<i>Massa unitária</i> .....	62
3.2.1.3.	<i>Ensaio de absorção, massa específica aparente e real</i> .....	63
3.2.1.4.	<i>Equivalência de areia</i> .....	67
3.2.2	Ensaio de Angularidade agregado fino (FAA) .....	68
3.2.3	Avaliação visual esfericidade, angularidade e textura dos agregados finos.....	68
3.2.4	Ensaio de AIMS.....	73
3.2.5	Ensaio de cisalhamento direto .....	75
3.2.6	Análise de resultados.....	77
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
4.1	ANÁLISE E DISCUÇÃO DOS ENSAIOS DA CARACTERIZAÇÃO.....	79
4.1.1	Análise Granulometria.....	79
4.1.2	Índice físicos e massa unitária .....	82
4.1.3	Equivalente de areia .....	87
4.1.4	Avaliação visual esfericidade, angularidade e textura.....	88
4.1.5	AIMS .....	92
4.1.6	Ensaio de Angularidade do Agregado Fino .....	94
4.1.7	Cisalhamento Direto .....	104
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO DE PESQUISAS .....</b>	<b>112</b>
	REFERÊNCIAS.....	113
	ANEXO A.....	117
	ANEXO B.....	124
	APÊNDICE A.....	125

## 1 INTRODUÇÃO

A humanidade procura aprimorar cada vez mais suas técnicas de construção de estradas, buscando mais conforto e segurança, onde hoje as rodovias brasileiras encontram-se em elevado estado de degradação. A deformação permanente e o trincamento por fadiga destacam-se como os principais mecanismos de deterioração dos pavimentos rodoviários brasileiros.

A solução destes problemas não dependem só do método de dosagem, mas também da utilização de agregados capazes de suportar as tensões impostas pelo tráfego. Os agregados finos tem grande interferência na resistência as tensões as quais os pavimento são submetidos.

De acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado é um material sem forma ou volume definidos, geralmente inertes, com dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto, sendo classificados com base em sua obtenção como agregados naturais ou artificiais.

A caracterização e as propriedades de origem dos agregados miúdos/finos é de grande importância para identificação do material granular, a ser utilizado nas misturas asfálticas. Onde o agregado miúdo/fino através de sua granulometria corresponde junto com as demais granulometrias pela maior parte da resistência à deformação permanente (resistência ao cisalhamento) das misturas asfálticas, por isso, é de suma importância conhecer a granulometria, forma, angularidade e a textura superficial das partículas.

Já se sabe que grãos mais cúbicos têm melhor intertravamento na mistura e que grãos alongados ou lamelares fazem com que a área de contato grão-grão seja menor.

O grupo de pesquisa GEPPASV estuda já a algum tempo os agregados e misturas asfálticas tendo um banco de dados sobre o comportamento do intertravamento referente a forma e angularidade dos grãos a serem utilizados. Devido os agregados finos serem materiais naturais e heterogêneos podem apresentar elevada variabilidade e magnitude do conjunto forma, angularidade e textura superficial.

Por fim a especificação SUPERPAVE adota o ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA, *Fine Aggregate Angularity*) para avaliar a forma, a angularidade e a textura superficial dos agregados através do volume de vazios não compactados.

Sendo de suma importância o conhecimento destes fatores para misturas asfálticas, devido que alguns agregados possuem grande número de partículas alongadas e angulares consideradas não apropriadas para utilização em misturas asfálticas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a forma, a angularidade e a textura superficial dos agregados finos (como pó-de-pedra e areia) através do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) para utilização em misturas de concreto asfáltico (CA) no estado do Rio Grande do Sul.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Com o intuito de atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterização física e especificação mineralógica dos agregados finos;
- b) Avaliação da massa específica real por diferentes determinações/ensaios;
- c) Confecção do equipamento para o ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) conforme a ASTM C 1252, na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM);
- d) Avaliação microscópica da forma, angularidade e textura superficial dos agregados finos;
- e) Avaliação da angularidade, esfericidade e textura superficial através do ensaio AIMS (*Agregate Image Measurement System*);
- f) Avaliação da resistência ao cisalhamento direto dos agregados finos.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas as definições, classificações, aspectos normativos, a importância dos agregados no desempenho do pavimento, entre outros aspectos relativos aos agregados finos utilizados em misturas asfálticas. O conteúdo apresentado nesse capítulo serviu de suporte para realização da parte experimental da pesquisa.

### 2.1 AGREGADOS

Os agregados são de grande importância na composição de misturas de concreto asfáltico (CA), onde misturas são compostas por partículas de agregados graúdos e miúdo/finos, ligante asfáltico, vazios e em alguns casos de complementos. O volume ocupado pelas partículas de agregados representa entre 80 e 90% do volume total das misturas e, portanto, têm grande influência no seu comportamento global (PAZOS, 2015).

Conforme a NBR 9935 (ABNT, 2011), que determina a terminologia dos agregados, define-o como um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassas ou concretos. Com dimensão nominal máxima inferior a 75 mm e dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm.

São classificados em três grupos quanto a natureza, tamanho e distribuição de grãos: são denominados agregados naturais todos oriundos da natureza obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e drenagem, como as areias, os pedregulhos, as britas e os seixos, oriundos das rochas; os agregados artificiais são resíduos de processos industriais, como a escória de alto-forno e aciaria e os agregados reciclados são resíduos como pneus inservíveis, material da fresagem de revestimento asfáltico e o resíduo de construção e demolição (BERNUCCI et al., 2006).

Também são classificados quanto ao tamanho em graúdo, miúdo (fino) e material de enchimento ou fíler. O DNER-EM 38/97 define como fíler o material cujos grãos passam pelo menos 65% na peneira com abertura de malha de 0,075 mm, e os agregados finos cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,8mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,075 mm. O DNER-EM 037/97

descreve como agregados graúdos cujos grãos passam na peneira da malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

A NBR 7211 (ABNT, 2005) especifica agregado graúdo o material passante na peneira de malha 75 mm e retido na peneira de malha 4,8 mm; agregados finos o material passante na peneira 4,8 mm e retido na peneira de malha 0,075 mm e filer todo o material que passa na peneira de malha 0,075 mm.

Segundo o Instituto do Asfalto (1989) o agregado graúdo é o material retido na peneira com abertura de malha igual a 2,36 mm, o agregado fino/miúdo é o material que passa na peneira com abertura de malha de 2,36 mm, e o filer mineral é o material que tem pelo menos 70% passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm. A Tabela 2.1 apresenta a classificação de acordo como cada instituição separa os agregados em filer, fino e graúdo.

Tabela 2.1 - Classificação de agregados

<b>Classificação</b>	<b>Instituto do Asfalto</b>	<b>DNIT</b>	<b>ABNT</b>
Fíler Mineral	< 0,075mm	< 0,075mm	< 0,075mm
Agregado Fino	Entre 0,075mm e 2,36mm	Entre 0,075mm e 4,8mm	Entre 0,075mm e 4,8mm
Agregado Graúdo	> 2,36mm	> 4,8mm	> 4,8mm

Fonte: Nogueira (2008)

A distribuição de grãos refere-se a distribuição granulométrica dos agregados que é por sua vez subdividida em: graduação densa ou bem-graduada que ocorre quando apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à densidade máxima; graduação aberta é aquela que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material menor que 0,075 mm, resultando em um maior volume de vazios; graduação uniforme é aquela que apresenta a maioria de sua partículas com tamanho em uma faixa bastante estreita e, por fim a graduação com degrau ou descontínua é aquela que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários.

As rochas que dão origem aos agregados naturais se dividem em três grupos: ígneas ou magmáticas, sedimentares e metamórficas. As rochas ígneas ou magmáticas provem da consolidação do magma, tendo uma granulação muito variável, podendo ter os minerais, desde decímetros de tamanho até fração de milímetros (LEINZ, 1963).

De acordo com o local de resfriamento do magma, define-se dois tipos de rochas ígneas: as rochas ígneas plutônica ou hipoabissal que surge através do resfriamento dentro da crosta terrestre, com presença de minerais de tamanho médio a muito grosseiros (textura fanerítica), resultando em rochas granitos, sienitos e dioritos. Se o magma chegar até a superfície, ocorrerá o fenômeno do vulcanismo, com resfriamento rápido pôr a lava estar na atmosfera, demonstrando tamanhos que variam de fino a muito fino, dificilmente identificados a olho nu (textura afanítica). Deste resfriamento resultam as rochas riólitos, dacitos, andesitos, basaltos e vidros vulcânicos (MACIEL FILHO et al., 2014).

A rochas ígneas são classificadas de acordo com o tamanho dos grãos dos cristais e de sua composição ácida ou básica. Os grãos de cristais são classificados como grossos se tiverem tamanho maior que 2 mm e finos quando menores que 0,2 mm. O granito e o riólito são exemplos de rochas ácidas com grãos de cristais grossos e finos respectivamente. O gabro é um exemplo de rocha básicas com grãos grossos. O diabásio e o basalto são exemplos de rochas básica com grãos finos (GOUVEIA, 2002). O granito e basalto apresentam resistências mecânicas altas, devido à forte coesão dos minerais constituintes.

As rochas sedimentares são resultantes da consolidação de sedimentos, ou seja, partículas minerais provenientes da desagregação e do transporte de rochas preexistentes (como os arenitos, os siltitos e os argilitos), ou da precipitação química, ou ainda, de ação biológica (rochas calcárias e carbonosas). Essas rochas são conhecidas como rochas brandas, pois em geral, apresentam baixas resistências mecânicas e, muitas vezes, são friáveis, devido à menor coesão dos minerais constituintes (OLIVEIRA et al., 1998).

As rochas metamórficas são originadas através da transformação de rochas sedimentares, ígneas ou até mesmo metamórficas, preexistentes, que sofrem alguma alteração de temperatura e pressão. As rochas de composições mineralógicas diferentes (por exemplo, calcários, folhelhos, basaltos) irão apresentar mineralogia diversa, mesmo quando submetidas a ações metamórficas semelhantes (OLIVEIRA et al., 1998). Dentre as rochas metamórficas, o mármore é um dos exemplos mais comuns.

### 2.1.1 Produção de agregados

As características físicas dos agregados como resistência, abrasão e dureza são determinadas pela rocha de origem. Entretanto, o processo de produção nas pedreiras produz efeitos expressivos na qualidade dos agregados, pela eliminação das camadas mais fracas da rocha e pelo efeito da britagem, que altera a forma e a graduação do agregado (MARQUES, 2001 apud BERNUCCI et al., 2006).

Normalmente as pedreiras têm uma camada de material alterado que deve ser removido antes da rocha sã ser encontrada. Esse material alterado consiste tipicamente de solo e rocha decomposta. A linha de demarcação entre a rocha sã e rocha alterada é, na maioria das vezes, difícil de ser estabelecida. É muito importante eliminar qualquer alteração de rocha antes de se extrair a rocha sã.

A extração da rocha é feita normalmente através do desmonte com a utilização de explosivos até as profundidades, quantidades e extensões que não prejudiquem a estabilidade do maciço ou provoquem danos ao mesmo fora dos limites do desmonte. A rocha sã, retirada do chão da pedreira após o desmonte, é transportada para britagem. Durante as operações de britagem a uma série de britadores, pulverizadores e unidades de peneiras de diferentes tamanhos.

A redução mecânica envolve quatro diferentes tipos mecânicos de britagem: impacto, atrito, cisalhamento e compressão. O britador pode utilizar as quatro combinações mecânicas. O impacto se refere à colisão instantânea de um objeto contra outro, utilizando-o como um dos mecanismos para redução de tamanho, podendo ser por gravidade ou dinâmico. No desgaste por atrito ocorre a trituração do material por uma ação de desgaste entre duas superfícies duras. Os martelos de tritular, os britadores giratórios e os de cones usam esse tipo de método de redução.

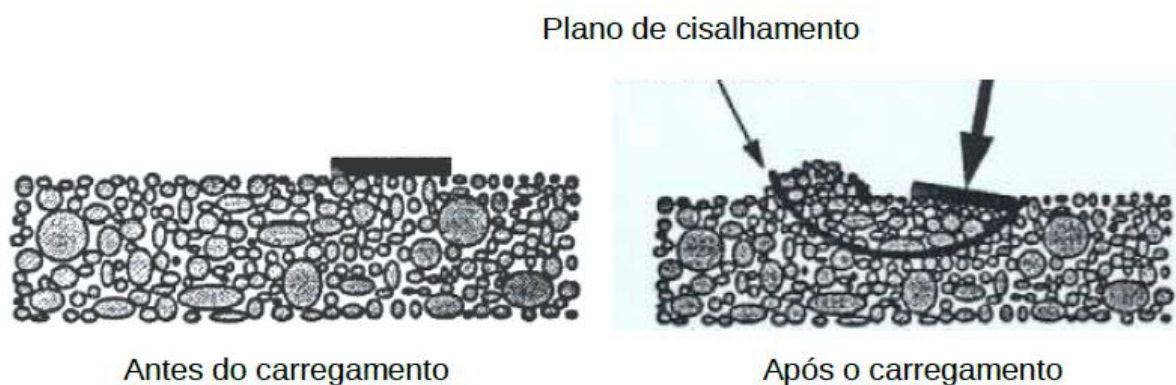
O cisalhamento ocorre pela ação de um aparador ou talhador tal como aquele produzido por um simples rolo triturador. É normalmente utilizado em combinação com impacto e compressão. A compressão refere-se à redução mecânica por forças compressivas entre duas superfícies. Britadores de mandíbula usando compressão, são os mais efetivos sistemas para reduzir o tamanho de partículas maiores de rochas muito duras e abrasivas. O tipo de rocha a ser processada tem uma influência significativa na escolha do equipamento de britagem a ser usado (BERNUCCI et al., 2006).

### 2.1.2 Comportamento do Agregado Mineral

Os pavimentos constituídos em concreto asfáltico não devem deformar-se ou deslocar-se quando sujeitos à ação do tráfego. Nos períodos de calor e altas temperaturas, quando a viscosidade do cimento asfáltico é baixa, a carga do tráfego é suportada principalmente pela estrutura do agregado mineral. Espera-se que o agregado seja resistente (duro e durável) e que forme um esqueleto mineral que suporte às aplicações de cargas repetidas.

Os agregados angulares ásperos/rugosos possuem maior intertravamento se comparados aos agregados arredondados e lisos, devido ao atrito entre as partículas. Já os agregados arredondados tendem a deslizar uns sobre os outros e, quando submetidos a uma carga, tendem a cisalhar ocorrendo assim a deformação permanente no pavimento (Figura 2.1), onde os agregados são responsáveis pelo esqueleto mineral. Por outro lado as partículas arredondadas possuem uma melhor trabalhabilidade (MOTTA et al., 1996).

Figura 2.1 - Comportamento do agregado quanto ao carregamento cisalhante



Fonte: Motta et al. (1996)

O método mais simples, mais antigo e mais comum para investigar a resistência de agregados ao cisalhamento é chamado de ensaio de cisalhamento direto ou ensaio de cisalhamento.

O comportamento cisalhante de um agregado é analisado através da teoria de Mohr-Coulomb. A resistência de um material granular pétreo é atribuída a duas fontes. Uma delas deve-se ao atrito, que por sua vez se compõe de duas parcelas: a primeira é devida ao deslizamento e a outra é devida ao rolamento das partículas, umas sobre

as outras. A segunda fonte de contribuição refere-se a uma parcela de resistência estrutural representada pelo arranjo das partículas (BUENO E VILAR, 1985 apud GOUVEIA, 2002). A equação de Mohr-Coulomb usada na descrição da resistência ao cisalhamento de um material é:

$$\text{Onde:} \quad \tau = c + \sigma * tg\theta \quad (2.1)$$

$\tau$  = Resistencia ao cisalhamento;

$c$  = Intercepto de coesão;

$\sigma$  = Tensão normal ou confinante;

$\theta$  = Ângulo de atrito interno.

Ao analisar a equação 2.1 verifica-se que a resistência ao cisalhamento de um agregado está em função do atrito interno, oriundo dos agregados e da tensão normal a que os agregados estão sujeitos. Ao aplicar uma tensão normal sobre uma mistura de agregados, a massa de agregados tende a se tornar mais rígida, ou seja, a resistência ao cisalhamento é aumentada e o ângulo de atrito interno indica a habilidade do agregado intertravar-se, criando um esqueleto de agregados mais resistente.

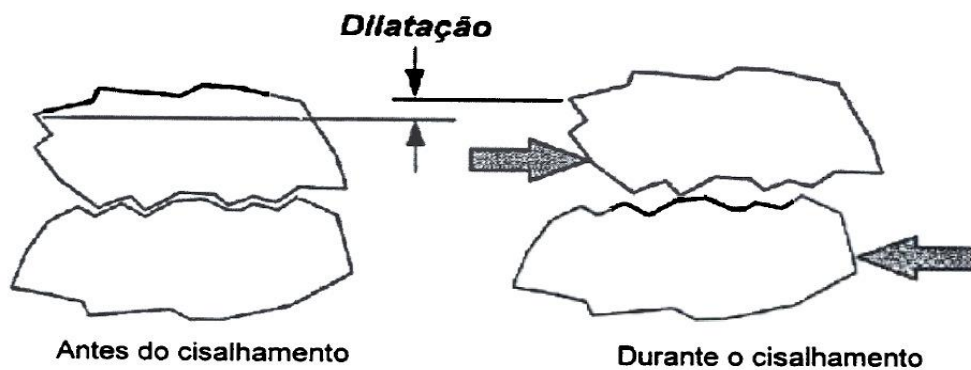
Para materiais granulares ensaiados numa mesma compactidade e com a mesma orientação das partículas, o ângulo de atrito é constante. Para um material granular solto, o ângulo de atrito interno é aproximadamente igual ao ângulo de repouso, definido como ângulo entre a horizontal e a inclinação de um montículo produzido pelo derramamento do material granular seco, de uma pequena altura. O aumento do grau de compactidade dos materiais granulares faz com que o ângulo de atrito também aumente.

Outra questão importante que deve ser entendida sobre os agregados é a dilatância. Quando um esqueleto de agregados é submetido a uma tensão cisalhante, as partículas de agregados tendem a quebrar ou a sobrepor-se uma sobre as outras aumentando assim seu volume como pode ser visto na Figura 2.2 (MOTTA et al. , 1996).

O valor  $c$  é denominado coesão do agregado, podendo ser nula, aparente ou verdadeira. Ela é nula quando apresenta-se em seu estado seco e livre de qualquer material cimentante. Agregados úmidos geralmente exibem uma parcela de

resistência devido à capilaridade que origina pressões neutras negativas. Essa parcela de resistência é conhecida como coesão aparente. Essa coesão aparente é circunstancial e desaparece quando o material é totalmente saturado. Os principais fatores que interferem nessa atração inter-partículas são o grau de saturação e o tamanho das partículas. Existem agregados que apresentam uma coesão verdadeira. Esses materiais apresentam em seus pontos de contato algum cimentante, como óxidos de ferro ou cimentos calcários. O ângulo de atrito interno de um agregado cimentado ou de um agregado úmido é aproximadamente igual ao do mesmo agregado, com o mesmo índice de vazios, no estado sem coesão (GOUVEIA 2002).

Figura 2.2 - Dilatância de duas partículas de agregado quando cisalhadas



Fonte: Motta et al. (1996)

As características principais que interferem na resistência ao cisalhamento dos agregados são a compactidade, o tamanho, a forma, a angularidade, a textura superficial dos grãos e a granulometria.

A influência da compactidade pode ser percebida quando os materiais granulares mais compactos apresentam maior resistência que os materiais granulares fofos. Quanto ao tamanho das partículas, tem-se observado que materiais granulares grossos apresentam maiores ângulos de atrito do que os materiais finos. Materiais granulares compostos de grãos angulares evidenciam maiores ângulos de atrito do que materiais granulares de grãos menos angulares; partículas mais rugosas mostram maiores ângulos de atrito do que partículas mais lisas. A granulometria dos agregados interfere da mesma forma que a compactidade (BUENO E VILAR, 1985 apud GOUVEIA 2002).

## 2.2 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

As propriedades dos agregados usados em misturas asfálticas são de suma importância para o bom desempenho dos pavimentos. Os defeitos nos pavimentos como o desgaste e a deformação permanente podem ser atribuídos diretamente aos agregados usados.

A caracterização dos agregados pode ser avaliada através de índices físicos e químicos. A correta utilização das rochas requer o conhecimento prévio de suas propriedades, pois apresentam grande diversidade. As propriedades físicas principais dos agregados são granulometria, massa específica, forma de partícula, textura da superfície, durabilidade, limpeza e resistência a absorção

A quantificação de forma, angularidade e textura superficial é importante, pois são necessários pavimentos de alta qualidade para atender aumentos no volume e na carga de tráfego.

### 2.2.1 Propriedades físicas dos agregados

#### 2.2.1.1. *Forma, angularidade e textura da partícula*

Há anos vem se estudando o desempenho dos pavimentos, e têm-se notado que a forma, a angularidade e a textura superficial das partículas dos agregados minerais afetam a resistência e influenciam na trabalhabilidade, estabilidade e consumo de CAP, sendo que partículas angulares requerem uma maior quantidade.

Os agregados obtidos por processos de fragmentação mecânica de rochas (britagem), resultam em formas e tamanhos variados, pois a estrutura da rocha, além das condições de britagem, exerce influência marcante na forma dos fragmentos (OLIVEIRA E BRITO, 1998).

A forma do grão do agregado é uma das características que mais influenciam o desempenho das misturas asfálticas, a forma ideal a ser utilizada é a cúbica. Grãos alongados tendem a dificultar a compactação da mistura e a quebrar-se, alterando a granulometria inicial, comprometendo o comportamento da mistura asfáltica. Agregados com forma cúbica produzem misturas mais resistentes, mais trabalháveis e menor índice de vazios (LEAL, 2013).

A textura superficial rugosa tende a aumentar a resistência da mistura e pede uma maior quantidade de material asfáltico para compensar a perda de



trabalhabilidade. Os materiais com superfícies lisas, como os seixos de rios, são costumeiramente submetidos a processos de britagem a fim de produzir uma superfície rugosa, mais propícia na pavimentação.

A forma, a angularidade e a textura da partícula da fração grossa dos agregados são mais críticas em misturas asfálticas de graduação aberta do que em misturas de graduação densa. A utilização de agregados grossos de formas arredondadas e lisas, não a intertravamento adequado entre suas partículas, tendendo assim a escorregar umas sobre as outras, o que torna a mistura pouco estável e com menor resistência ao cisalhamento (GOUVEIA, 2002).

A forma e/ou angularidade e/ou textura superficial da partículas de agregado grosso pode ser determinado através dos ensaios de Índice de Forma e Textura das Partículas de Agregados (ASTM D 3398), Partículas Planas e Alongadas em Agregados Grossos (ASTM D 4791), Porcentagem de Partículas Fraturadas para Agregados Grossos (ASTM D 5821). Para avaliação dos agregados finos quanto à forma, angularidade e textura superficial são utilizados os ensaios de Índice de Forma e Textura das Partículas de Agregados (ASTM D 3398) e Vazios não Compactados do Agregado Fino (ASTM C 1252).

#### *2.2.1.2. Limpeza e materiais deletérios*

A limpeza refere-se à ausência de certos materiais externos ou materiais deletérios, que tornam os agregados impróprios para o uso. A lavagem dos agregados tende a reduzir a quantidade imprópria de material deletério para níveis aceitáveis. Geralmente, materiais deletérios incluem vegetação, partículas leves, torrões de argila, camada de argila aderida às partículas de agregados e algumas vezes excesso de poeira resultante da operação de britagem. Essa propriedade é medida pelo ensaio de equivalente de areia descrito pela NBR 12052 (ABNT, 1992).

O ensaio de equivalente de areia separa as partículas mais finas dos grãos maiores ou das areias, por meio de agitação energicamente a amostra de agregados miúdos, de modo a soltar as partículas de argilominerais ou da fração argilosa do agregado, aderidas a superfície. O material argiloso é forçado a formar uma suspensão sobre o material granular e após um período de sedimentação é medida a altura de argila suspensa e da areia sedimentada, determinando-se a relação entre volumes de areia e de argila.

Segundo Gouveia (2006), o método SUPERPAVE estabelece alguns valores mínimos para o resultado obtido do ensaio de equivalente de areia conforme o aumento do volume de tráfego, sendo indiferente quanto à camada do pavimento na qual o agregado será utilizado. A Tabela 2.2 mostra que o valor de 50% é especificado como o mínimo admissível para rodovias com volume de tráfego alto e para rodovias com volume de tráfego médio e baixo são especificados os valores mínimos de 45% e 40%. No Brasil, o valor mínimo do equivalente de areia é de 55% para qualquer volume de tráfego (MOTTA et al., 1994 apud GOUVEIA, 2006).

Tabela 2.2 - Especificação Superpave para o equivalente de areia

<b>Tráfego N = 10<sup>6</sup></b>	<b>Equivalente de areia mínimo %</b>
< 0,3	40
< 1	40
< 3	40
< 10	45
< 30	45
< 100	50
≥ 100	50

Fonte: Bernucci et. al. (2006)

### 2.2.1.3. Massa específica

A massa específica se refere ao volume de material sólido, e pode ser definida como a relação entre a massa do sólido e o volume. Utilizada nos cálculos das propriedades das misturas asfálticas. Essas massas específicas são: massa específica real; massa específica aparente e massa específica efetiva.

#### 2.2.1.3.1. Massa específica real

A massa específica real é determinada através da relação entre a massa seca, em estufa, pelo volume das partículas do agregado adicionado do volume dos poros impermeáveis ou poros internos (expressão 2.2). Esse volume não inclui o volume de qualquer poro ou capilar que encontrar-se preenchido com água após 24 horas de imersão (Figura 2.3).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s X \rho_w} \quad (2.2)$$

Onde:

$\rho_s$  = Massa específica real;

$m_s$  = Massa dos sólidos, seca;

$V_s$  = Volume dos sólidos;

$\rho_w$  = Massa específica da água;

Figura 2.3 - Esquema volume da partícula do agregado.



Fonte: Bernucci et al. (2006)

#### 2.2.1.3.2. Massa específica aparente

A massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco, em estufa, pelo volume ocupado por esse agregado incluindo os poros impermeáveis e do volume dos poros preenchidos com água após 24 horas de imersão (expressão 2.3). É medida quando o agregado está na condição superfície saturada seca (Figura 2.4).

$$\rho_{ap} = \frac{m_s}{(V_s + V_{pp}) \rho_w} \quad (2.3)$$

Onde:

$\rho_{ap}$  = Massa específica aparente;

$m_s$  = Massa dos sólidos, seca;

$V_s$  = Volume dos sólidos;

$V_{pp}$  = Volume dos poros preenchidos com água;

$\rho_w$  = Massa específica da água;

Figura 2.4 - Esquema da partícula superfície saturada seca.



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

#### 2.2.1.3.3. Massa específica efetiva

A massa específica efetiva é determinada quando se trabalha com misturas asfálticas cujo teor de ligante é conhecido. É a razão da massa seca, em estufa, pelo volume total das partículas (volume das partículas do agregado adicionado do volume dos vazios impermeáveis e do volume dos poros preenchidos com água após 24 horas de imersão), menos o volume dos poros que absorvem asfalto (expressão 2.4).

$$\rho_e = \frac{m_s}{(V_s + V_{pp} - V_{pa}) \rho_w} \quad (2.4)$$

Onde:

$\rho_e$  = Massa específica efetiva;

$m_s$  = Massa dos sólidos, seca;

$V_s$  = Volume dos sólidos;

$V_{pp}$  = Volume dos poros preenchidos com água;

$V_{pa}$  = Volume dos poros que absorveram asfalto;

$\rho_w$  = Massa específica da água;

A densidade efetiva do agregado na mistura leva em conta a absorção de asfalto pelo agregado (Figura 2.5). A densidade efetiva é igual ou maior que a densidade aparente e igual ou menor que a densidade real. Quando a absorção do agregado é zero, todas as densidades descritas aqui são teoricamente iguais.

Figura 2.5 - Ilustração da massa específica efetiva dos agregados.



Fonte: Roberts et al. (1991) apud Gouveia (2002)

#### 2.2.1.4. Absorção

A absorção é a penetração de líquido dentro das partículas de agregado, que resulta em um aumento do peso da partícula, podendo ter uma variação de zero a mais de 30% do seu peso seco dependendo do tipo do agregado. É determinada em função da diferença de pesos, expressos em percentagem, onde a amostra é mergulhada em água por 24 horas e depois seca em estufa, até a constância do peso.

Devendo ser evitado a utilização de agregados com alta absorção, pois aumenta-se a quantidade necessária de cimento asfáltico. Agregados com absorção menor que 1%, minimizam a quantidade de cimento asfáltico necessário na mistura.

#### 2.2.1.5. Granulometria

Granulometria é a separação das frações do agregado em zonas ou graduações de acordo com o tamanho das partículas constituintes da amostra, expressa em percentagem do peso ou do volume total da mistura, é prática padrão expressá-la como uma percentagem de peso e é representada por uma curva de distribuição granulométrica desde a mais graúda partícula a mais fina.

A determinação da granulometria é através das análise de peneiramento, que consistem em passar o material através de uma série de peneiras empilhadas com tamanhos progressivos, da maior abertura para a menor e pesar o material retido em cada peneira. A análise por peneiramento a seco segue as especificações da norma ABNT NBR NM 248/2003 ou DNER-ME 83/98.

Também a análise por peneiramento com lavagem, para a determinação da percentagem de material passante na peneira nº 200 (0,075 mm) especificada pela norma ASTM C 117. A análise por peneiramento com lavagem é mais precisa, mas o

método a seco é mais rápido e mais usada para determinar a granulometria dos agregados.

A granulometria dos agregados é considerada a propriedade mais importante, pois afeta diretamente as principais propriedades das misturas asfálticas, são elas: a flexibilidade, a estabilidade, a durabilidade, a impermeabilidade, a resistência a fadiga e a resistência à derrapagem (SILVA, 2005). Por isso, a graduação é a primeira preocupação no projeto de um concreto asfáltico e a maioria dos órgãos especifica tolerâncias para a graduação.

Muitas pesquisas foram realizadas para encontrar uma maneira de determinar a granulometria ideal. Uma das mais conhecidas é a da curva de Fuller que propôs a obtenção da curva de densidade máxima da mistura, através da equação 2.5 apresentada a seguir (GOUVEIA, 2006):

$$P = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^n \quad (2.5)$$

Onde:

$P$  = Porcentagem passante total;

$d$  = Diâmetro da peneira em questão;

$D$  = Tamanho máximo do agregado.

Goode e Lufsey (1962 apud Moura, 2010) propuseram uma relação matemática para verificar os vazios existentes entre os agregados de maior e menor tamanho, baseado na curva de Fuller. Entretanto, notaram que se a composição granulométrica de uma dada mistura asfáltica corresponde ao expoente de 0,5, proposto inicialmente por Fuller, essa mistura pode apresentar um baixo VAM, o que não assegura um volume de vazios e/ou um teor de ligante asfáltico satisfatório para imprimir durabilidade à mistura asfáltica. A *Federal Highway Administration* - FHWA recomenda o uso da potência de 0,45 para avaliar o ajuste da graduação.

Goode e Lufsey (1962 apud Moura, 2010) concluiu que graduações plotadas na carta de linha de densidade máxima com potência de 0,45, apresentam VAM satisfatório e com uma quantidade de ligante asfáltico suficiente que resulte em 4% de volume de vazios, essa mistura apresentará um bom desempenho mecânico.

#### *2.2.1.6. Tamanho máximo do agregado*

O tamanho máximo do agregado e sua graduação são controlados por especificações que prescrevem a distribuição granulométrica a ser usada para uma determinada aplicação. Por exemplo, a espessura mínima de execução de uma camada de concreto asfáltico determina diretamente o tamanho máximo do agregado usado nessa mistura asfáltica (BERNUCCI et al, 2006).

A ASTM C 125 define o tamanho máximo do agregado em uma de duas formas: o tamanho máximo é a menor abertura de malha de peneira através da qual passam 100% das partículas da amostra de agregado e o tamanho nominal máximo é a maior abertura de malha de peneira que retém alguma partícula de agregado, mas não mais de 10% em peso.

A norma do DNIT 31 - ES (2006), especifica que o tamanho máximo do agregado da faixa adotada deve ser inferior a 2/3 da espessura da camada a ser compactada. Nos últimos anos, tem-se aumentado o uso de misturas com agregados de maior graduação para minimizar o potencial de deformação permanente na mistura. O uso de agregados de tamanhos maiores aumenta a concentração de agregados na mistura. Entretanto, o uso de um tamanho nominal máximo de agregados maiores que 25 mm, frequentemente resulta em misturas mais "duras", que tendem a segregar durante a execução. Devido a isso, uma atenção especial deve ser dada ao projeto da mistura, à espessura da camada, à manipulação do material, à produção da mistura e aos procedimentos de pavimentação quando essas misturas forem usadas.

#### *2.2.1.7. Dureza e resistência à abrasão*

Os agregados através do atrito interno transmitem as cargas de rodas para as camadas subjacentes, também devem ser resistentes à abrasão, a degradação e ao polimento devido ao tráfego. Eles também estão sujeitos à quebra e à abrasão durante sua produção, transporte e compactação das misturas asfálticas. Devendo ser tenazes e duros para resistir ao processo de britagem, além da degradação e desintegração quando estocados, manipulados através de algum equipamento durante a produção de uma mistura asfáltica, espalhados no pavimento, compactados com rolos e até mesmo quando solicitados no pavimento (PEREIRA, 2010).

Os agregados que não possuem dureza e resistência à abrasão adequadas podem causar problemas durante a construção e ao desempenho do pavimento. A degradação que ocorre durante o processo de produção da mistura asfáltica pode afetar toda a granulometria. O ensaio mais utilizado para medição do desgaste de um agregado é o ensaio de Los Angeles.

A norma DNER-ME 35/98 descreve o ensaio de Abrasão Los Angeles que mede o desgaste de um agregado por abrasão, através da máquina Los Angeles. Este ensaio reproduz o impacto na amostra através da queda das esferas de aço sobre os agregados e da queda dos próprios agregados, uns sobre os outros, e simula o desgaste por meio do atrito dos agregados entre si e com as paredes do tambor enquanto gira. O tambor gira à velocidade de 30 a 33 rpm, até completar-se o número as revolução especificados. Após o término o material é retirado do tambor, peneirado e pesado. O resultado do ensaio é a porcentagem em peso do material grosso perdido durante o ensaio, resultado da degradação mecânica. Aceitando valores de Abrasão Los Angeles  $\leq 50\%$ .

#### *2.2.1.8. Durabilidade e sanidade*

Os pavimentos sofrem com a ação das intempéries, os agregados também devem ser resistentes a quebra ou desintegração quando sujeitos ao umedecimento e secagem e/ou congelamento e degelo. Se a cobertura de cimento asfáltico permanecer intacta, perante os ciclos de intemperismo, a mistura também não será afetada significativamente. Entretanto, se houver alguma degradação da mistura durante a construção, a água pode penetrar nas partículas de agregados. Assim, as partículas frágeis e fracas que se quebram durante a compactação ou um descolamento da mistura são um acesso fácil para a água (WU et al., 1998 apud GOUVEIA, 2002).

O ensaio de sanidade desenvolvido para detectar a presença de argilominerais contidos nas partículas de agregados de natureza basáltica que, quando expostos à ação das intempéries, prejudicam a durabilidade do agregado (KANDHAL E PARKER JR., 1998 apud GOUVEIA, 2006), o ensaio de sanidade é hoje utilizado para fornecer uma indicação da durabilidade, diante da ação do tempo, de agregados de diversas composições mineralógicas, tal qual um índice da qualidade geral.



O ensaio de sanidade é empírico e fornece uma indicação de durabilidade devido à ação do tempo regido pela norma DNER-ME 89/94. O ensaio envolve ciclos de submersão do agregado em solução de sulfato de sódio ou magnésio e secagem. Durante o ensaio, os cristais de sal crescem nos poros dos agregados e causam a desintegração de algumas partículas. Apesar do ensaio de sanidade ser o mais aceito e o mais usado, ele tem sido bastante criticado devido ao resultado do desempenho do agregado no campo.

### **2.2.2 Mineralogia dos agregados**

A grande maioria dos agregados são compostos por mais de um mineral de várias composições. Desde que os minerais tenham composição química definida e estrutura cristalina específica. Mesmo com agregados de mineralogia uniforme, as suas propriedades podem ser alteradas pela oxidação, hidratação, lixiviação ou intemperismo (BERNUCCI et al., 2006). Já para Leinz e Amaral (1975) apud Back (2018) minerais são todos e quaisquer compostos químicos resultantes de processos inorgânicos e composições químicas. Com a associação do mineral à rocha, cria-se unidades rochosas nitidamente individualizadas entre si, possuindo diferentes propriedades mecânicas, mineralógicas, físicas e químicas (BACK, 2018).

A mineralogia, isto é, a proporção relativa dos materiais que constituem os agregados, e a sua textura, que diz respeito ao tamanho, forma e o modo como os cristais estão unidos, auxiliam na determinação da sua estrutura que representa sua aparência externa. E algumas características importantes dos agregados está relacionado as propriedades físicas e químicas dos minerais que fazem parte de sua formação (MACIEL FILHO et al., 2014).

Os fatores mineralógicos afetam a utilidade do agregado em um pavimento de concreto asfáltico, assim como, a resistência à derrapagem do pavimento pode ser afetada através dos agregados grossos, compostos por quartzo e feldspato, os quais normalmente são encontrados em rochas ígneas como basalto e gabro, são minerais duros e bastante resistentes ao polimento. Por outro lado, a calcita e a dolomita, que ocorrem em rochas calcárias, são minerais fracos. Rochas calcárias que apresentam alta porcentagem de minerais fracos tendem a polir-se mais rapidamente que outros tipos de agregados (GOUVEIA, 2002).

A mineralogia dos agregados influencia na adesividade, o cimento asfáltico tem melhor adesão com determinados agregados, por estes possuírem certos tipos de minerais. É comumente aceito que a natureza das cargas elétricas na superfície dos agregados quando em contato com água afeta a adesividade entre o agregado e o cimento asfáltico. Os agregados de rochas classificadas como ácidas costumam apresentar problemas de adesividade, enquanto os de rochas classificadas como básicas costumam apresentar melhor adesividade ao ligante asfáltico (BERNUCCI et al., 2006).

Isto ocorre devido os agregados básicos como as rochas calcárias, são mais facilmente molhados pelo cimento asfáltico do que pela água, isto é, porque possuem uma carga positiva que tende a repelir a água e são chamados de hidrofóbico. Já os agregados ácidos como os agregados silicosos, os quais incluem granito e quartizito, são molhados mais facilmente pela água do que pelo asfalto, pois as cargas das partículas tornam-se negativas na presença de água e estes agregados são chamados de hidrófilos (BERNUCCI, et al., 2006).

Muitos agregados contêm ambas as cargas porque são compostos de minerais tais como sílica com carga negativa e também cálcio, magnésio, alumínio ou ferro com carga positiva. O basalto é um agregado que apresenta as duas carga elétricas.

### 2.3 A IMPORTÂNCIA DOS AGREGADOS NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

O desempenho dos pavimentos de concreto asfáltico depende amplamente das propriedades e proporções relativas dos seus principais componentes: os agregados, o cimento asfáltico e o volume de vazios.

Hoje encontra-se dentre as vias pavimentadas, uma qualidade de pavimento ou um estado de conservação inferior ao necessário. A abertura de buracos, principalmente, devido a fadiga e a deformação permanente são muito comuns em nossos pavimentos. Segundo a CNT, em 2015, 16,1% das vias federais estavam em condições de conservação consideradas ruins e 6,3% péssimas. A situação das rodovias localizadas no Rio Grande do Sul está pior do que a média nacional, conforme demonstrado pela mesma pesquisa, que indica que 18,3% dos trechos são ruins e 6,1% são péssimos e outros 49,2% são regulares, a penas 2,9% das estradas são consideradas ótimas, contra 12,5% do país.

Vários trabalhos de pesquisa têm demonstrado a importância dos agregados para a obtenção de pavimentos de alta qualidade. Segundo Kandhal e Parker Jr. (1998) e Roberts et al. (1991 apud Gouveia,2002), as propriedades dos agregados estão relacionadas aos parâmetros de desempenho de pavimentos de concreto asfáltico, tais como: deformação permanente, desgaste, trincas por fadiga e resistência à derrapagem.

### **2.3.1 Deformação permanente**

A maior parte das pesquisas tem abordado o comportamento de misturas asfálticas (quanto à fadiga e deformações permanentes) e o comportamento elástico de solos e materiais granulares. Porém, estruturas delgadas ou estruturas médias submetidas a elevados níveis de carga, podem sofrer um acúmulo excessivo de deformações permanentes (MALYSZ, 2004).

A deformação permanente, também conhecida como afundamento de trilha de roda (ATR), é um dos defeitos mais comuns encontrados nos pavimentos asfálticos atuais. Em função das condições climáticas específicas, projetos de misturas asfálticas deficientes, o aumento do volume de tráfego e da evolução tecnológica da modalidade rodoviária, que permitiu maiores cargas por eixo, maiores pressões de enchimento dos pneus e novos tipos de pneus e de rodagem (pneus extralargos) (KANDHAL et al., 2003). Assim, mantém-se evidente a importância dos estudos de comportamento quanto a deformações permanentes em materiais granulares principalmente com a utilização de finos (MALYSZ, 2004).

A variação longitudinal da magnitude da deformação permanente causa irregularidade no pavimento, o que diminui a segurança, causa desconforto ao usuário e, principalmente, aumenta os custos de operação dos veículos. A água da chuva pode se acumular nas depressões longitudinais das faixas de rodagem resultando em uma redução na resistência à derrapagem, com aumento do potencial de hidroplanagem e a formação de *spray*, que reduz a visibilidade (BERNUCCI et al., 2006).

Segundo Souza (1991) a deformação permanente é causada pela combinação da densificação da massa asfáltica e conseqüente redução de volume, e pela deformação cisalhante da mesma, podem ocorrer em uma ou mais camadas do pavimento, inclusive subleito. Podendo ser definida como o acúmulo irrecuperável de

pequenas quantidades de deformações, levando a uma distorção da superfície do pavimento, resultante da aplicação de carga dos veículos. Esta distorção aparece tipicamente como depressões longitudinais em trilhas de roda, geralmente acompanhadas de elevações laterais adjacentes ao trilho.

De acordo com Lekarp e Dawson, (1998 apud Malysz, 2004) a deformação permanente durante um ciclo de carga seja normalmente apenas uma fração da deformação total produzida por cada repetição de carga, o acúmulo de um grande número destas pequenas deformações plásticas pode levar o pavimento a uma eventual ruptura devida a afundamentos de trilhas de roda excessivos.

Para Silva (2005) a origem das deformações permanentes está ligada a um processo de redução da sua porosidade (pós-compactação) durante os primeiros anos de serviço, e a esforços de cisalhamento que ocorrem perto da superfície do pavimento, na zona que limita a área de contato entre o pneu e o pavimento.

A magnitude das deformações permanentes em materiais granulares é muito influenciada pela presença de água. Para graus de saturação elevados, a resistência a deformações permanentes decresce rapidamente, provavelmente pelo excesso de poro-pressões gerado. Portanto uma drenagem adequada nas camadas granulares é necessária (MALYSZ, 2004).

A resistência ao acúmulo de deformação permanente de um concreto asfáltico depende das características dos materiais constituintes (ligante asfáltico e agregados) e das propriedades das misturas asfálticas. Para os agregados, objeto de estudo deste trabalho, destacam-se a forma das partículas, a angularidade, a textura superficial, o diâmetro nominal máximo, a granulometria e a dureza do material. Quanto ao ligante, destaca-se sua rigidez sob altas temperaturas. Na análise das misturas destaca-se a influência o teor de ligante, o volume de vazios, os vazios do agregado mineral e o método de compactação (GOUVEIA, 2002).

Aumentar a resistência do concreto asfáltico é uma alternativa para tentar conter as deformações permanentes, já que volume de tráfego e a pressão dos pneus não irão decrescer. Contendo cautela para se fazer as alterações necessárias, pois modificações benéficas para uma determinada propriedade podem causar mudanças prejudiciais em outras. Por exemplo, diminuir a quantidade de cimento asfáltico na mistura pode resultar em um aumento da resistência à deformação permanente, mas numa diminuição da durabilidade e da resistência às trincas por fadiga. O aumento da viscosidade do cimento asfáltico pode resultar em uma mistura mais "dura", que pode

ser mais resistente à deformação permanente, mas com maior suscetibilidade às trincas térmicas e à fadiga. Mudanças nas propriedades dos agregados (como tamanho, forma, angularidade, textura superficial das partículas e granulometria) são alternativas mais indicadas para garantir maior estabilidade dos pavimentos e, sendo assim, melhorar a resistência à deformação permanente da mistura (PARKER JR. E BROWN, 1992 apud GOUVEIA, 2002). O teor de agregados finos (material passando na peneira nº 4) aumenta a resistência do pavimento e diminui as deformações permanentes (MALYSZ, 2004).

Button et al. (1990), afirmam que a forma e a textura das partículas dos agregados afeta diretamente a deformação permanente. As misturas asfálticas contendo areia natural (arredondada) deformam-se plasticamente, sob a ação de cargas estáticas ou dinâmicas, muito mais rapidamente que misturas de graduação similar contendo somente partículas britadas (angulares).

Malysz, (2004) estabelece que a origem do agregado influencia, sendo que os materiais britados estão sujeitos a menores deformações permanentes que os pedregulhos naturais de formas mais arredondadas (não angulares).

### **2.3.2 Desgaste**

Efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego. Facilmente identificado pela presença de agregados soltos sobre a superfície e presença de agregados expostos (BALBO, 1997) conforme demonstrado na Figura 2.6. Provoca uma macrorrugosidade no pavimento. Em geral, sua origem está associada à perda de ligante na superfície do revestimento, falta de adesividade ou ainda devido a queima do cimento asfáltico em casos de ocorrência precoce, originando deste modo o desgaste do pavimento asfáltico.

A desagregação é precedida pela perda de adesividade entre as partículas de agregado e o asfalto. Algumas situações que podem conduzir à desagregação são: o agregado possuir uma cobertura de pó grossa o suficiente para o filme de asfalto aderir no pó em lugar do agregado.

Também ocorre desgaste em função da presença de umidade, que provoca a perda da união entre o agregado e o cimento asfáltico. O desgaste devido a influência prejudicial da umidade ocorre, tipicamente, na parte inferior da camada de concreto

asfáltico e progride para cima, ao contrário do desgaste causado por desagregação (ROBERTS et al., 1991 apud GOUVEIA, 2002).

Figura 2.6 - Desgaste.



Fonte: Sintralog (2019).

### 2.3.3 Trincas por fadiga

Pinto (1991) descreveu o fenômeno da fadiga como um processo de deterioração estrutural que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em trincas ou fratura completa, após um número suficiente de repetições do carregamento, ou seja, é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga.

Segundo Kim et al. (1992 apud Gouveia, 2002), através de estudos para avaliar os efeitos do tipo do agregado na resistência à fadiga das misturas, deve-se analisar cinco fatores: tipo do agregado, onde são testados agregados com textura superficial rugosa e agregados com textura superficial lisa, tipo de asfalto, teor de asfalto, volume de vazios e variação da temperatura. Os resultados obtidos indicam que as misturas contendo agregados com textura superficial rugosa são mais resistentes à fadiga, promove melhor interface para a união entre a partícula do agregado e o cimento asfáltico. A ruptura (fratura) ocorrida na mistura contendo agregados de textura superficial lisa é na interface entre o agregado e cimento asfáltico. Assim, a textura superficial dos agregados têm grande influência na resistência à fadiga das misturas de concreto asfáltico. Isso demonstra a importância de uma boa interface de união

entre agregados contendo textura superficial rugosa e o cimento asfáltico, para um aumento da resistência à fadiga das misturas.

#### **2.3.4 Resistência à derrapagem**

A resistência à derrapagem é de grande importância no desempenho dos pavimentos levando em consideração a segurança dos usuários. Quando a resistência à derrapagem diminui abaixo de um nível mínimo aceitável, deixando de desempenhar a função de segurança. O revestimento asfáltico deve ser projetado para apresentar um atrito pneu-pavimento adequado, mesmo na ocasião de chuvas intensas. De acordo com Kandhal e Parker Jr. (1998) a resistência à derrapagem depende da textura superficial do pavimento, que pode ser classificada como microtextura e macrotextura.

A microtextura relaciona-se à aspereza da superfície dos agregados, que podem apresentar características do tipo áspera ou polida. Sendo a aspereza dependente da mineralogia do agregado (DUMKE, 2005). A microtextura é muito importante para o rompimento da película de água sobre a superfície e a melhoria da aderência a baixas velocidades de rolamento (BERNUCCI *et al.*, 2006). Ao longo da vida útil do revestimento a microtextura pode sofrer alterações, com o polimento dos agregados através da atuação de tráfego pesado.

A macrotextura refere-se à rugosidade superficial do revestimento, sendo originada pelos agregados que se destacam na superfície. É influenciada pelo tamanho máximo do agregado, forma, angulosidade, espessura do filme de asfalto, composição mineralógica dos agregados e distribuição dos agregados (DUMKE, 2005 e LIN *et al.*, 2018). A aquaplanagem pode ser evitada com uma macrotextura adequada, favorecendo a drenagem da lâmina d'água encontrada na interface pneu-pavimento.

A macrotextura pode ser avaliada pela profundidade de textura média (MTD) ou profundidade média do perfil (MPD). O MTD é a razão entre o volume e a área de superfície, que é medida através do teste de mancha de areia e o MPD é a razão entre uma área de superfície e sua profundidade. A medição de MPD geralmente requer equipamentos avançados, como métodos baseados em laser, o que o torna menos usado do que o MTD (LIN *et al.*, 2018).

Para Balmer e Hegmon (1980 apud Gouveia, 2002), a microtextura contribui para a resistência à derrapagem em todas as velocidades e com predomínio em velocidades abaixo de 50 km/h. Já a macrotextura tem menos importância em baixas velocidades, mas é essencial para a segurança em altas velocidades de tráfego, principalmente em pavimentos molhados. A microtextura e a macrotextura são classificadas dependendo do comprimento de onda ou da distância entre dois picos ou depressões na superfície: comprimento de onda menor que 0,5 mm são classificadas como microtextura e maiores que 0,5 mm como macrotextura.

Os valores de FAA podem ter um impacto muito mais forte na macrotextura do que na microtextura. Isso pode ser explicado da seguinte forma: maior FAA significa mais contato entre agregados finos, o que resiste a mais compactação, de modo que a superfície permanece mais áspera.

## 2.4 ESPECIFICAÇÃO SUPERPAVE, ANGULARIDADE E TEXTURA DOS AGREGADOS FINOS

### 2.4.1 Método superpave

O método SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement System*) tem como principal objetivo identificar e especificar o comportamento dos ligantes asfálticos (resposta à ação do tráfego e ao carregamento em condições ambientais variáveis) (KENNEDY, 1994 apud MOURO, 2010). Elaborando um novo método de projeto de misturas asfálticas.

Os estudos realizados pelo programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) visam principalmente a avaliação de ligantes asfálticos, o projeto de misturas e sua análise. Não houve, de início pesquisas específicas para os agregados. Como os agregados são uma parte muito importante da mistura, os pesquisadores do programa SHRP tomaram como providência a abordagem consensual de um grupo de especialistas, quanto às propriedades mais relevantes dos agregados em misturas asfálticas.

Os especialistas apontaram que a deformação permanente em trilha de roda é a propriedade mais afetada pelos agregados. Por sua vez, o trincamento por fadiga e por retração térmica são mais afetados pelo comportamento do ligante asfáltico (ROBERTS et al., 1996 apud MOURA, 2010). As propriedades principais dos



agregados foram organizadas em duas categorias e incorporadas ao sistema superpave. Essas categorias são denominadas propriedades de consenso e propriedades de origem (BERNUCCI et al., 2006).

Em consenso geral entre os especialistas que estas propriedades dos agregados são críticas e devem ser atendidas em todos os casos a fim de gerar misturas de concreto asfáltico de alto desempenho. Essas propriedades são: angularidade do agregado grosso e finos; partículas planas e alongadas e teor de argila.

As propriedades de origem, como o nome já diz, são aquelas que dependem da origem do material rochoso. Mostram características na natureza petrográfica, dependendo, portanto, da fonte de extração. Estas propriedades são: dureza; sanidade e materiais deletérios.

#### **2.4.2 Angularidade do agregado fino**

Dentre as propriedades mais importantes dos agregados identificadas pelos pesquisadores do programa SHRP destaca-se a angularidade do agregado fino. Para Brown e Cross (1989), que procurou através de estudos verificar as propriedades dos agregados que constituem as misturas asfálticas com desempenho satisfatório, relatam que misturas com agregados com maior número de faces fraturadas e com maior angularidade do agregado fino possuem maior resistência a deformação permanente.

Griffith e Kallas (1958 apud Gouveia, 2002) demonstram que a influência da angularidade e textura do agregado fino nas estabilidades Marshall e Hveem é consideravelmente maior que a influência da angularidade e textura do agregado grosso, para misturas contendo mais que 50% de agregados finos. Comparam também misturas de mesma granulometria, contendo agregados grossos e finos arredondados e agregados grossos e finos angulares e concluem que as misturas que contêm agregados arredondados necessitam de menores quantidades de cimento asfáltico, pois, apresentam menores porcentagens de vazios do agregado mineral (VAM).

Shklarsky & Livneh (1964 apud Lee et al., 1999) apresentaram um extenso estudo referente as frações grossas de agregados angulares e arredondados combinados com agregados finos angulares e arredondados, analisando os seguintes

parâmetros: estabilidade e fluência Marshall; ângulo de atrito interno e coesão; resistência à deformação permanente; resistência à fadiga e permeabilidade. Identificando que ao substituir a fração fina de areia natural (arredondada) por agregado fino britado ocorre uma melhora incomparável na qualidade do produto: aumento da estabilidade, redução da deformação permanente, menor susceptibilidade à umidade. As misturas que contêm agregados grossos arredondados e finos britados apresentam melhor qualidade do que as misturas que contêm apenas grossos e finos britados. Por outro lado, ao substituir o material grosso arredondado pelo britado nenhum efeito significativo é verificado.

Kalcheff e Tunnicliff (1982 apud Lee et al., 1999) estudaram o desempenho que o concreto asfáltico apresenta utilizando misturas com agregados grossos (graúdo) e finos britados e areia natural. As misturas que continham agregados grossos e finos britados (angulares) apresentaram maior resistência à deformação permanente e menor susceptibilidade aos efeitos da temperatura e volume de vazios, do que misturas em que utilizou areia natural.

O ensaio de FAA correlaciona-se com a tendência de desempenho dentro de um determinado tipo agregado, seguido pelos diferentes tipos de graduações, mas não se correlaciona com a variação entre os tipos agregados. Isso significa que a origem do agregado deve ser considerada na interpretação dos resultados da FAA. (Breakah et al. 2010)

Os dois trechos experimentais apresentado por Foster (1970 apud Gouveia, 2002) apresenta misturas de areia-asfalto e misturas feitas com dois agregados grossos diferentes e o mesmo agregado fino usado na mistura de areia-asfalto. Conclui que a capacidade das misturas de graduação densa de suportarem as cargas do tráfego é controlada pelas características do agregado fino. Benson (1970) também conclui que independente da angularidade do agregado graúdo usado, a resistência de misturas de graduação densa e de misturas de graduação aberta varia em função dos agregados finos utilizados.

Stakston et al. (2002 apud Breakah et al. 2010) afirma que será difícil especificar um valor de FAA independente da fonte e da graduação, uma vez que os valores do ensaio de FAA sozinho não influencia um índice de energia de compactação de concreto asfáltico.

Os valores de FAA variam dependendo da mineralogia da rocha e do tipo de britador. Os britadores são de tipo diferente e suas tecnologias são alteradas pelo tempo e seu desempenho é melhorado. Portanto, a abordagem adotada na identificação e seleção de agregados finos para uso neste estudo foi selecionar agregados com valores variáveis de FAA. Também foram incluídos dentro dos critérios de seleção a composição mineralógica dos agregados finos e tipo de triturador. Maximização destes três critérios assegurada por muita Agregação com uma ampla gama de propriedades (TOPAL et al., 2005).

De acordo com Topal et al. (2005) os resultados de FAA obtidos de agregados através de britadores de impacto e giratórios (especialmente o tipo VSI) produzem mais partículas cúbicas e angulares do que os demais tipos de britadores. Os agregados finos naturais tendem a ser arredondados.

Evidenciando a necessidade de um ensaio confiável para a classificação dos agregados finos quanto à forma, à angularidade e textura superficial de suas partículas, com potencial para diferenciar os agregados que proporcionam misturas com baixa resistência à deformação permanente (menor estabilidade) das misturas com bom desempenho (maior estabilidade).

#### *2.4.2.1. Ensaio de angularidade do agregado fino (FAA)*

Para suprir esta necessidade a *National Aggregate Association* desenvolveu o ensaio de angularidade do agregado fino (FAA, *Fine Aggregate Angularity*), introduzindo-o no método SUPERPAVE de modo a avaliar a angularidade e textura superficial dos agregados finos.

A medida de angularidade dos agregados finos é determinada indiretamente devido à dificuldade para avaliação visual. Quanto mais elevados os valores de FAA maior a angularidade e rugosidade das partículas, por possuírem arestas e cantos agudos tendem a ficar mais afastadas uma das outras, pois quando estas possuem cantos arredondados e com textura superficial lisa, tendem a se acomodar melhor diminuindo o volume de vazios (PEREIRA, 2010 e GOUVEIA, 2006). Resultando em um intertravamento maior entre as partículas, promovendo maior resistência ao cisalhamento.

A angularidade do agregado fino é regida pela norma ASTM C 1252/06, sendo avaliada através da determinação dos vazios na condição não compactada, vertendo

a amostra de uma altura de queda de 115 mm, em um cilindro de volume conhecido ( $100 \text{ cm}^3$ ) como demonstrado na Figura 2.7. O material em excesso sobre o topo do cilindro é retirado com a máxima delicadeza com auxílio de uma régua metálica ou espátula, para não haver a compactação (acomodação de partículas) por vibração ou compressão. Determinando a massa do agregado fino retida no cilindro, sendo o volume do agregado contida no cilindro calculado usando-se a massa específica aparente do agregado fino (ASTM C 128). Os vazios não compactados são calculados pela diferença entre o volume do cilindro e o volume de agregado no cilindro conforme a Equação 2.6:

$$U = \frac{V_c - \frac{m_a}{\rho_{ap}}}{V_c} 100 \quad (2.6)$$

Onde:

$U$  = Vazios não compactados (%);

$m_a$  = Massa do agregado contida no cilindro (g);

$\rho_{ap}$  = Massa específica aparente do agregado fino ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

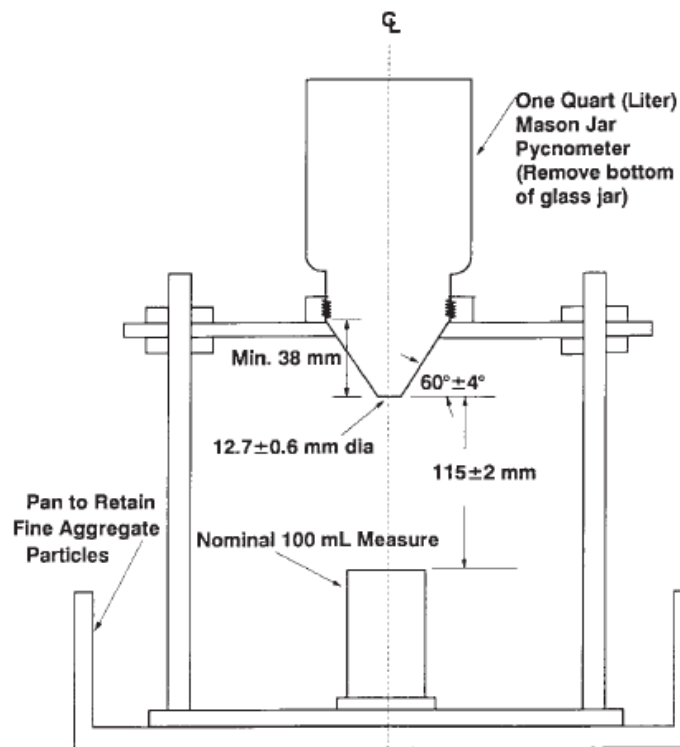
$V_c$  = Volume do cilindro ( $\text{cm}^3$ ).

O ensaio FAA pode ser realizado de acordo com três métodos distintos A, B ou C. No Método A é ensaiado uma combinação de frações específicas de agregado fino, nas quantidades apresentadas na Tabela 2.3, o resultado final corresponde a uma média entre duas determinações do volume de vazios (ensaio FAA). O Método B utiliza frações individuais especificadas, como mostra a Tabela 2.3, sendo o ensaio realizado para cada fração de agregado separadamente, com o valor de FAA correspondendo à média dos três valores. E no Método C a amostra ensaiada consiste de 190 g de agregado fino passante na peneira de 4,75 mm, não havendo qualquer controle da granulometria. Seguindo a especificação SUPERPAVE o método a ser adotado para elaboração do ensaio deve ser o método A.

Em estudos realizados por Fernandes et al. (2000) mostram que os métodos A, B e C resultam em valores de FAA diferentes, devido os vazios entre as partículas aumentarem quando a granulometria do agregado torna-se mais uniforme. O Método B é executado com tamanho único de partículas, resulta em maior valor de FAA; o Método A com granulometria especificada, resulta em valor de FAA intermediário e o

método C por não haver controle de granulometria encontrasse o menor valor de FAA. Assim, geralmente, os maiores valores de FAA são do Método B, seguido do Método A e por último o Método C. Os dois métodos que usam granulometria controlada (métodos A e B) resultam em mesma hierarquização, indicando que ambos os métodos são sensíveis às mesmas características dos agregados e que, para o propósito de classificação, são equivalentes.

Figura 2.7 - Ensaio de angularidade do agregado fino (FAA).



Fonte: ASTM C 1252 (2003).

O SUPERPAVE estabelece valores mínimos de FAA de acordo com o nível de tráfego e com a proximidade da camada com relação à superfície do pavimento conforme Tabela 2.4. Para rodovias com alto volume de tráfego o mínimo de FAA é 45%. Para tráfego médio, são especificados valores entre 40 e 45%, e para baixo volume de tráfego não se atribui valor, pois as areias naturais com FAA menores que 40% são consideradas aceitáveis (GOUVEIA, 2006).

Os estudos realizados por Fernandes et al. (2000) para avaliar o ensaio FAA, mediante comparação com o ensaio de cisalhamento direto, relatam que o FAA sozinho não é um bom indicador da resistência ao cisalhamento do agregado fino.

Segundo os autores, o ensaio de cisalhamento direto pode prover parâmetros de maior relevância para avaliar os agregados finos.

Tabela 2.3 - Frações granulométricas usadas no Método A, B e C.

<b>METODOS</b>				
Peneiras		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Passante	Retido	massa (g)	massa (g)	massa (g)
# 4 (4,75mm)	-			190
# 8 (2,36mm)	# 16 (1,16mm)	44	190	-
# 16 (1,16mm)	# 30 (60mm)	57	190	-
# 30 (60mm)	# 50 (30mm)	72	190	-
# 50 (30mm)	# 100 (0,15mm)	17	-	-
TOTAL		190	-	190

Fonte: ASTM C 1252/06

Tabela 2.4 - Especificação Superpave para valores mínimos da FAA (método A)

<b>Tráfego N = 10<sup>6</sup></b>	<b>Profundidade da camada em relação à superfície do pavimento</b>	
	< 100 mm	> 100 mm
< 0,3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≥ 100	45	45

Fonte: Bernucci et. al. (2006)

Conclui-se que os agregados miúdos tem influência no desempenho das misturas asfálticas, sendo de suma importância o conhecimento da angularidade, esfericidade e textura superficial destes agregados. Mostrando que quanto mais cúbicos os agregados finos melhor será o desempenho, resistindo de forma eficaz as tensões as quais são impostas durante sua vida útil.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo estabelece a localização dos 22 (vinte e dois) pontos de coletas das amostras estudadas, modo de coleta em campo, os procedimentos metodológicos adotados na execução dos ensaios de caracterização física, angularidade e resistência ao cisalhamento direto realizados em laboratório. A figura 3.1 demonstra a metodologia adota para cumprimento dos objetivos da pesquisa.

Figura 3.1 - Metodologia da pesquisa.



#### 3.1 DEFINIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Com o propósito de estudar a angularidade dos agregados miúdos/finos (FAA) utilizados na composição do misturas asfáltico, optou-se por agregados que já são estudos na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Os materiais este estudados por Paiva (2017), Back (2018) e Faccin (2018) estes autores caracterização também as britas 3/4" e 3/8". As amostras são provenientes de todas as províncias geomorfológicas do estado do Rio Grande do Sul. A tabela 3.1 e a Figura 3.2 identificam a localização das amostras.

Tabela 3.1 - Localização e identificação das diferentes amostras coletadas.

<b>Amostra</b>	<b>Empresa</b>	<b>Local</b>	<b>Litologia</b>
A01	São Juvenal	Cruz Alta	Basalto
A07	Carpenedo	Santa Rosa	Basalto
A11	Sultepa	Dilermando de Aguiar	Basalto
A13	Andreetta	Erechim	Basalto
A16	Min. Ouro Preto	Santa Cruz do Sul	Basalto
A22	Construbrás	São Luiz Gonzaga	Basalto
A02	Iccila	Santana do Livramento	Diabásio
A03	Cotrel	Santa Maria	Diabásio
A04	Construbrás	Sarandi	Diabásio
A17	Iccila	Uruguaiana	Diabásio
A19	Concepa	Santo Antônio da Patrulha	Diabásio
A06	Della Pasqua	Itaara	Riodacito
A08	Brita Pinhal	Itaara	Riodacito
A12	Construtora Fuchs	Passo Fundo	Riodacito
A18	Conpasul	Itaara	Riodacito
A21	Brita Pinhal	Itaara - Areia	Riodacito
A05	Eldorado Britagem	Eldorado do Sul	Granito
A20	Sbs Engenharia	Capão do Leão	Granito
A09	Min. Monego	Caçapava do Sul	Mármore
A10	Hulha Negra	Bagé	Mármore
A14	Areia de Cava	Passo do Verde	Areia
A15	Areia Leito	Passo do Verde	Areia

As amostras de material solto foi coletado junto as pilhas de distribuição para consumo localizada nas praças de britagem de cada uma das pedreiras a serem estudadas. Algumas amostras foram coletadas por Faccin (2018) e Back (2018) que já estavam estudando as mesma pedreiras, não havendo necessidade de nova coleta.

A Figura 3.3 até 3.5 demostram uma visão geral onde foi executada as coletas. Sendo todas as amostras identificadas e armazenadas junto ao Laboratório de Matérias de Construção Civil – LMCC da UFSM.



Figura 3.2 - Mapa de localização de coleta das amostras.

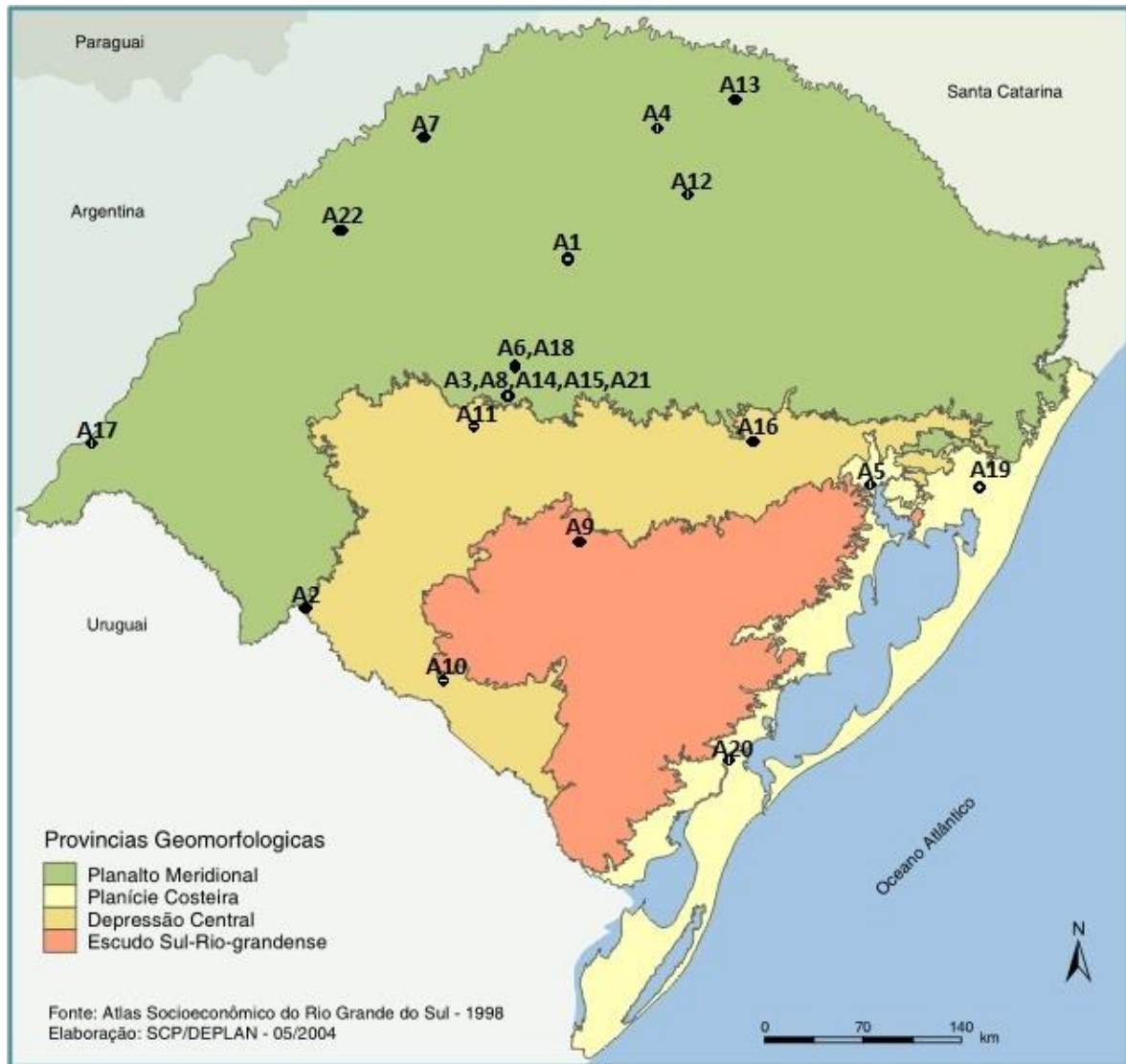


Figura 3.3 - Pontos de coletas rochas ígneas basalto e granito.

A01 – Cruz Alta



Fonte: Back (2018).

A11 – Dilermando de Aguiar



Fonte: Paiva (2017)

A13 - Erechim



Fonte: Back (2018).

A20 – Capão do Leão



Figura 3.4 - Pontos de coletas rochas ígneas diabásio e mármore.

A02 – Santana do Livramento



Fonte: Back (2018).

A03 – Santa Maria - CT



Fonte: Paiva (2017)

A04 - Sarandi



Fonte: Construbas (2019).

A19 – Santo Antônio da Patrulha



Fonte: Back (2018).

A09 – Caçapava do Sul



Fonte: Back (2018).

A10 - Bagé



Fonte: Back (2018).

Figura 3.5 - Pontos de coletas rochas ígneas riódacito e areia.

A06 - Itaara



A08 e A21 - Itaara - BP



Fonte: Paiva (2017)

A12 - Passo Fundo

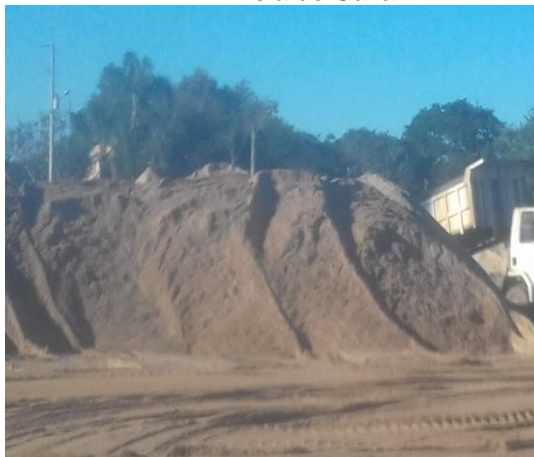


A18 - Itaara - CP



Fonte: Paiva (2017)

A14 - Areia de Cava



A15 - Areia de leito



### 3.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios realizados no decorrer da pesquisa para caracterização física, angularidade dos agregados finos e cisalhamento direto junto com suas respectivas normas estão indicados na Tabela 3.2. Foi apresentado ao longo da metodologia breves definições dos objetivos, procedimentos, amostragem e parâmetros obtidos em cada procedimento laboratorial.

Tabela 3.2 - Localização e identificação das diferentes amostras coletadas.

ENSAIOS LABORATÓRIAS	NORMAS
Agregados - Determinação da composição granulométrica	ABNT NBR NM 248/2003, DNER 83/98
Massa específico real dos grãos	NBR 6508/84 e DNER-ME 194/98
Massa específico aparente, real e absorção	ASTM C 128
Massa unitária	DNER-ME 152/95
Equivalência de areia	DNER-ME 54/97, ABNT NBR 12052/92
Angularidade do agregado fino	ASTM C 1252
Análise da forma, a angularidade e textura superficial	NBR 7389/09
Cisalhamento Direto	ASTM D 3080/11
Agregate Image Measurement System (AIMS)	AASHTO TP 81-10

#### 3.2.1 Ensaio de caracterização física

##### 3.2.1.1. Granulometria

A granulometria é a separação das frações do agregado em zonas ou graduações de acordo com o tamanho das partículas constituintes da amostra. As análises granulométricas foram realizadas de acordo com a ABNT NBR NM 248/2003 (Agregados - Determinação da composição granulométrica) e DNER ME 083/98 (Agregados – análise granulométrica) que descreve a série de peneiras a serem utilizadas, onde foram utilizadas as peneiras da série normal e intermediária (Figura 3.6).

Todos os ensaios foram executados por peneiramento manual, com material lavado na #200. Aplicando-se o material na peneira de maior abertura para a de menor abertura e em seguida agitando-se com movimentos laterais e circulares nos diversos planos. Após a passagem da amostra por cada peneira da série, realiza-se a pesagem

individual das frações retidas, com a finalidade de obter a porcentagem de cada fração em relação à massa da amostra inicial. Dessa forma, calculou-se a porcentagem acumulada de material seco em cada peneira, somando-se a porcentagem retida na peneira com as retidas nas peneiras de maiores aberturas, para obter a curva granulométrica. Também pode-se obter o diâmetro máximo característico do material e o módulo de finura.

Figura 3.6 – Conjunto de peneiras.



### 3.2.1.2. Massa unitária

A definição do ensaio de massa unitária no estado solto, foi utilizado a norma DNER-ME 152/95 a amostra é oriunda direta da pilha, o volume necessário deve ser o dobro do volume do recipiente utilizado. O recipiente foi enchido lançando o material com ajuda de uma concha de uma altura de 10 cm a 12 cm, evitando eventuais segregações, após isto deve-se rasar a superfície com ajuda de uma régua metálica e pesa-se o recipiente junto com o material, repetindo o ensaio por 3 vezes. A Equação 3.1 determina a massa unitária do agregado.

$$\rho_{ap} = \frac{M_{ar} - M_r}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

$\rho_{ap}$  = Massa unitária do agregado fino (Kg/m<sup>3</sup>);

$V$  = Volume do recipiente (m<sup>3</sup>).

$M_{ar}$  = Massa do recipiente com agregado (Kg);

$M_r$  = Massa do recipiente vazio (Kg);

### 3.2.1.3. Ensaio de absorção, massa específica aparente e real

Para a execução do ensaio de absorção, massa específica aparente e real dos agregados finos foram realizados os procedimentos conforme a normativa americana ASTM C 128/97.

O presente ensaio inicia-se na:

- Preparação da amostra separando cerca de 1 Kg de material passante na peneira 2,36 mm e retido na peneira 0,075 mm e lavado na peneira 0,075 mm;
- Após o material ser lavado, adicionando-o em um recipiente onde água é adicionada em quantidade suficiente para ultrapassar, em pelo menos 2 cm, o nível superior do agregado. O recipiente é deixado em repouso durante 24 horas para permitir a saturação da amostra.

Após decorrida as 24 horas de imersão, escorre-se o excesso de água, passa-se para uma bandeja onde possa ser espalhado formando uma camada fina e de espessura uniforme. Inicia-se então, o processo de secagem do material através da passagem de uma corrente de ar aquecido sobre a bandeja, revirando ao mesmo tempo o agregado, para assegurar uma secagem uniforme. Essa secagem é feita até que se inicie uma mudança na cor do agregado e suas partículas comecem a se desgrudar uma das outras. Quando isso acontece, cessa-se a corrente de ar quente sobre o agregado.

Utilizando um molde cônico e um soquete (Figura 3.7) sobre uma superfície plana e horizontal não absorvente, com a abertura maior para baixo, enche-se o molde com agregados, despejando-os pela menor abertura do molde e distribuindo-os regularmente em seu interior. Em seguida, compacta-se com 25 golpes do soquete, distribuídos uniformemente pela superfície livre do agregado. O soquete deve cair sobre o agregado de uma altura de 5 mm acima do topo da superfície livre do agregado. Em seguida levanta-se verticalmente o molde, tomando cuidado para não esbarrar no cone de agregados formado. Se a umidade superficial nas partículas de agregados ainda estiver presente, o agregado fino adquire a forma do molde. Ou seja, se o cone de agregados compactados não desmoronar parcial ou totalmente, não se terá atingido ainda o ponto de amostra saturada seca superficialmente. Neste caso, continua-se a secagem do material através da corrente de ar quente como descrita

anteriormente, efetuando-se provas cada vez mais frequentes com o molde cônico, até que seja alcançada a condição de amostra saturada seca superficialmente. Essa condição de amostra saturada seca superficialmente é atingida quando, ao se levantar o molde cônico, o cone de agregado desmorona total ou parcialmente. A Figura 3.8 descreve com imagens alguns passos essenciais do ensaio.

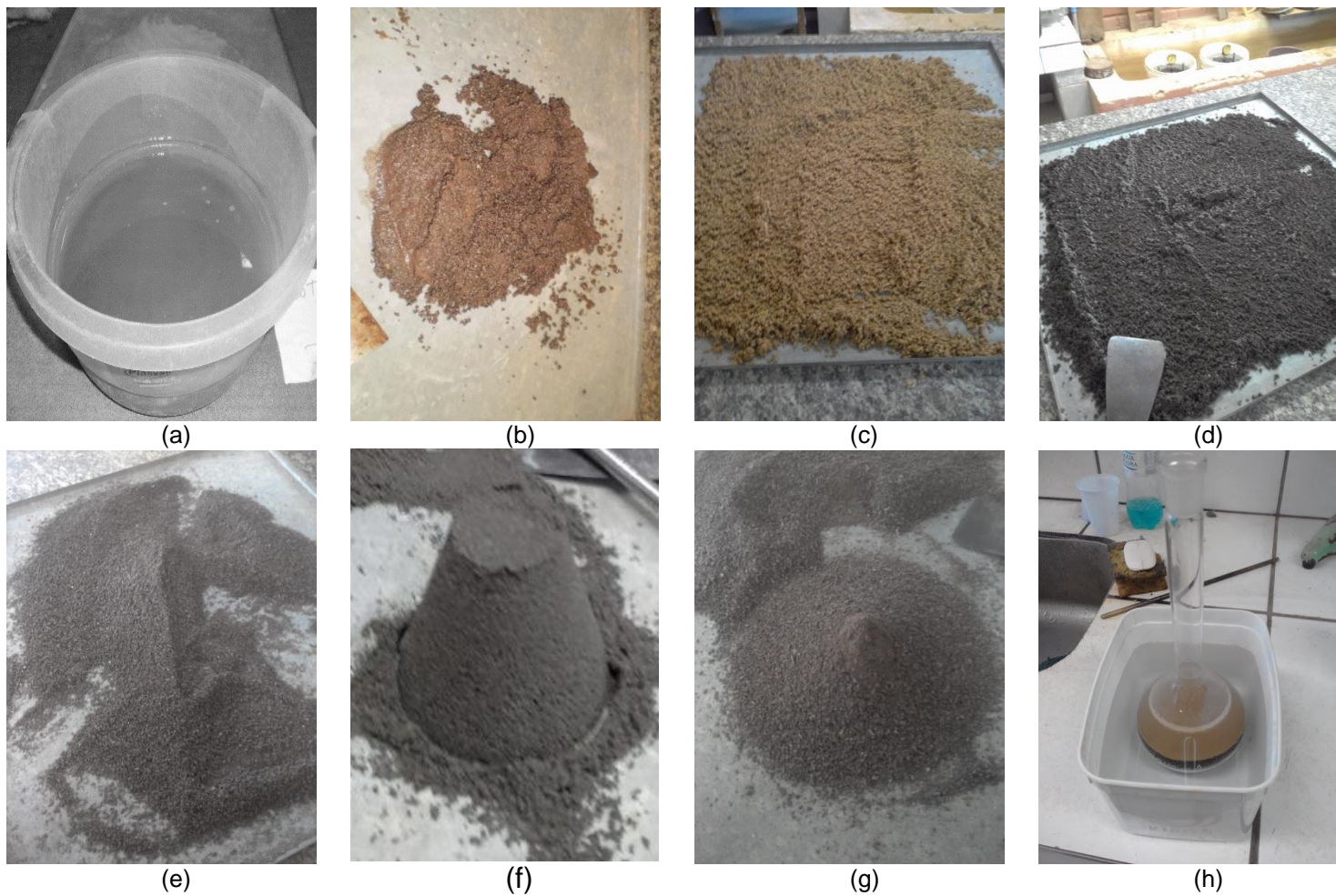
Figura 3.7 - Equipamento utilizado no ensaio de massa específica.



Quando a condição de amostra saturada seca superficialmente do agregado é atingida, 500 g do material é transferido para o picnômetro, onde determina-se a massa do picnômetro com a amostra, obtendo-se a massa da amostra saturada seca superficialmente, mais a tara do picnômetro. Após, adiciona-se água destilada ao picnômetro até cobrir a amostra. Agita-se, levemente, para obrigar a água a molhar toda a amostra. Agita-se o picnômetro de forma para eliminar as bolhas. Posteriormente, o picnômetro é deixado em repouso durante 1 hora, em banho mantido à temperatura de aproximadamente 25° C. Após o banho, adiciona-se água destilada ao picnômetro, até o traço de referência. Determina-se, então, a massa do picnômetro mais água mais agregado fino. Mede-se a temperatura do conjunto (água mais agregado fino) contido no picnômetro no momento da pesagem. Remove-se o agregado fino do interior do picnômetro e leva-se para secar em estufa até constância de peso. Após o resfriamento da amostra determina-se a massa da amostra seca. Com o auxílio da curva de calibragem do picnômetro determina-se a massa do picnômetro cheio de água na temperatura medida no ensaio;



Figura 3.8 – Procedimento ensaio MEA, MER e absorção, (a) material imerso 24H; (b) material após retirado de imersão; (c) material após imersão; (d) material sendo seco com ar quente; (e) material secando; (f) teste para ver grau de umidade, continuar secando; (g) material úmido aparentemente seco; (h) material em repouso.



- O cálculo da massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ), massa específica real ( $\rho$ ) e absorção ( $A_{bs}$ ) é determinado pelas seguintes fórmulas:

$$\rho_{ap} = \frac{A}{(B + S - C)} \quad (3.2)$$

$$\rho = \frac{A}{(B + A - C)} \quad (3.3)$$

$$A_{bs} = \frac{S - A}{A} 100 \quad (3.4)$$

Onde:

$\rho_{ap}$  = Massa específica aparente dos grãos ou partículas de agregados finos;

$\rho$  = Massa específica real dos grãos ou partículas de agregados finos;

$A_{bs}$  = Absorção de água dos grãos ou partículas de agregados finos (%);

A = Massa da amostra seca (g);

B = Massa do picnômetro cheio de água, obtida da curva de calibração (g);

S = Massa da amostra na condição saturada seca superficialmente (g);

C = Massa do picnômetro com agregado fino e água (g).

Ainda foi feito o ensaio de massa específica real através do frasco de Chapman regido pela DNER-ME 194/98 que é determinado através da separação de 500 g de material passante na peneira 4,8 mm seco em estufa, sendo adicionado este material junto com água no frasco de Chapman (Figura 3.9a) e após feita a leitura para posterior determinar a massa específica dos agregados finos/miúdos conforme a equação 3.5.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (3.5)$$

Onde:

$\gamma$  = Massa específica, expressa em g/cm<sup>3</sup>;

L = Leitura no frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado fino).

Figura 3.9 – Dispositivos utilizados nos ensaios para determinação da massa específica e equivalente de areia.



(a) Frasco de Chapman



(b) Picnômetro



(c) Equivalência de areia

O ensaio utilizando picnômetro que é regida pela ABNT NBR 6508/84 que também determina a massa específica real dos agregado finos, através da separação de 101,60 g de material passante na peneira de 4,8 mm, adicionado em um picnômetro de 500 ml juntamente com água, conforme Figura 3.9b, quando o material começar a ferver conecta-se a bomba de vácuo para remoção das bolhas de ar contido na amostra durante 30min, após preenche-se o picnômetro com água até a marca faz a pesagem do conjunto picnômetro, água e agregado.

#### 3.2.1.4. Equivalência de areia

O ensaio de equivalência de areia é regido pela norma DNER-ME 54/97 e a ABNT NBR 12052/92 que determina a proporção relativa de materiais deletérios tais como: vegetação, conchas e grumos de argila em amostras de agregados miúdos. O ensaio consiste na separação de 110 g de matéria solta, passante na peneira 4,8 mm sendo colocado em uma proveta padronizada junto com uma solução flocculante e água destilada, agitando e após repousar por 20 minutos, após o repouso é feita a leitura do volume de areia (material que sedimentou) e volume de argila mais o de finos que se separam da areia e flocculam (material em suspensão) que será o equivalente de areia, conforme Figura 3.9c. Realiza-se de duas repetições por amostra de material, e sem seguida, calcula-se a média aritmética.

### **3.2.2 Ensaio de Angularidade agregado fino (FAA)**

O equipamento foi construído e implantado de acordo com as especificações da ASTM C 128 no laboratório de materiais de construção civil (LMCC) da UFSM, para a realização dos ensaios de angularidade do agregado fino (FAA), para melhor escolher os agregados utilizados em revestimentos asfálticos.

O equipamento contém:

- 01 un. funil;
- 01 un. cilindro receptor de volume conhecido;
- 01 un. cilindro coletor para agregado;
- 01 un. suporte para determinar a altura de queda.

O procedimento do ensaio inicia-se na preparação da amostra. Após a secagem do material em estufa a 105°C, material seco separamos os agregados finos nas frações correspondente as peneiras especificadas na Tabela 2.3, o método que adotamos para esta pesquisa é o método A e B para todos as amostras estudadas e o método C a penas uma amostra para algumas litologias estudadas devido que não temos uma referência de especificação para uso em revestimentos asfálticos deste método, o procedimento detalhado do ensaio está descrito no item 2.4.2.1 e Figura 3.10. A altura de queda dos agregados deve ser sempre a mesma para todos as amostras ensaiada variando de 115 +- 2 mm, devido que esta especificação interfere nos resultados, sendo que quanto mais elevada a altura que queda mais os agregados iram se compactar. Após a queda livre do agregado fino deve-se ter um cuidado ao nivelar para não compactar os agregados finos com auxílio da régua. São compostas três amostras para cada agregado fino ensaiado e para cada um dos métodos.

### **3.2.3 Avaliação visual esfericidade, angularidade e textura dos agregados finos**

A análise visual dos agregado finos tem por finalidade determinar a esfericidade, a angularidade e textura superficial, sendo seguido o método de análise apresentado por Suguio (1973) e a ANBT NBR 7389-1/2009 que é baseado na tabela de comparação de angularidade, esfericidade do agregado fino e a textura superficial das partículas classificadas em lisa, polida e rugosa. O ensaio foi realizado em com o Laboratório de Laminação do Departamento de Geociências à Universidade Federal de Santa Maria.

Figura 3.10 - Procedimento ensaio FAA, (a) equipamento; (b) agregado fino acomodado; (c) queda livre do agregado fino; (d) após a queda; (e) agregado fino rasado para pesagem; (f) pesagem do agregado.



O primeiro passo para iniciar o ensaio de avaliação visual da esfericidade, angularidade e textura superficial dos agregados finos é a separação das amostras conforme as frações utilizadas no ensaio de FAA (angularidade do agregado fino) método A, este método foi adotado devido a especificação superpave referir-se ao uso em misturas asfálticas conforme o fluxo de veículos. A Tabela 3.3 e a Figura 3.11 descrevem e demonstram as frações separadamente. Cada uma das frações é analisada microscopicamente separada em cada uma das 4 frações utilizada.

Construiu-se uma tabela de análise seguindo as especificações conforme a Figura 3.12, onde foi adotado um valor para a esfericidade, o grau de arredondamento/angularidade e a textura superficial para identificar cada uma das combinações. Valores maiores para esfericidade e menores para o grau de angularidade, através desta identificação numérica que foi adotada pode-se fazer uma

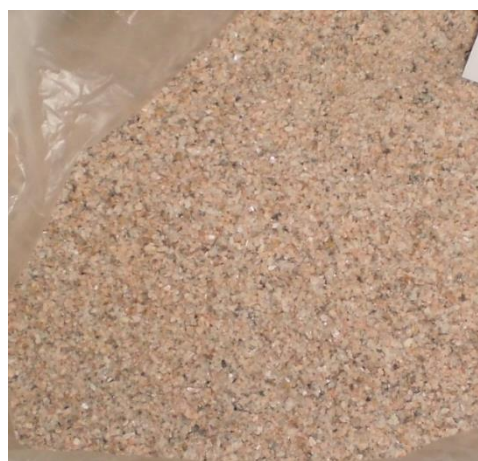
soma entre esfericidade e grau de arredondamento/angularidade devido que cada combinação apresenta um valor específico. Na Tabela 3.4 está apresentado de forma resumida os valores referentes a esfericidade, grau de arredondamento/angularidade e textura superficial.

Analisar a esfericidade, o grau de arredondamento/angularidade e a textura superficial do agregado fino com auxílio do microscópio identificou-se (Tabela 3.5) qual o valor que mais se aproximava com o agregado que está sendo analisado.

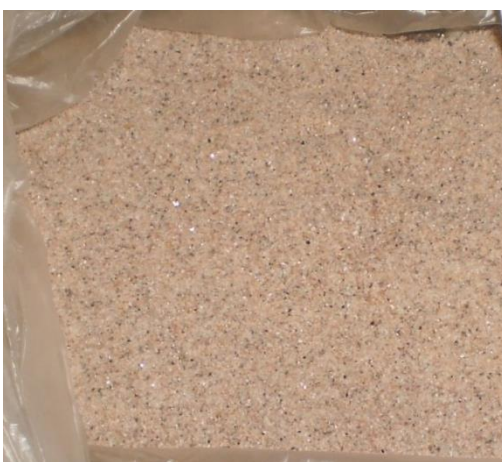
Figura 3.11 - Frações do FAA método A, (a) passante # 8 e retido # 16; (b) passante # 16 e retido # 30; (c) passante # 30 e retido # 50 e (d) passante #50 e retido # 100.



(a)



(b)



(c)



(d)

Tabela 3.3 - Frações método A ensaio FAA

Peneiras método A	
Passante	Retido
# 8 (2,36mm)	# 16 (1,16mm)
# 16 (1,16mm)	# 30 (60mm)
# 30 (60mm)	# 50 (30mm)
# 50 (30mm)	# 100 (0,15mm)

Tabela 3.4 – Referencia tabela para análise.

GRAU DE ARREDONDAMENTO	Anguloso	1
	Subanguloso	2
	Subarredondado	3
	Arredondado	4
GRAU DE ESFERICIDADE	Esférico	10
	Subalongado	20
	Alongado	30
	Bem alongado	40
TEXTURA SUPERFICIAL	Lisa	1
	Rugosa	2
	Polido	3

Figura 3.12 - Graus de angularidade e esfericidade

ESFERICIDADE	ARREDONDADO 10				
	SUBALONGADO 20				
	ALONGADO 30				
	BEM ALONGADO 40				
Grau de Arred.	Anguloso 1	Subanguloso 2	Subarredond. 3	Arredondado 4	

Fonte: Russel & Taylor (1937) *apud* Suguio (1973) e Gouveia *et al.* (2015)

Foi identificado dois números devido que os agregados tendem de uma esfericidade para outra, anotamos em uma planilha a tendência numérica do que mais

apresenta partículas (P) para o segundo (S) que mais contém partículas (podendo apresentar domínio de apenas uma esfericidade e arredondamento/angularidade).

A textura superficial foi classificada quanto ao seu grau de rugosidade, sendo: lisa, rugosa e polida. Na Tabela 3.5 temos um exemplo de como foi feita as anotações, as análises foram feitas seguindo as anotações através da soma entre os números anotados para cada um dos agregados, somamos a esfericidade com o arredondamento/angularidade, teremos dois valores referente a soma sendo ela SOMA P e SOMA S, devido que muitos deles apresentam duas predominância de esfericidade e arredondamento/angularidade para o mesmo agregado.

Tabela 3.5 – Exemplo da planilha de análise esfericidade, grau de angularidade e textura superficial.

<b>Material: Passante #8 Retido #16</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Litologia</b>	<b>Grau de esfericidade</b>	<b>Grau de arredondamento</b>	<b>Textura superficial</b>
A01 - Cruz Alta	Basalto	30 -- 20	2 -- 3	2
A20 - Capão Do Leão	Granito	40 -- 30	1	3
A10 - Bagé	Mármore	30 -- 40	1	1
<b>Material: Passante #16 Retido #30</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Litologia</b>	<b>Grau de esfericidade</b>	<b>Grau de arredondamento</b>	<b>Textura superficial</b>
A01 - Cruz Alta	Basalto	30 -- 20	3	2
A20 - Capão Do Leão	Granito	30 -- 40	1	3
A10 - Bagé	Mármore	30 -- 40	1	1
<b>Material: Passante #30 Retido #50</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Litologia</b>	<b>Grau de esfericidade</b>	<b>Grau de arredondamento</b>	<b>Textura superficial</b>
A01 - Cruz Alta	Basalto	30 -- 20	2 -- 3	2
A20 - Capão Do Leão	Granito	40 -- 30	1	3
A10 - Bagé	Mármore	30 -- 40	1	1
<b>Material: Passante #50 Retido #100</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Litologia</b>	<b>Grau de esfericidade</b>	<b>Grau de arredondamento</b>	<b>Textura superficial</b>
A01 - Cruz Alta	Basalto	30 --20	2 --1	2
A20 - Capão Do Leão	Granito	30 -- 40	1	3
A10 - Bagé	Mármore	30	1	1



### 3.2.4 Ensaio de AIMS

O ensaio de AIMS também se refere a análise da esfericidade, a angularidade e a textura superficial dos agregados finos, foi realizado pela COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia) através de imagens.

O AIMS é normatizado pela AASHTO TP 81-12/17 consiste em, inicialmente, quarterar e fracionar os agregados na série de peneiras americana. Os agregados miúdos, a disposição das partículas deve ser feita de forma a evitar a formação de aglomerados de partículas na bandeja, conforme a Figura 3.13.

O ensaio de AIMS analisa a forma bidimensional e a angularidade dos agregados miúdos. Sendo necessário avaliar 150 partículas de agregados miúdos para que seja possível obter um resultado que represente adequadamente as propriedades do material analisado. Após a realização das análises das imagens, o software gera planilhas com resultados e gráficos para os parâmetros investigados.

Figura 3.13 - Equipamento AIMS.



Fonte: Pazos (2015)

A partir dos dados fornecidos pelo AIMS, é possível classificar os valores obtidos para as propriedades de forma. O parâmetro de forma 2D quantifica a forma de imagens bidimensionais de partículas de agregados miúdos. O parâmetro varia de 0 a 20, com partículas circulares (low/baixo) tendo valores de forma 2D mais próximos de zero e partículas mais alongadas (extreme/extremo) mais próximas de 20. No que diz respeito à angularidade, aplicada para agregados graúdos e miúdos, sua escala

varia de 0 a 10.000, quanto maior for o valor dessa propriedade, mais angular será a partícula de agregado.

$$Forma\ 2D = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[ \frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (3.6)$$

Onde:

$R_{\theta}$  = Raio da partícula do ângulo  $0^{\circ}$ ;

$\Delta\theta$  = Diferença de incremento no ângulo.

$$Angul. = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} |\theta_1 - \theta_{i+3}| \quad (3.7)$$

Onde:

$\theta$  = ângulo de orientação dos pontos de borda;

$n$  = Número total de pontos;

$i$  =  $i$ -ésimo ponto de borda da partícula.

Em seus estudos, Al Rousan (2004) realizou ensaios com diversos tipos de agregados com a finalidade de obter um método de classificação baseado em parâmetros de textura, angularidade e forma para os agregados, incluindo para isso, complexos métodos estatísticos. Sendo assim, a classificação dos agregados com base nos limites propostos por Al Rousan (2004) são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Valores limites

PROPRIEDADE	Valores Limite / Classificação			
	Forma 2D	< 6,5	6,5 - 8,0	8,0 - 10,5
Circular		Semicircular	Semialongado	Alongado
Angularidade	< 2.100	2.100 - 4.000	4.000 - 5.400	>5.400
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular

Fonte: Al Rousan, 2004.

### 3.2.5 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia diretamente no critério de Mohr-Coulomb. A envoltória de resistência do agregado fino e seus principais parâmetros são: coesão e ângulo de atrito.

O procedimento do ensaio inicia-se na:

- Preparação da amostra para o ensaio onde os materiais granulares a serem utilizados são secos em estufa a 105 °C, separados, por peneiramento a seco, nas frações correspondentes, sendo depois pesados e remisturados de acordo com a granulometria especificada e nas quantidades previstas nesta Tabela 2.3 (método A, B e C). Sendo composta amostras de 190 g de material para cada uma das tensões normais a serem utilizadas 192, 383 e 500 kPa, tensões de confinamento que o pavimento é submetido quando solicitado pelo tráfego (Gouveia, 2002).

- O desenvolvimento do ensaio de cisalhamento direto inicia-se quando a amostra é acomodada dentro de um recipiente formado de dois anéis iguais e superpostos (dispositivo de cisalhamento direto) com dimensões de 5,075 x 5,078 cm e volume de 104,27 cm<sup>3</sup>. Em seguida, a amostra é submetida a compactação por vibração durante 60s, cuidadosamente compactado para alcançar o maior nível de compactação possível. Após a compactação, o dispositivo de cisalhamento que contém o corpo-de-prova é colocado na prensa de cisalhamento, onde a metade superior do corpo de prova deslizava em relação à inferior. O corpo de prova é inicialmente submetido a uma força normal, espera-se estabilizar as deformações e posteriormente aplicava-se uma força cisalhante que impõe um deslocamento horizontal da parte superior do anel, a uma taxa constante de deformação cisalhante de 0,5 mm/min na amostra até a ruptura do corpo de prova. Três leituras são tomadas durante o ensaio: deslocamento horizontal, força cisalhante aplicada e deformação vertical.

A tensão de cisalhamento é obtida pela divisão da força pela área cisalhante, como mostra a equação 3.8:

$$\tau = \frac{Fhc}{A} \quad (3.8)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão cisalhante (kgf/cm<sup>2</sup>);

Fhc = Força horizontal cisalhante aplicada (kgf);

A = Área do corpo-de-prova (cm<sup>2</sup>).

O cálculo da força horizontal cisalhante aplicada é obtido através da equação

3.9:

$$Fhc = Lm \times k \quad (3.9)$$

Onde:

Fhc = Força horizontal cisalhante aplicada (kgf);

Lm = Leitura do extensômetro Lm (0,001 mm);

k = Constante da mola do anel de 500 Kg (0,16 kgf/divisão).

As deformações horizontais e vertical são determinadas a partir dos deslocamentos e das dimensões da amostragem, como mostram as equações 3.10 e 3.11.

$$\varepsilon_h = \frac{Lh}{L} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (3.11)$$

Onde:

$\varepsilon_h$  = Deformação horizontal (%);

Lh = Deslocamento horizontal medido através das leituras do extensômetro (Lh) (mm);

L = Dimensão lateral da amostra (mm);

$\varepsilon_v$  = Deformação vertical (%);

$\Delta V$  = Variação de volume, medido através das leituras do extensômetro (Lv) (mm);

$V_0$  = Volume inicial da amostra, medido através da leitura inicial do extensômetro (Lv).

### **3.2.6 Análise de resultados**

Após o término de todos os ensaios a fim de alcançar os objetivos propostos, foram realizadas análises individuais e comparando com outros resultados a fim de verificar a relação entre os resultados de FAA com análise visual, AIMS e cisalhamento direto. Utilizou-se o software ANOVA e teste TUKEY para realizar a análise de correlação linear entre os resultados obtidos.



## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios em laboratório. Inicialmente apresenta-se os resultados e análises dos ensaios de caracterização física dos agregados finos estudados, em sequência apresenta-se as análises e a correlação dos resultados referente a angularidade e cisalhamento diretos dos agregados finos ensaiados.

### 4.1 ANÁLISE E DISCUÇÃO DOS ENSAIOS DA CARACTERIZAÇÃO

#### 4.1.1 Analise Granulometria

A granulometria dos agregados pode ser considerada uma das principais propriedades nas características das misturas asfálticas, afetando a permeabilidade, trabalhabilidade, rigidez, danos por umidade, estabilidade entre outros.

A concentração de maior quantidade de material retido referente aos pó-de-pedras analisados se encontra na peneira de abertura 2,36 mm (#8) e a duas areias analisadas é na peneira de abertura 0,30 mm (#50), as amostras das pedreiras e areias de A1 - Cruz Alta, A12 - Passo Fundo, A14 - Areia de Cava, A15 - Areia Natural, A17 - Uruguaiana, A19 - Santo Antônio da Patrulha e A22 - São Luiz Gonzaga apresentação matéria retido na peneira de abertura 9,5 mm. A Figura 4.1 demonstra a granulometria de cada uma das amostras analisadas e estudas.

A Tabela 4.1 analisa alguns pontos específicos referente a granulometria dos agregados estudados como o coeficiente de uniformidade (Cu), diâmetro efetivo (Def.) e o coeficiente de curvatura (CC), na Figura 4.2 podemos identificar as amostras quanto a graduação e uniformidade, como se pode analisar a penas a pedreira A7 e A19 não apresenta uniformidade em sua granulometria, as areais amostra A14, A15 e agregado fino de litologia riodacito A18 presente excelente uniformidade e as demais pedreiras contém uniformidade média.

A graduação do solos através do CC indica que as amostras A7, A8, A9, A10, A14 e A16 ser mal graduada e granulometria aberta, as demais amostras são bem graduadas. Sendo que a areia de cava apresentou excelente uniformidade, mal graduada e granulometria aberta, apresentando assim ausência de alguns grãos.

Figura 4.1 – Análise Granulométrica.

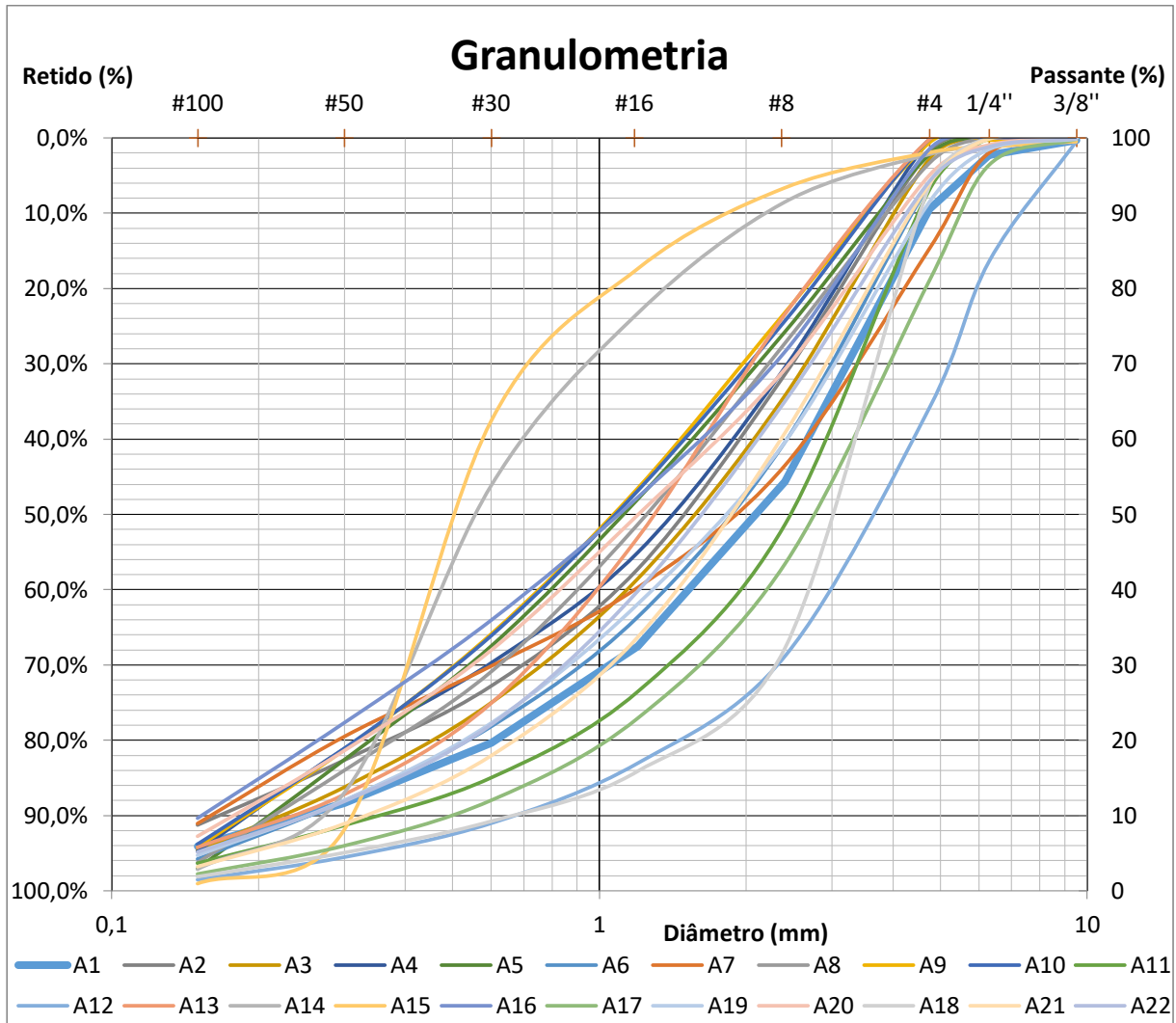


Figura 4.2 – Análise graduação agregados.

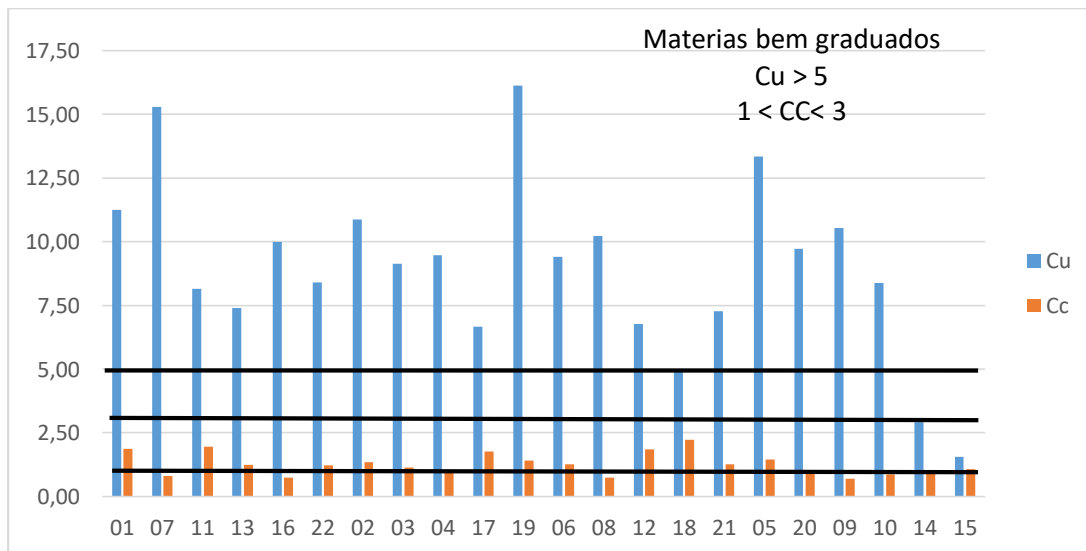




Tabela 4.1 – Coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (CC).

Amostra	Local	Litologia	Dmáx (mm)	Modulo Finura	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	CC
A01	Cruz Alta	Basalto	6,30	4,88	0,240	1,10	2,70	11,25	1,87
A07	Santa Rosa	Basalto	6,30	4,61	0,170	0,60	2,60	15,29	0,81
A11	Dilermando de Aguiar	Basalto	6,30	5,04	0,350	1,40	2,85	8,14	1,96
A13	Erechim	Basalto	4,75	4,33	0,230	0,70	1,70	7,39	1,25
A16	Santa Cruz do Sul	Basalto	4,75	4,10	0,165	0,45	1,65	10,00	0,74
A22	São Luiz Gonzaga	Basalto	6,30	4,63	0,250	0,80	2,10	8,40	1,22
A02	Santana do Livramento	Diabásio	4,75	4,37	0,175	0,67	1,90	10,86	1,35
A03	Santa Maria - CT	Diabásio	4,75	4,51	0,230	0,74	2,10	9,13	1,13
A04	Sarandi	Diabásio	4,75	4,31	0,190	0,59	1,80	9,47	1,02
A17	Uruguaiana	Diabásio	6,30	5,36	0,480	1,65	3,20	6,67	1,77
A19	Santo Antônio da Patrulha	Diabásio	6,30	4,73	0,155	0,74	2,50	16,13	1,41
A06	Itaara - DP	Riodacito	6,30	4,72	0,255	0,88	2,40	9,41	1,27
A08	Itaara - BP	Riodacito	4,75	4,33	0,220	0,61	2,25	10,23	0,75
A12	Passo Fundo	Riodacito	9,50	5,90	0,650	2,30	4,40	6,77	1,85
A18	Itaara - CP	Riodacito	6,30	5,42	0,660	2,20	3,30	5,00	2,22
A21	Itaara - Areia	Riodacito	6,30	4,82	0,330	1,00	2,40	7,27	1,26
A05	Eldorado do Sul	Granito	4,75	4,23	0,120	0,53	1,60	13,33	1,46
A20	Capão do Leão	Granito	4,75	4,29	0,180	0,54	1,75	9,72	0,93
A09	Caçapava do Sul	Mármore	4,75	4,12	0,185	0,50	1,95	10,54	0,69
A10	Bagé	Mármore	4,75	4,12	0,185	0,50	1,55	8,38	0,87
A14	Passo do Verde cava	Areia	4,75	3,66	0,250	0,40	0,73	2,92	0,88
A15	Passo de Verde leito	Areia	2,40	3,56	0,310	0,40	0,48	1,55	1,08
Valor médio:			5,493	4,547	0,272	0,877	2,178	8,993	1,263
Valor máximo:			9,500	5,900	0,660	2,300	4,400	16,130	2,220
Valor mínimo:			2,400	3,560	0,120	0,400	0,480	1,550	0,690
Desvio Padrão:			1,337	0,553	0,147	0,544	0,846	3,446	0,438
Coeficiente de variação:			0,243	0,122	0,541	0,620	0,389	0,383	0,347

#### 4.1.2 Índice físicos e massa unitária

A Tabela 4.2 apresentada a seguir, são exibidos os resultados dos ensaios de índice físicos, apresentado os resultados massa especifica aparente (M.E.A), absorção, porosidade, massa unitária e os três métodos distintos para identificarmos a massa especifica real dos agregados (M.E.R.), no estado solto dos materiais estudados.

Os resultados obtidos através do ensaio M.E.R e M.E.A. método ASTM C 128, mostra que a rocha mais densa é o diabásio da amostra A4 (3,068 g/cm<sup>3</sup> e 2,880 g/cm<sup>3</sup>) seguida pela amostra de basalto A7 (3,041 g/cm<sup>3</sup> e 2,877 g/cm<sup>3</sup>), os granitos ensaiados apresenta os valores mais baixos (2,560 g/cm<sup>3</sup> e 2,514 g/cm<sup>3</sup>) e (2,588 g/cm<sup>3</sup> e 2,551 g/cm<sup>3</sup>) seguido pelas amostras de areia. A baixa densidade dos agregados graníticos e areias se dá em virtude da composição mineralógica que indica minerais de menores densidades como quartzo e já os de alta densidade se dá devido a formação mineralogia apresentando em sua composição feldspato e piroxênio, matérias de maior densidade.

Podemos observar que os três métodos distintos adotados para o ensaio de M.E.R. temos valores diferenciados, com variações entre cada um dos métodos ensaiados, os resultado obtidos através do ensaio M.E.R. Picnômetro é significativamente mais elevados que os outros dois métodos utilizados podemos observar de moda mais significativo na figura 4.3. Analisando os três métodos utilizados para obter a M.E.R dos agregado finos separando-os por litologia observamos através de analises estatístico ANOVA junto ao teste Tukey que todos os resultados se correlacionam e se equivalem entre si.

Podemos observar que a porosidade dos agregados finos varia de acordo com a absorção e a amplitude entre a M.E.R. e M.E.A, quanto menor a absorção menor a porosidade podendo ser observado na Figura 4.4. Os agregados finos de origem de rochas ígneas vulcânicas básicas e ácidas apresentam absorção superior a 1%, já a litologia Riodacito a absorção é superior a 2,64%, os agregados finos de litologia granito e areia apresentam absorção inferior a 1% e os mármoreos variam entre 1% abaixo ou acima.

Tabela 4.2 – Índice físicos, porosidade e massa unitária.

Amost.	Local	Litologia	M.E.R (g/cm <sup>3</sup> ) Chapmann	M.E.R (g/cm <sup>3</sup> ) Picnôm.	M.E.R. ASTM C 128 (g/cm <sup>3</sup> )	M.E.A. ASTM C 128 (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Poros. (%)	Massa Unitária	Valor Médio M.E.R.	Desvio Padrão M.E.R.	Coef. de Variação M.E.R.
A01	Cruz Alta	Basalto	2,944	2,903	2,980	2,799	2,392	6,68	1,84	2,953	0,062	0,021
A07	Santa Rosa	Basalto	2,963	3,065	3,041	2,877	1,866	5,39	2,17			
A11	Dilermando de Aguiar	Basalto	2,857	2,970	2,974	2,489	1,769	5,01	1,92			
A13	Erechim	Basalto	2,830	3,004	2,989	2,644	2,718	7,53	1,86			
A16	Santa Cruz do Sul	Basalto	2,857	2,927	2,945	2,529	1,775	4,96	1,99			
A22	São Luiz Gonzaga	Basalto	2,941	3,005	2,967	2,841	1,496	4,25	2,25			
A02	Santana do Livramento	Diabásio	2,841	2,979	2,814	2,825	2,279	6,04	1,61	2,867	0,126	0,044
A03	Santa Maria - CT	Diabásio	2,675	2,754	2,693	2,736	2,501	6,09	1,89			
A04	Sarandi	Diabásio	2,949	3,087	3,068	2,880	2,130	6,13	2,09			
A17	Uruguaiana	Diabásio	2,840	2,952	2,943	2,486	2,570	7,03	1,94			
A19	Santo Antônio da Patrulha	Diabásio	2,759	2,834	2,814	2,465	2,478	6,50	2,05			
A06	Itaara - DP	Riodacito	2,589	2,679	2,680	2,465	2,847	7,13	1,86	2,645	0,050	0,019
A08	Itaara - BP	Riodacito	2,667	2,574	2,667	2,464	2,724	6,79	1,81			
A12	Passo Fundo	Riodacito	2,625	2,687	2,674	2,514	3,157	7,82	1,64			
A18	Itaara - CP	Riodacito	2,564	2,673	2,637	2,551	2,640	6,52	1,78			
A21	Itaara - Areia	Riodacito	2,559	2,710	2,686	2,712	3,352	8,27	1,81			
A05	Eldorado do Sul	Granito	2,620	2,648	2,560	2,514	0,719	1,80	1,85	2,604	0,030	0,011
A20	Capão do Leão	Granito	2,601	2,607	2,588	2,551	0,567	1,43	1,86			
A09	Caçapava do Sul	Mármore	2,734	2,803	2,772	2,579	0,802	2,16	1,72	2,769	0,025	0,009
A10	Bagé	Mármore	2,747	2,775	2,782	2,799	1,204	3,24	1,92			
A14	Passo do Verde cava	Areia	2,610	2,617	2,622	2,841	0,480	1,26	1,86	2,619	0,008	0,003
A15	Passo de Verde leito	Areia	2,614	2,620	2,632	2,644	0,774	2,01	1,93			

Figura 4.3 – Análise dos três métodos de M.E.R. (a) picnômetro x chapmann; (b) ASTM C 128 x chapmann; (c) ASTM C 128 x picnômetro.

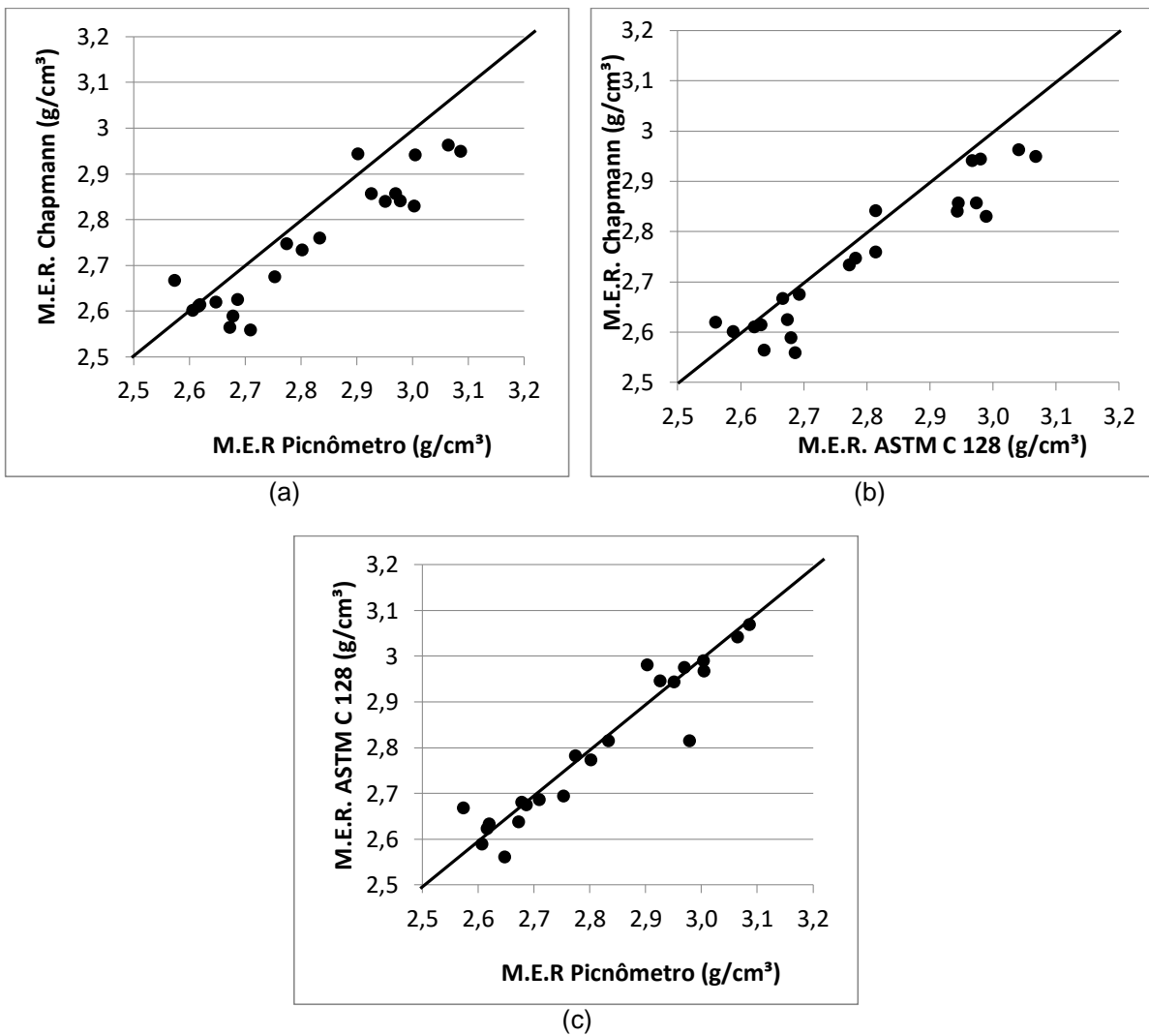
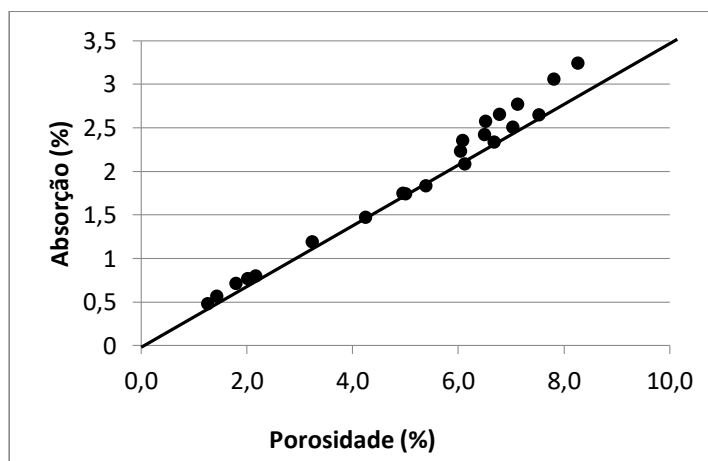
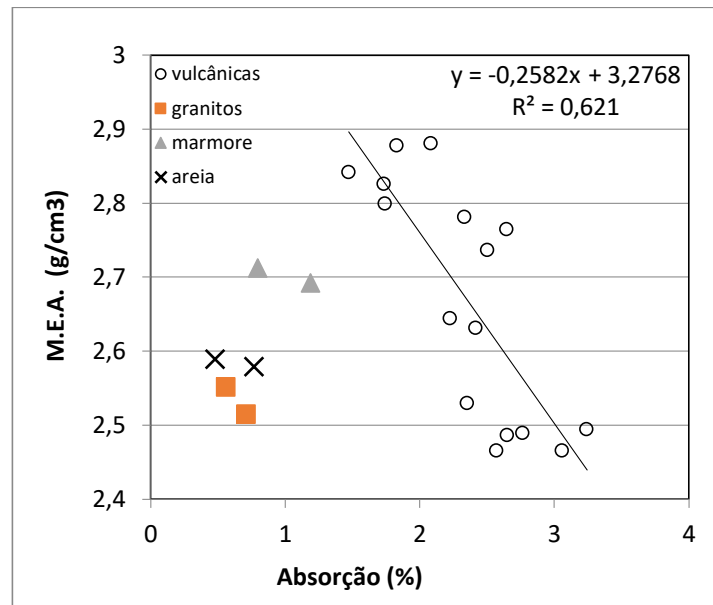


Figura 4.4 – Análise porosidade x absorção.



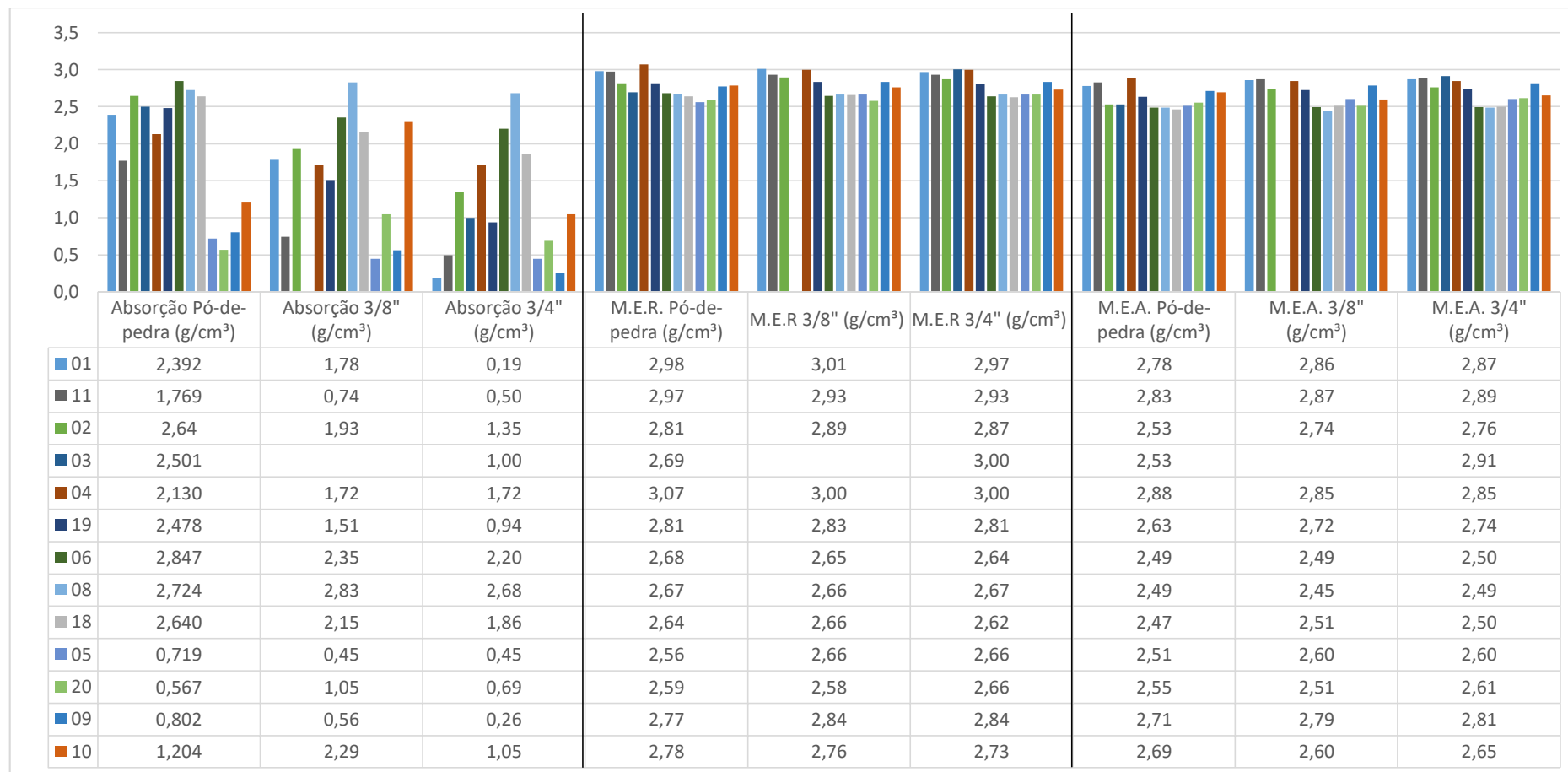
Observando a Figura 4.5 podemos constatar que os agregados finos de litologia basalto, diabásio e riodacito quanto mais elevado a M.E.A. menor será a absorção, seguindo uma relação de linearidade. Os demais agregados finos ensaios não podemos fazer esta comparação devido ao baixo número de amostras analisadas.

Figura 4.5 – Análise absorção x M.E.A.



Através de resultados obtidos por Back (2018), Paiva (2017) e Boeira (2014) de agregados graúdos podemos observar que os agregados finos tendem a absorver mais e a M.E.A. é menor, como mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – M.E.A. e absorção agregados finos e graúdos.



Fonte: Autor, Back (2018), Paiva (2017) e Boeira (2014)

### 4.1.3 Equivalente de areia

O ensaio de Equivalente de areia avalia a qualidade dos agregados miúdos, medindo a proporção de impurezas como: vegetação, argila entre outros. A Tabela 4.3 descreve os valores encontrados de cada uma das 22 amostras coletadas entre pó-de-pedra e areia.

Tabela 4.3 – Equivalente de areia.

Amostra		Equivalência de areia (%)	Especificações
A01	Cruz Alta	68,74	≥ 50% (DAER ES-P 16/91) ≥ 55% (DNIT ES 31/06) ≥ 55% (DNIT ES 152/10)
A07	Santa Rosa	86,32	
A11	Dilermando de Aguiar	87,76	
A13	Erechim	51,56	
A16	Santa Cruz do Sul	89,05	
A22	São Luiz Gonzaga	90,11	
A02	Santana do Livramento	78,26	
A03	Santa Maria - CT	91,18	
A04	Sarandi	86,36	
A17	Uruguaiana	98,89	
A19	Santo Antônio da Patrulha	90,72	
A06	Itaara - DP	85,55	
A08	Itaara - BP	76,81	
A12	Passo Fundo	88,07	
A18	Itaara - CP	100,00	
A21	Itaara - Areia	92,31	
A05	Eldorado do Sul	91,00	
A20	Capão do Leão	89,12	
A09	Caçapava do Sul	78,95	
A10	Bagé	76,51	
A14	Passo do Verde cava	76,15	
A15	Passo de Verde leito	96,63	

Todas as 22 (vinte e duas) amostras estão dentro dos especificações do DNIT e DAER, o que apresentou menor valor de Equivalente de areia é a amostra A1, mais ainda dentro das especificações exigidas.

#### 4.1.4 Avaliação visual esfericidade, angularidade e textura

A Tabela 4.4 descreve as combinações das somas obtidas através da avaliação visual da angularidade e esfericidade dos agregados finos, já na Tabela 4.5 obtemos os valores para cada uma das 22 amostras e a textura superficial, sendo separadas em: areia, granito, mármore, riolacito, basalto e diabásio.

De acordo com a avaliação visual referente a textura superficial as amostras de mármore e areia (A9, A10, A14 e A15) apresentam textura lisa, os granitos (A5 e A20) textura polida e as demais amostras de basalto, diabásio, riolacito textura rugosa.

Os agregados que mais se enquadram referente a esfericidade e angularidade correspondente para um bom desempenho junto aos pavimentos asfálticos são os que tem mais de 50% de suas somas (P e S) valores 21, 22, 31 e 32, sendo eles os agregados oriundos das pedreiras: A11, A16, A19, A06, A21, A05, A08, A09 e A10, já os que podemos considerar intermediários (volume de tráfego médio a leve) são A01, A03, A13, A22, A12 e A20 as demais amostras não seria de bom uso em pavimentos asfálticos devido ao excesso de partículas alongadas e arredondadas levando em consideração que as partículas alongadas são frágeis a ação de esforços quando solicitadas rompendo muitas vezes já na compactação do revestimento asfáltico.

Tabela 4.4 – Combinação das somas.

11	Arredondado anguloso
12	Arredondado subanguloso
13	Arredondado Subarredondado
14	Arredondado Arredondado
21	Subalongado anguloso
22	Subalongado subanguloso
23	Subalongado Subarredondado
24	Subalongado arredondado
31	Alongado anguloso
32	Alongado subanguloso
33	Alongado subarredondado
34	Alongado arredondado
41	Bem alongado anguloso
42	Bem alongado Subanguloso
43	Bem alongado Subarredondado
44	Bem alongado Arredondado

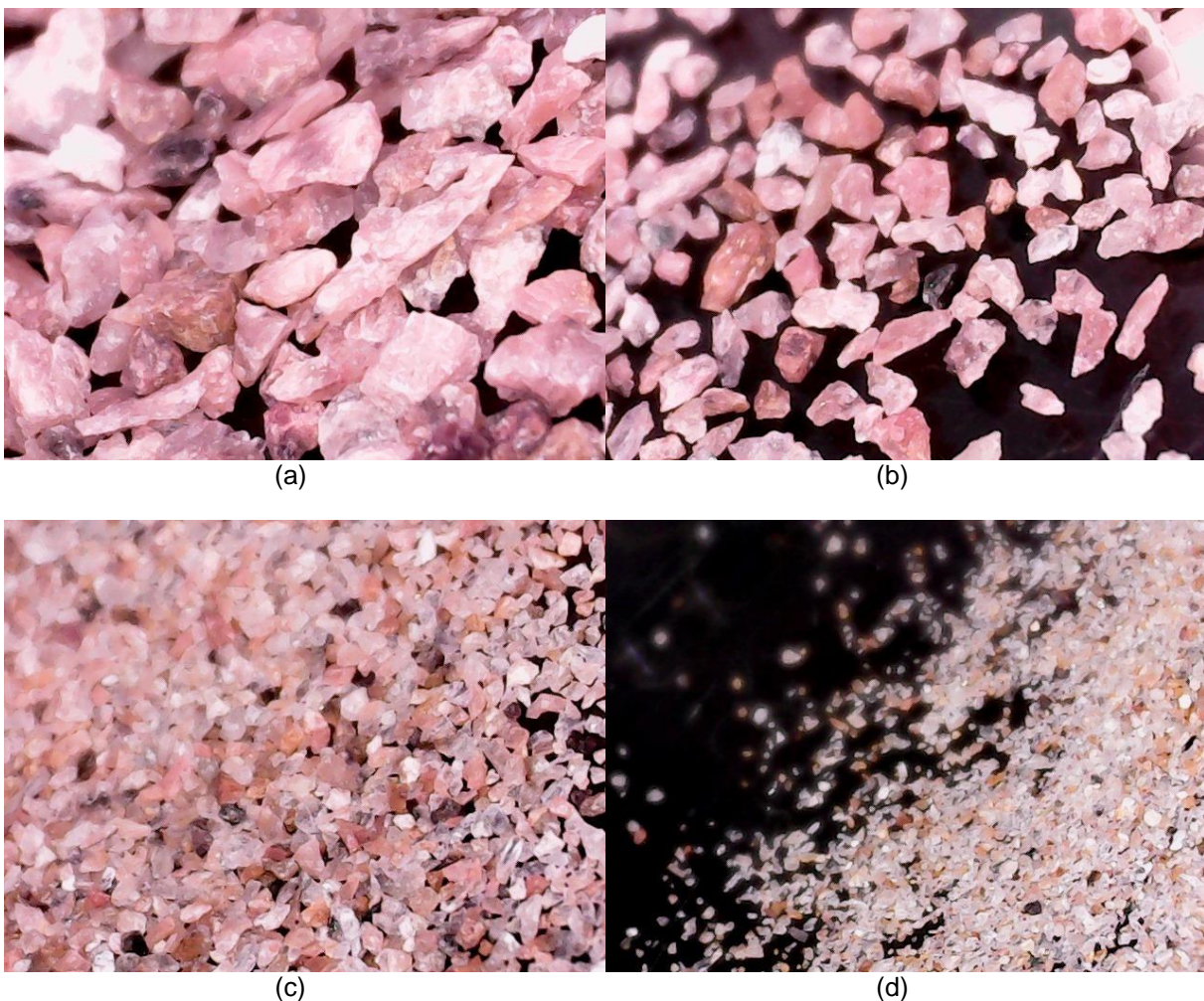


Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de avaliação visual de angularidade, esfericidade e textura superficial.

Amostra		Litologia	Esfericidade/angularidade								Textura superficial
			Retido # 16		Retido # 30		Retido # 50		Retido # 100		
			Soma P	Soma S	Soma P	Soma S	Soma P	Soma S	Soma P	Soma S	
A01	Cruz Alta	Basalto	32	23	33	23	32	23	32	21	2
A07	Santa Rosa	Basalto	13	24	13	24	13	24	13	24	2
A11	Dilermando de Aguiar	Basalto	22	33	22	31	22	41	22	32	2
A13	Erechim	Basalto	32	23	22	33	32	23	22	33	2
A16	Santa Cruz do Sul	Basalto	22	21	22	33	32	21	32	23	2
A22	São Luiz Gonzaga	Basalto	22	11	21	12	12	21	22	11	2
A02	Santana do Livramento	Diabásio	12	43	12	42	12	43	12	42	2
A03	Santa Maria - CT	Diabásio	22	33	22	33	22	33	22	33	2
A04	Sarandi	Diabásio	23	13	23	32	23	12	32	23	2
A17	Uruguiana	Diabásio	13	44	23	44	23	44	23	44	2
A19	Santo Antônio da Patrulha	Diabásio	22	32	22	33	23	32	22	32	2
A06	Itaara - DP	Riodacito	22	32	32	22	22	32	32	22	2
A08	Itaara - BP	Riodacito	22	12	22	11	22	11	32	21	2
A12	Passo Fundo	Riodacito	41	32	31	42	31	42	31	42	2
A18	Itaara - CP	Riodacito	23	14	23	23	23	33	22	32	2
A21	Itaara - Areia	Riodacito	22	33	22	32	22	13	22	33	2
A05	Eldorado do Sul	Granito	21	32	31	22	41	31	31	41	3
A20	Capão do Leão	Granito	41	31	31	41	41	31	31	41	3
A09	Caçapava do Sul	Mármore	31	31	31	21	31	41	31	41	1
A10	Bagé	Mármore	31	41	31	41	31	41	31	31	1
A14	Passo do Verde Cava	Areia	14	33	14	23	14	23	14	23	1
A15	Passo de Verde Leito	Areia	14	33	14	33	14	33	14	23	1

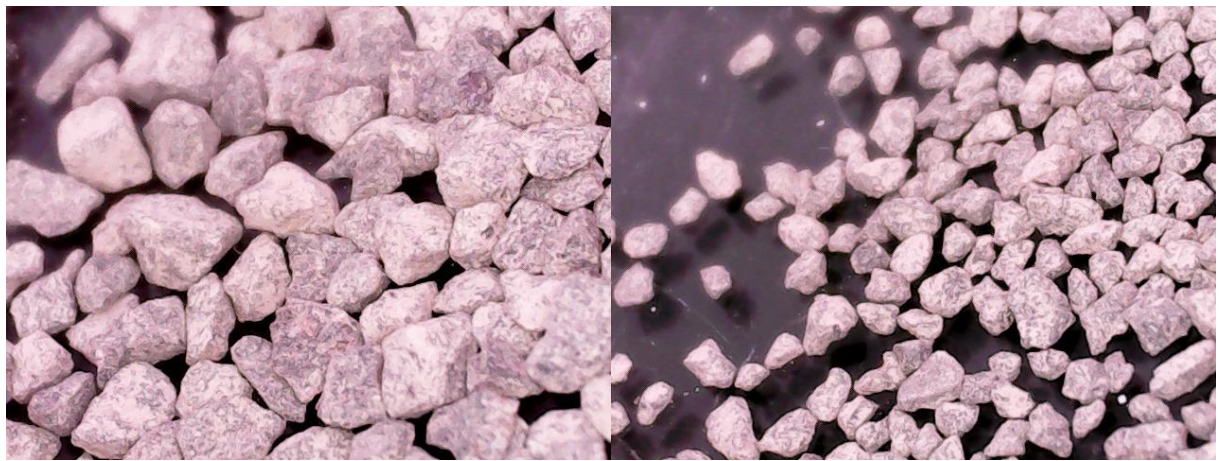
Através das Figuras 4.7 até 4.9 podemos visualizar de forma individual alguns agregados ensaios quanto a angularidade, esfericidade e a textura superficial dos agregados finos, identificando sua composição mineralógica. Na Figura 4.7 amostra A05 – Eldorado do Sul peneira #30 podemos visualizar as particular alongadas, cubicas entre outras esfericidades, é de fácil observação os diferentes minerais que compõem o granito como quartzo e feldspato, com textura superficial polida.

Figura 4.7 – Imagem visual agregado fino de Eldorado do Sul, (a) retido # 16; (b) retido # 30; (c) retido # 50 e (d) retido # 100 (aumento 50x).



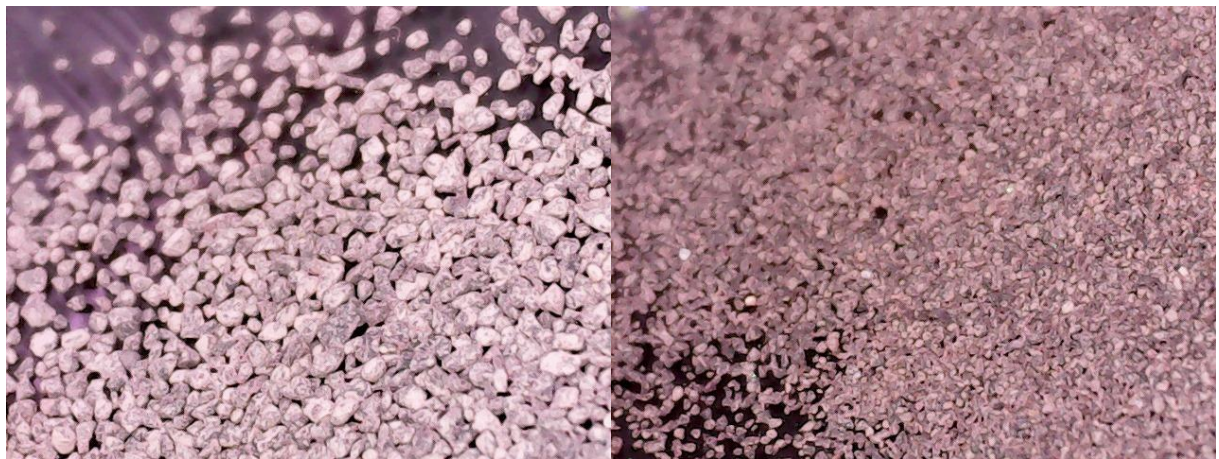
Na Figura 4.8 podemos identificar um agregado oriundo de rocha ígnea básica, diabásio, com presença de esferas cubicas e outras esfericidades não contendo partículas alongadas, apresenta textura superficial rugosa como todos os agregados de litologia do basalto, diabásio e riodacito.

Figura 4.8 – Imagem visual agregado fino Santa Antônio da Patrulha, (a) retido # 16; (b) retido # 30; (c) retido # 50 e (d) retido # 100 (aumento 50x).



(a)

(b)

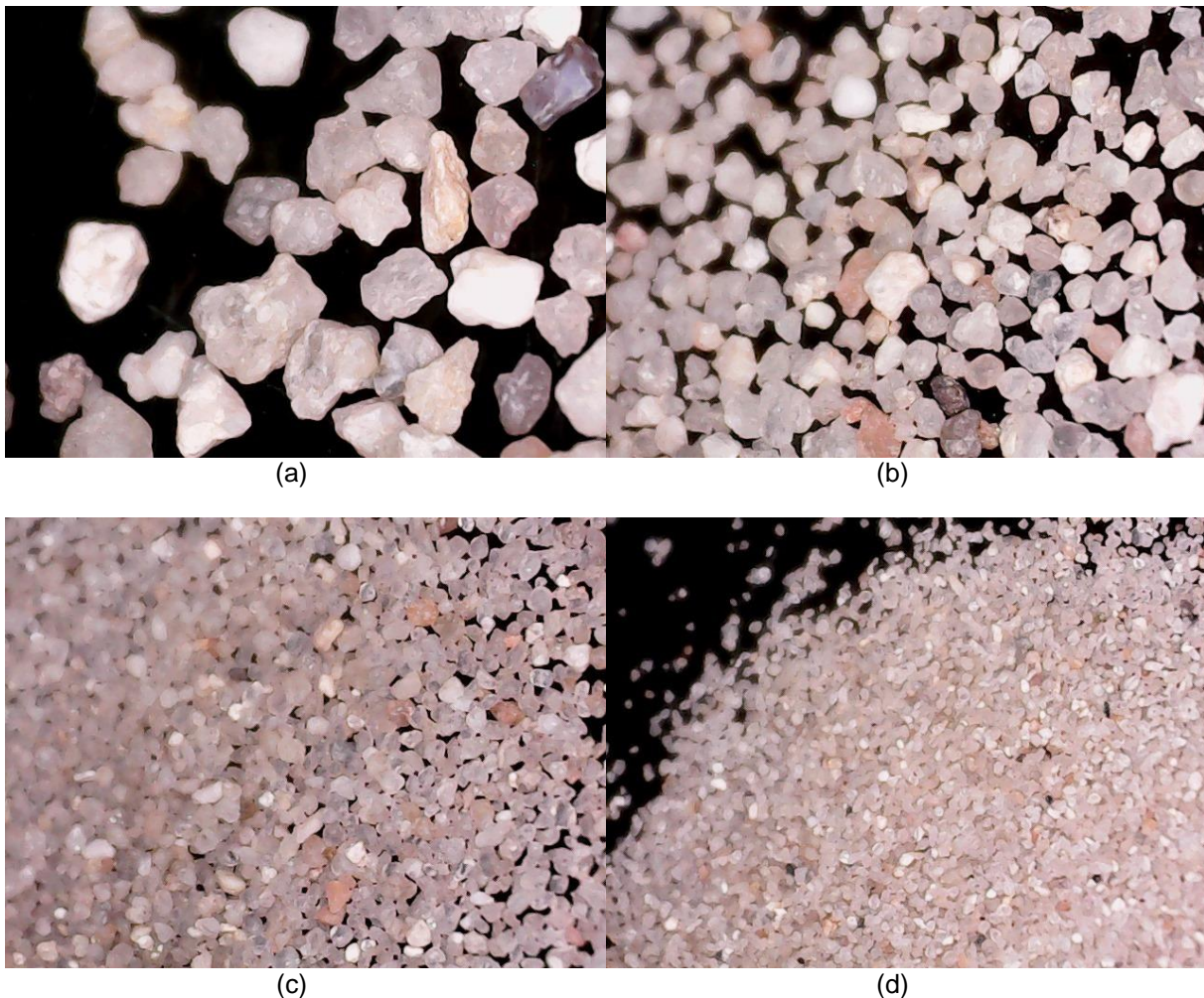


(c)

(d)

A Figura 4.9 temos a amostra A14 - areia natural de cava, agregado mineral que tem sua composição 95% de quartzo e 5% de feldspato tabular, de esfericidade elevada de grãos arredondados com algumas partículas cúbicas e alongadas, textura superficial lisa, os mármore também contém a mesma textura.

Figura 4.9 – Imagem visual areia natural de cava, (a) retido # 16; (b) retido # 30; (c) retido # 50 e (d) retido # 100 (aumento 50x).



#### 4.1.5 AIMS

O ensaio de AIMS 2 determinando a angularidade, textura e esfericidade para as frações graúdas e a angularidade e forma 2D para a fração fina através de imagem digital. O software utilizado no ensaio determina os parâmetros através da compilação da média da distribuição de valores para cada granulometria.

Devido a ser uma metodologia nova para a classificação dos parâmetros de forma, as amostras foram enviadas a COPPE, alguns dos resultados forma utilizados Back (2018), Faccin (2018) e Paiva (2017), conforme demonstrado nas Tabelas 4.6 e a classificação quanto ao método de Al Rousan (2004).

Tabela 4.6 – Resultados AIMS 2.

	Agregado graúdo (> = 4,75mm)				Agregado miúdo			
	Local	Esferic.	Angular.	Textura	Esferic.*	Angular.	Textura*	Forma 2D
A07	Santa Rosa	0,68	2714,48	674,25	0,71	3623,25	702,5	7,62
A11	D. Aguiar	0,78	2741,92	561,97	0,82	3357,65	664,9	7,77
A03	S. Maria Cotrel	0,69	2903,69	608,2	0,71	3467,4	473,6	7,85
A04	Sarandi	0,7	2809,57	666,51	0,72	2676,45	657	7,81
A17	Uruguiana	0,73	2641,28	540,66	0,72	3157,15	564,13	7,73
A19	S. A. Patrulha	0,68	2921,8	264,67	0,67	3789,55	294,5	8,28
A06	Itaara - DP	0,72	3000,03	380,58	0,8	3228,89	370	7,47
A08	Itaara - BP	0,62	3182,52	402,53	0,63	3860,01	399,9	8,89
A18	Itaara - CP	0,69	2931,03	335,9	0,7	3460,26	336,7	7,73
A05	Eldorado	0,65	3217,7	307,36	0,67	3680,82	246	8,86
A20	SBS - Capão	0,63	3140,08	211,28	0,64	3547,85	179,17	8,75
A09	Caçapava	0,65	3217,7	307,36	0,67	3680,62	246	8,86
A10	Bagé				0,6	3495,2	282,3	8,34

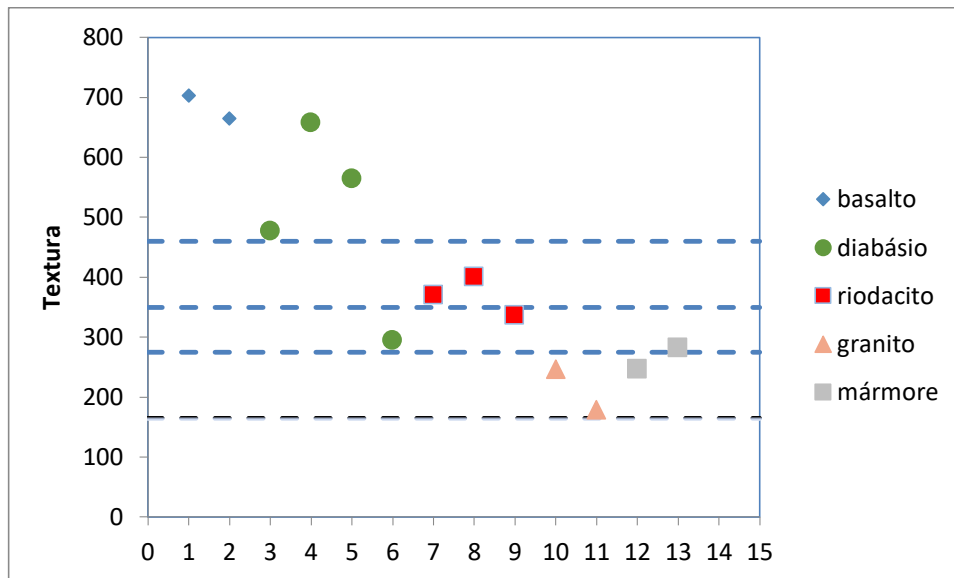
\* # peneira 4,75mm

Comparando a análise visual da esfericidade, arredondamento/angularidade e textura superficial com o ensaio de AIMS observamos que alguns agregados temos algumas divergências referente a esfericidade e arredondamento/angularidade agregados considerados angulosos através da a análise visual e no ensaio de AIMS é arredondado.

Observando a Figura 4.10 podemos constatar a textura superficial dos agregado finos identificados como rugosos através da análise visual com auxílio do microscópio através do ensaio de AIMS eles variam o de grau de rugosidade, as rochas de litologia diabásio como podemos observar pode ser de alta rugosidade (> 460) até ser consideradas polidas (135 – 275) variando de acordo com a sua formação geológica e o sistema de britagem.

Já os agregados de litologia riodacito apresentam textura superficial de rugosidade moderada (350 – 460). Este resultados de grau de rugosidade dos agregados finos só conseguimos observar através do ensaio de AIMS, já os agregados polidos e liso que são as areias, mármore e granitos podemos identificar com o auxílio do microscópio de forma significativa.

Figura 4.10 – Textura superficial agregados finos AIMS.



#### 4.1.6 Ensaio de Angularidade do Agregado Fino

Os resultados obtidos nos ensaios de FAA métodos A, B e C, descritos na Tabela 4.7, e a Figura 4.11 temos os resultados dos individuais do método A, onde podemos observar que a amostra de agregado miúdo de litologia diabásio A19 e as areias natural e de cava não atende as especificações SUPERPAVE para volume de tráfego alto, cujo o valor de FAA mínimo é de 45 %. Mas é considerado aceitável para volume de tráfego médio e baixo, por apresentar seu valor entre 40 e 45 %.

O método B já temos valores mais elevados para todas as amostras referente aos valores correspondentes ao método A que pode ser observado na Figura 4.12, sendo que a areia do leito não se enquadra nas especificações para volume de tráfego alto. Já os resultados obtidos das seis amostras ensaiadas através do método C, temos uma queda brusca, não atende as especificações para volume de tráfego alto para nem uma amostra, ficando na faixa de volume de tráfego médio e baixo.

A amostra que tem melhor valor de FAA método A, B e C são as amostras de Itaara (areia britada e pó de pedra) e Passo Fundo proveniente da rocha riodacito e textura superficial rugosa, e a amostra de rocha granita de textura superficial polida de Capão de Leão.

Tabela 4.7 – Resultados ensaios de FAA.

Amostra		Litologia	FAA Metodo A (%)	FAA Metodo B (%)				FAA Metodo C (%)
				P #8 - R #16	P #16 - R #30	P #30 - R #50	Média	
A01	Cruz Alta	Basalto	46,54	47,55	50,89	52,08	50,17	38,25
A07	Santa Rosa	Basalto	46,04	47,61	51,14	51,59	50,11	
A11	Dilermando de Aguiar	Basalto	44,37	46,60	49,73	51,42	49,25	
A13	Erechim	Basalto	50,64	52,69	54,92	56,39	54,67	
A16	Santa Cruz do Sul	Basalto	46,99	50,76	52,79	52,88	52,14	
A22	São Luiz Gonzaga	Basalto	46,32	46,85	50,10	52,48	49,81	
<b>Média</b>			<b>46,82</b>				<b>51,03</b>	
<b>Desvio padrão:</b>			<b>2,08</b>				<b>2,04</b>	
<b>Coefficiente de variação:</b>			<b>0,04</b>				<b>0,04</b>	
A02	Santana do Livramento	Diabásio	47,61	49,29	52,33	53,75	51,79	
A03	Santa Maria - CT	Diabásio	45,99	46,64	49,72	51,84	49,40	38,13
A04	Sarandi	Diabásio	46,84	49,12	52,40	52,15	51,22	
A17	Uruguiana	Diabásio	48,56	49,81	53,06	54,72	52,53	
A19	Santo Antônio da Patrulha	Diabásio	42,67	44,89	47,85	49,19	47,31	
<b>Média</b>			<b>46,33</b>				<b>50,45</b>	
<b>Desvio padrão:</b>			<b>2,26</b>				<b>2,10</b>	
<b>Coefficiente de variação:</b>			<b>0,05</b>				<b>0,04</b>	
A06	Itaara - DP	Riodacito	46,69	47,53	50,94	52,54	50,34	
A08	Itaara - BP	Riodacito	46,85	48,34	51,69	53,51	51,18	
A12	Passo Fundo	Riodacito	52,17	55,83	57,01	57,74	56,86	44,12
A18	Itaara - CP	Riodacito	52,40	52,65	56,20	57,99	55,61	
A21	Itaara - Areia	Riodacito	53,17	53,98	56,79	58,35	56,37	
<b>Média</b>			<b>50,26</b>				<b>54,07</b>	
<b>Desvio padrão:</b>			<b>3,20</b>				<b>3,07</b>	
<b>Coefficiente de variação:</b>			<b>0,06</b>				<b>0,06</b>	
A05	Eldorado do Sul	Granito	47,50	49,63	52,27	54,44	52,11	
A20	Capão do Leão	Granito	52,42	51,78	53,56	55,66	56,59	41,62
<b>Média</b>			<b>49,96</b>				<b>54,35</b>	
<b>Desvio padrão:</b>			<b>3,48</b>				<b>3,17</b>	
<b>Coefficiente de variação:</b>			<b>0,07</b>				<b>0,06</b>	
A09	Caçapava do Sul	Mármore	47,42	51,07	52,82	53,76	52,55	
A10	Bagé	Mármore	47,92	51,18	52,53	54,09	52,60	41,40
<b>Média</b>			<b>47,67</b>				<b>52,58</b>	
<b>Desvio padrão:</b>			<b>0,35</b>				<b>0,04</b>	
<b>Coefficiente de variação:</b>			<b>0,01</b>				<b>0,00</b>	
A14	Passo do Verde cava	Areia	43,17	45,01	48,58	47,25	46,95	
A15	Passo de Verde leito	Areia	40,42	43,34	46,39	45,02	44,92	39,47
<b>Média</b>			<b>41,80</b>				<b>45,94</b>	
<b>Desvio padrão:</b>			<b>1,94</b>				<b>1,44</b>	
<b>Coefficiente de variação:</b>			<b>0,05</b>				<b>0,03</b>	

Figura 4.11 – Resultados FAA método A.

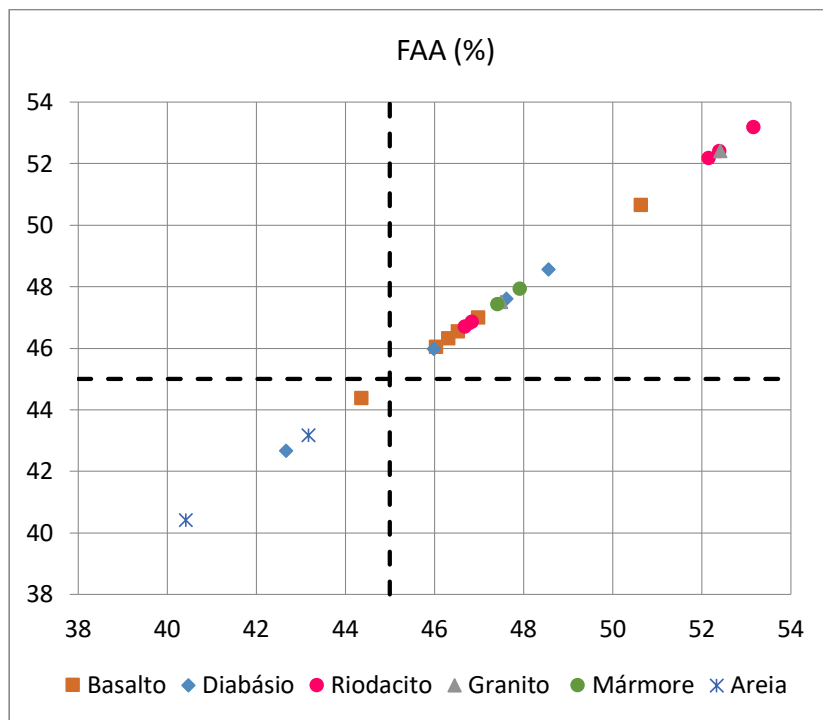
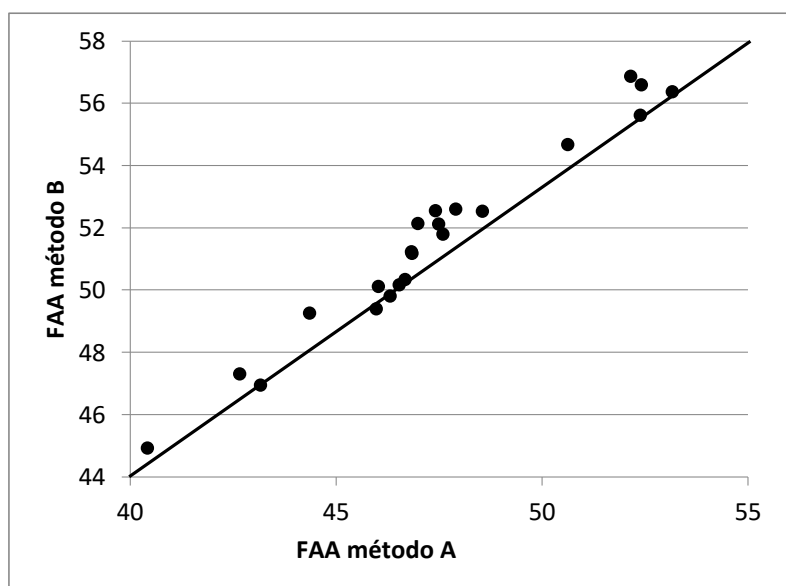


Figura 4.12 – FAA método A x FAA método B.



A variação de resultados entre os métodos se dá através de granulometria imposta para cada um dos métodos, devido que o método A e B temos um controle rigoroso da granulometria, sendo separados peneira por peneira e já no método C não temos essa separação, apresentando agregados superiores aos utilizados nos outros dois métodos.



Analisando de forma individual os resultados obtidos de FAA a penas algumas amostras como as areias, o basalto A11 e o diabásio A19, não seria ideal para utilizar em misturas asfálticas de tráfego alto, mas levando em consideração estes resultados juntos com os resultados obtidos através a análise visual da esfericidade, angularidade/arredondamento e textura superficial podemos observar que muitos destes agregados possui grande números de partículas alongadas e arredondas em sua composição que não seria a forma indicada da misturas asfálticas de tráfego alto.

Estas partículas alongadas e arredondadas interferem diretamente na resistência do revestimento asfáltico, levando em consideração que as partículas alongada tendem a resistir menos e alterando sua forma no decorrer de aplicações de cargas na qual será solicitado os revestimentos durante sua vida útil.

Na Figura 4.13 podemos observar a relação entre os resultados de FAA com a angularidade através do ensaio de AIMS, analisando separado por litologia a correlação, se analisarmos o conjunto de agregados finos ensaios todas as litologias não observamos correlação entre eles. Nem todas as rochas de origem vulcânica se correlacionam a Figura 4.13 item (d) podemos observar a não correlação existente entre elas, o riódacito não se correlaciona com o basalto e o diabásio. A angularidade se destaca em subarredondado (2100 - 4000) para todos os agregados analisados na correlação entre FAA e angularidade.

Os resultados de FAA correlacionados a textura superficial através do ensaio de AIMS observamos correlação apenas quando analisamos os resultados separado por litologia como pode ser observado na Figura 4.14 item (c) os demais análises de correlação analisados não temos correlação principalmente quando analisados todos no conjunto. Podemos identificar a variação da textura superficial de cada agregado analisado que varia de alta rugosidade (> 460), rugosidade moderada (350 - 460), polidas (135 - 275) e lisa (< 135) variando de acordo com a sua formação geológica.

A Figura 4.15 podemos observar que a litologia diabásio e basalto temos correlação entre o ensaio de FAA e a forma 2D ensaio de AIMS, se juntamos os agregados de litologia riódacito junto aos diabásio e basalto mesmo sendo de origem vulcânica não se tem correlação. A forma 2D varia de semicircular (6,05 - 8,0) a semialongado (8,0 - 10,5), a correlação não existente entre os agregados se deve a esta variação que os agregados de origem de litologia riódacito apresentam particular semicircular e semialongado onde os agregados de litologia diabásio e basalto particular semicircular.

A Figura 4.16 que demonstra a análise entre os resultados de FAA em relação a esfericidade através do ensaio de AIMS, a Figura 4.17 demonstra os resultados de FAA em relação ao ângulo de atrito e a Figura 4.18 ângulo de atrito em relação a textura superficial do agregado fino não temos correlação entre as litologias ensaiadas e analisadas. Mesmo analisando a litologia de forma individual não apresenta correlação entre um e outro como as análises anteriores.

Figura 4.13 – FAA x Angularidade AIMS (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.

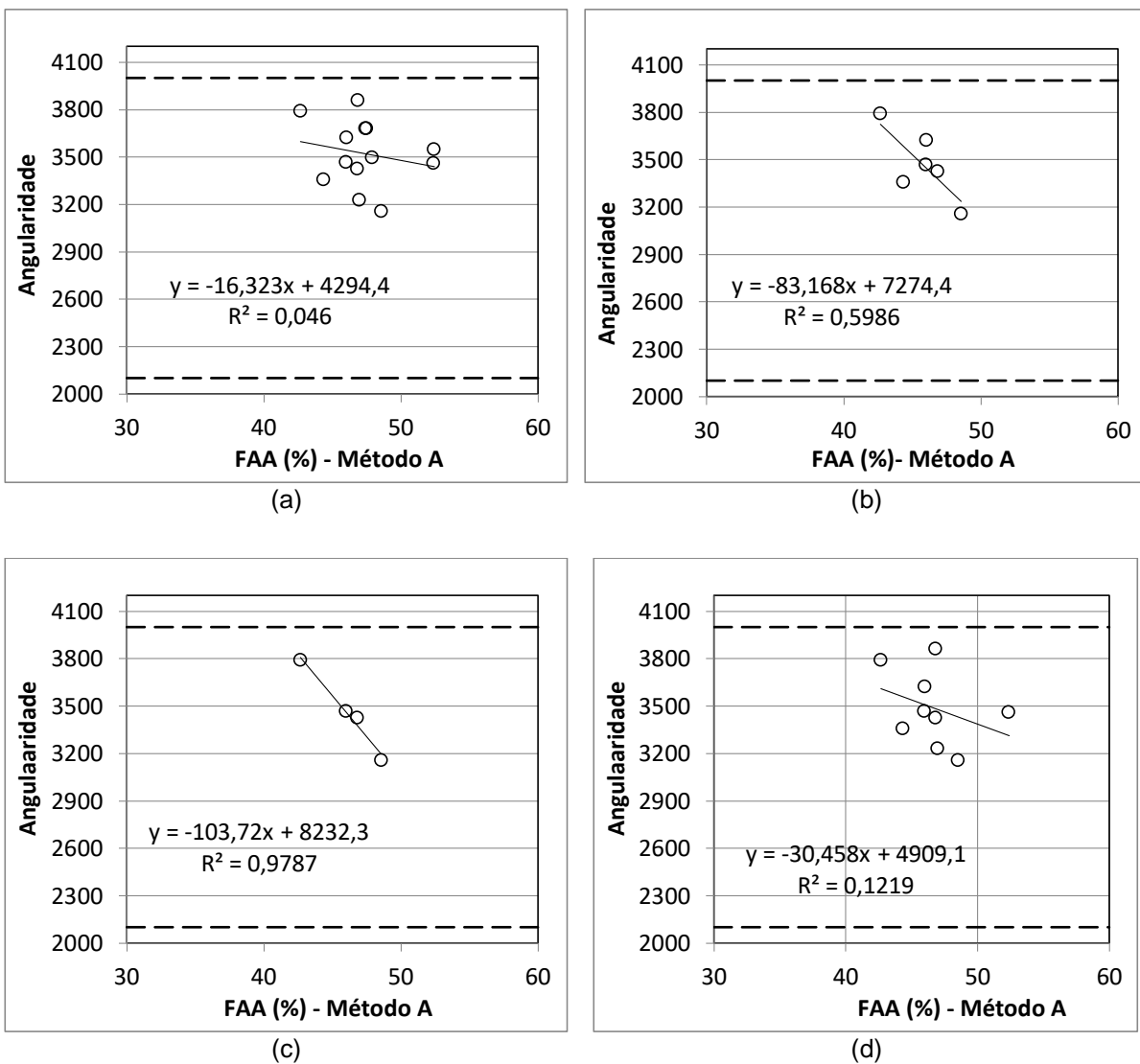
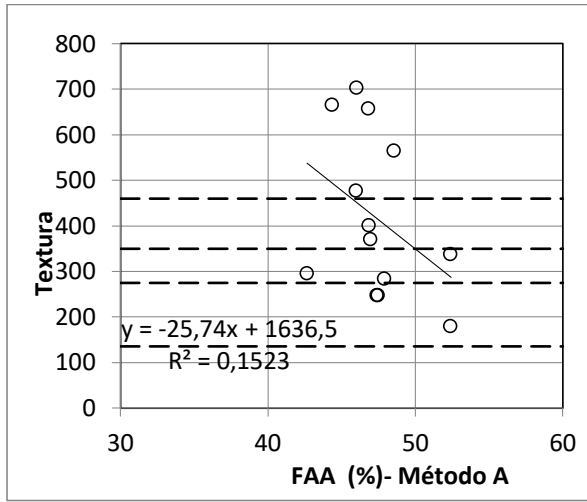
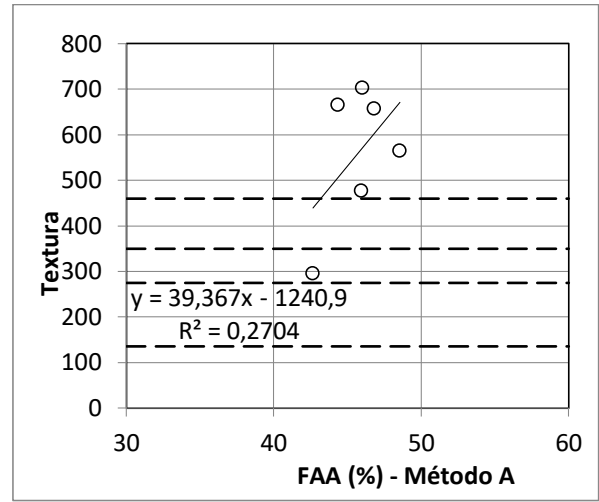


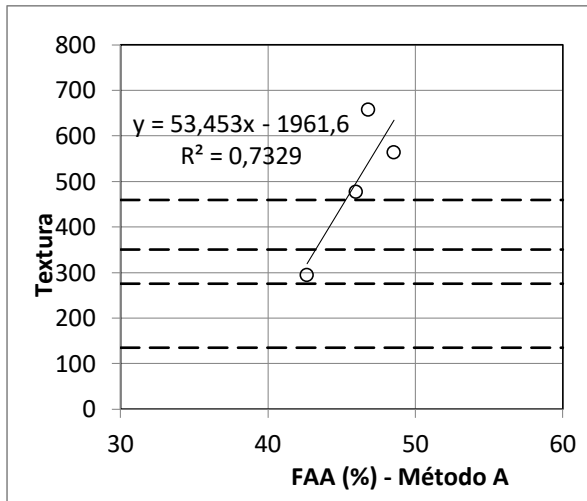
Figura 4.14 – FAA x Textura AIMS (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riocacito.



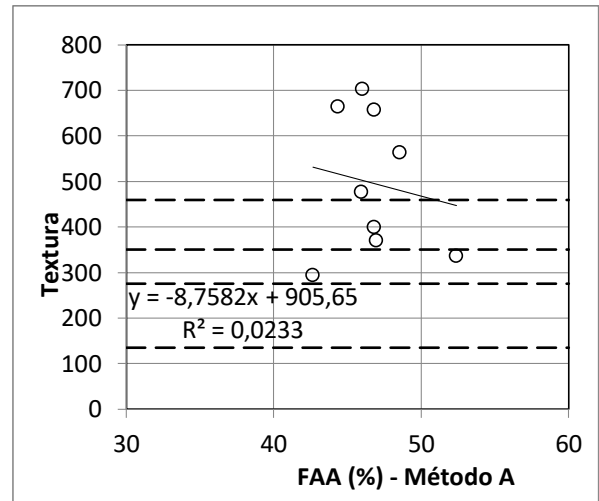
(a)



(b)

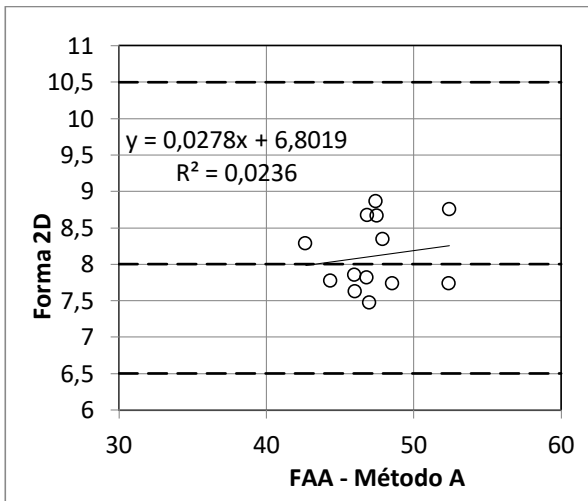


(c)

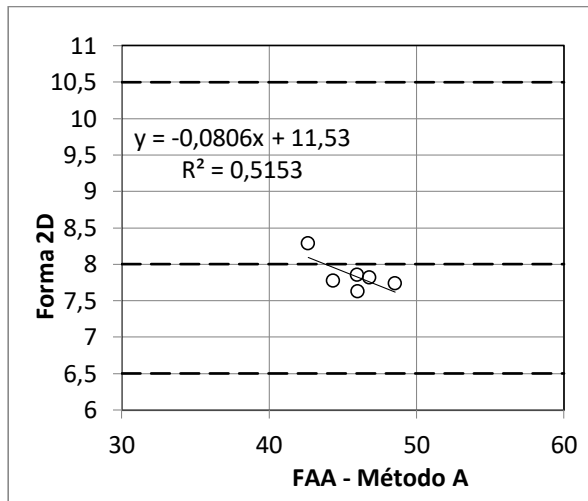


(d)

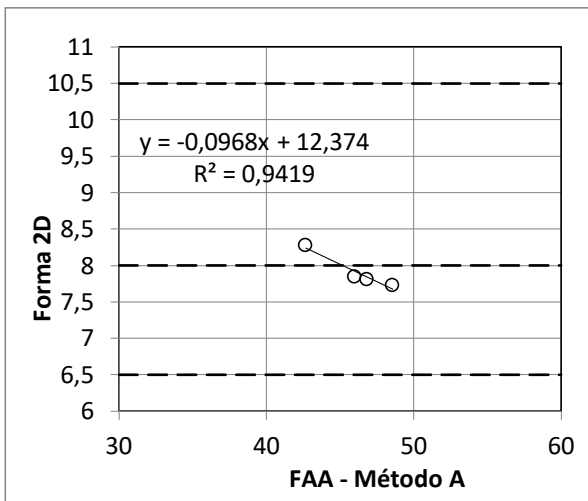
Figura 4.15 – FAA x Forma 2D AIMS (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riódacito.



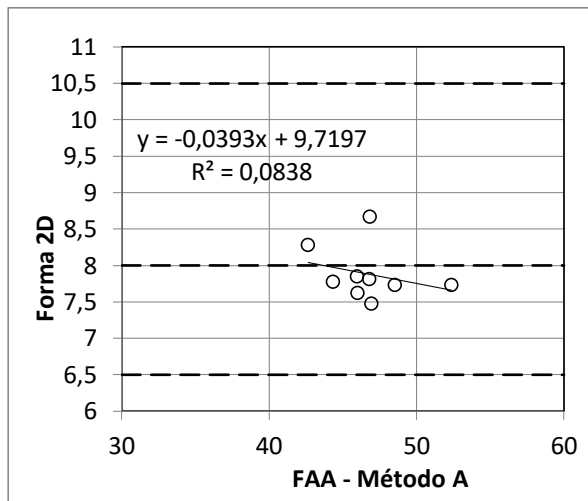
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.16 – FAA x Esfericidade AIMS (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.

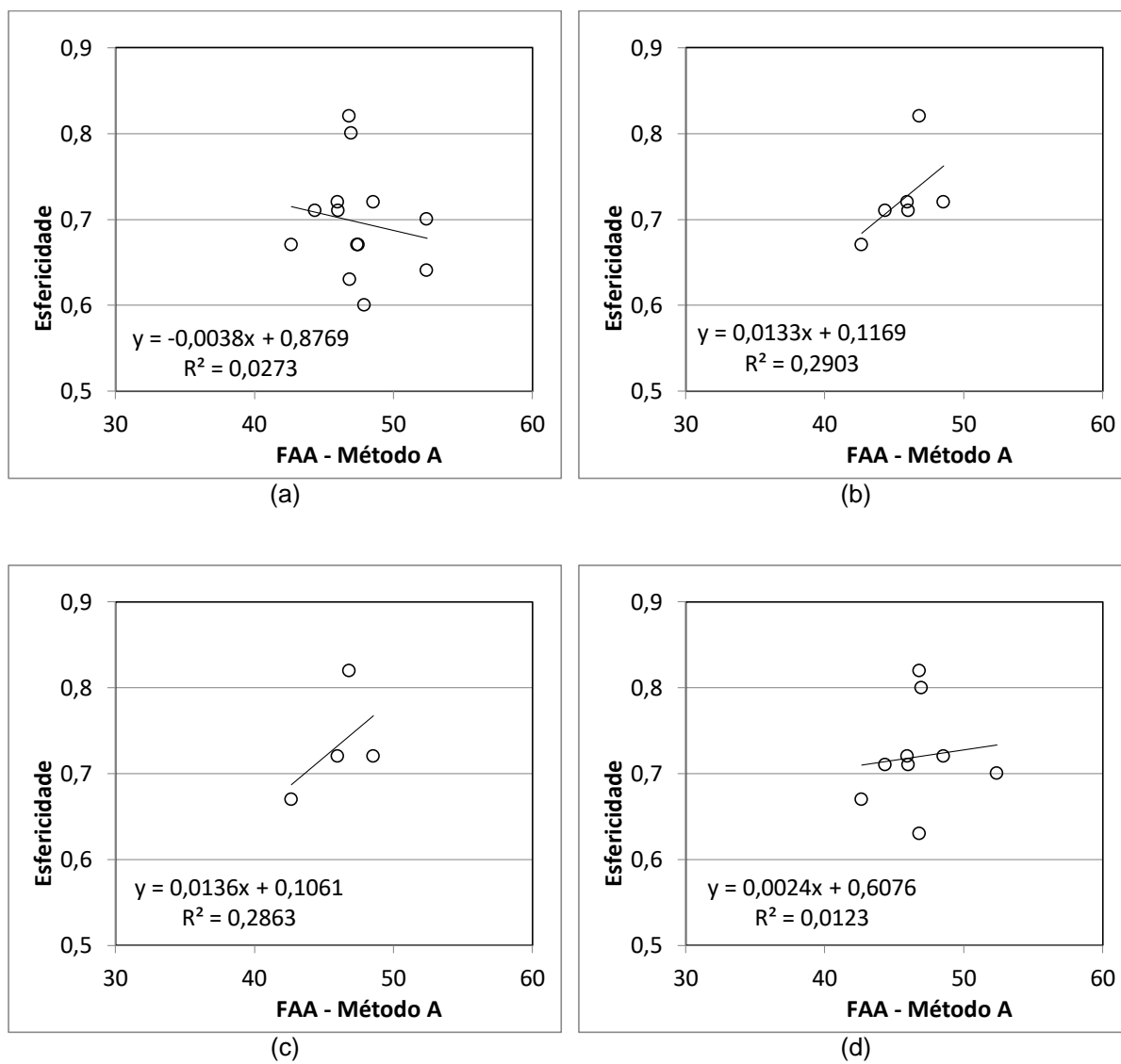
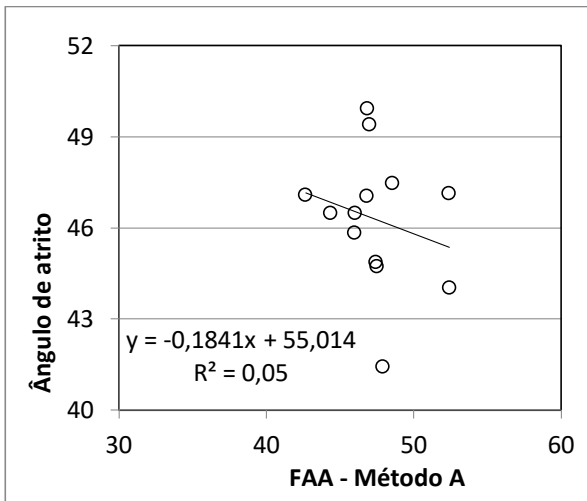
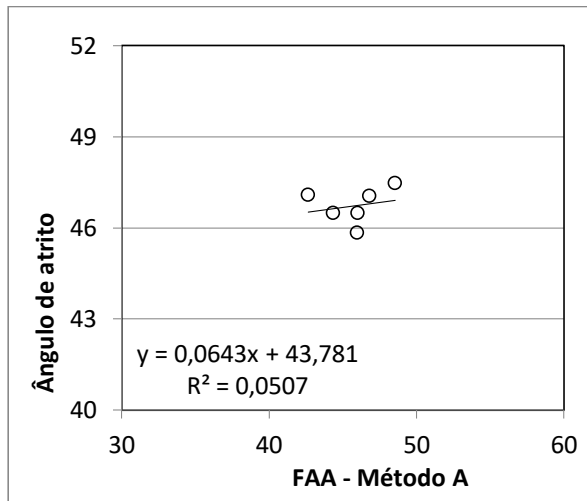


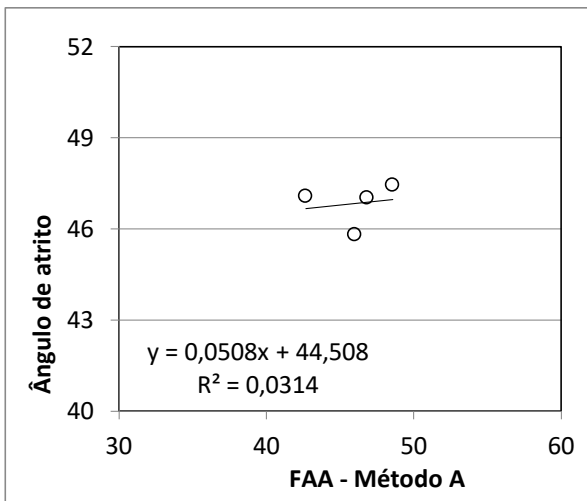
Figura 4.17 – FAA x Ângulo de atrito (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.



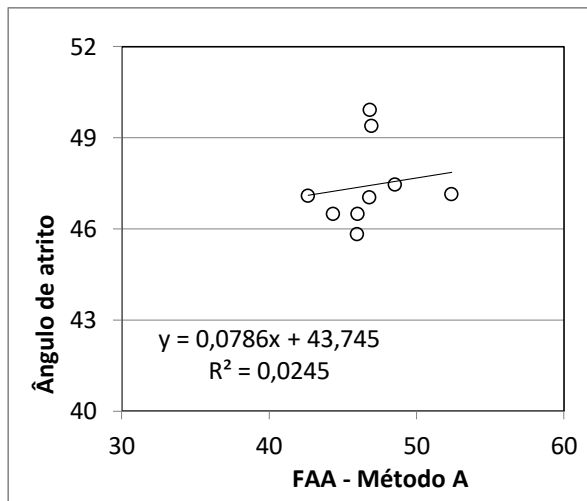
(a)



(b)

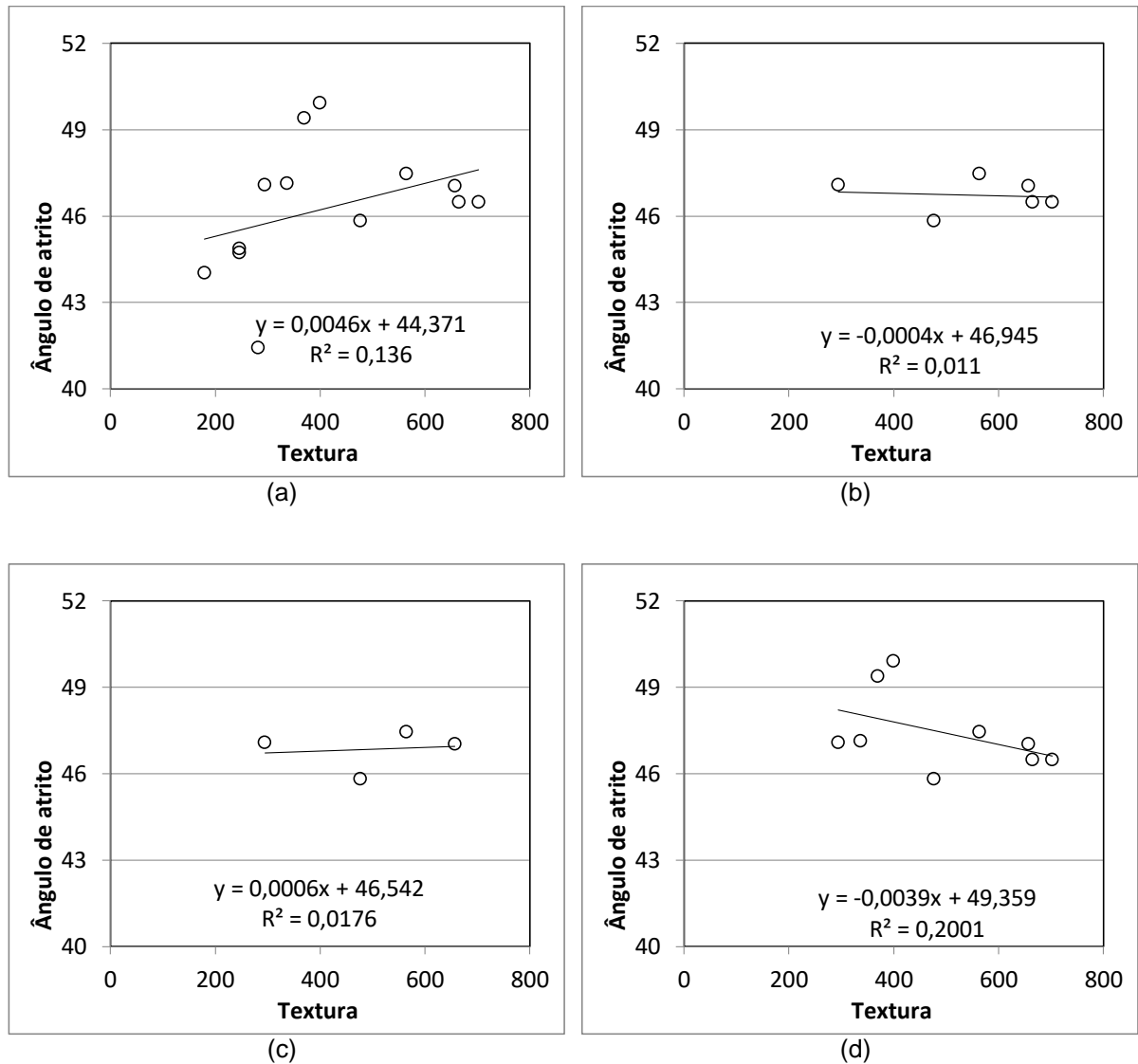


(c)



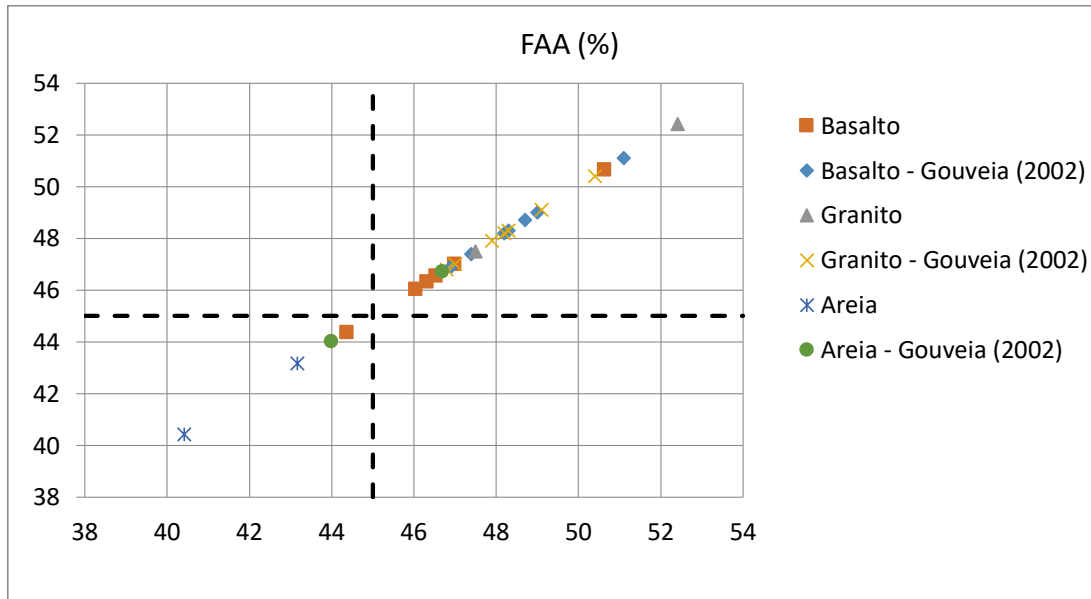
(d)

Figura 4.18 – Ângulo de atrito x textura (a) Todos as litologias; (b) basalto e diabásio; (c) diabásio (d) basalto, diabásio e riodacito.



Na Figura 4.19 comparamos os resultados obtidos das seguintes litologias: basalto, granito e areia com os valores obtidos para as mesmas litologias de Gouveia (2002), podemos observar que os resultados encontrados por Gouveia (2002) alguns são superiores, como as areias e algumas amostras de basalto. Uma amostra de areia analisada por Gouveia está dentro da faixa de agregados utilizados para misturas asfálticas de alto volume tráfego.

Figura 4.19 – Resultados de FAA autor e Gouveia (2002).



Fonte: Gouveia (2002).

#### 4.1.7 Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto de pó-de-pedra e areia foram realizados em laboratório, tanto a moldagem dos corpos de prova quanto a preparação das amostras para os ensaios seguiram os procedimentos descrito na metodologia apresentada no item 3.2.5. Os ensaios foram realizados nas tensões normais de 192, 383, e 500 kPa, visando as tensões confinante que o pavimento é submetido quando solicitado.

A Tabela 4.9 descreve todos os resultados de resistência ao cisalhamento e a Figura 4.20 item (a), mostra o comportamento referente ao gráfico da tensão cisalhante (KPa) versus o deslocamento (mm). Sendo possível verificar que a tensão cisalhante cresce com o aumento da tensão normal aplicada, estabilizando-se ao longo do deslocamento da amostra e apresentando uma tensão de pico. Todos os agregados finos ensaio seguem o mesmo comportamento no decorrer do ensaio, sempre chegando a uma tensão de pico para após estabilizar.

Todas as amostras ensaiadas seguindo as especificações de FAA método B não resistem as tensões solicitadas consideramos isto devido que se utilizada apenas agregados de mesma granulometria aumentando o volume de vazios entre os agregados.



Podemos observar que os resultados obtidos através das especificações de FAA método A e C temos valores variados de resistência as tensões solicitadas, as areias devido as serem material liso e arredondado não apresentaram valores considerados para as tensões solicitadas.

No item (b) estão apresentados os gráficos da variação volumétrica pelo deslocamento. É possível verificar que todas as amostras ensaiadas apresentam redução do volume e logo após uma grande dilatação.

O item (c) apresenta as envoltórias de ruptura das amostras, sendo que foram realizadas envoltórias para todas as tensões normais ensaiadas. Descreve também a coesão e o ângulo de atrito de cada uma das amostras ensaio. E a tabela 4.10 descreve de forma resumida os resultados obtidos de coesão, ângulo de atrito e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Na Tabela 4.9 podemos identificar os resultados de ângulo de atrito e coesão zero e variado para cada um dos agregados estudados, seguindo as especificação de FAA método A para todos os agregados e método B e C para algumas agregados conforme a litologia. Pode-se observar que o ângulo de atrito interno da amostra A14 - areia natural cava é menor de todas as demais amostras e o maior ângulo de atrito é da amostra A6 - Itaara DP. Quanto maior os valores do ângulo de atrito pode ser atribuir a maior angularidade e à textura superficial mais rugosa. Os resultados evidenciam a importância relativa da textura superficial e eventualmente, da resistência mecânica das partículas para a resistência ao cisalhamento.

Analisando de forma conjunta podemos observar a correlação existente entre a tensão cisalhante em relação a tensão vertical a qual os agregados finos foram solicitados durante os ensaios. A Figura 4.21 podemos observar de forma individual a correlação existente através dos três métodos distintos a que foram submetidos.

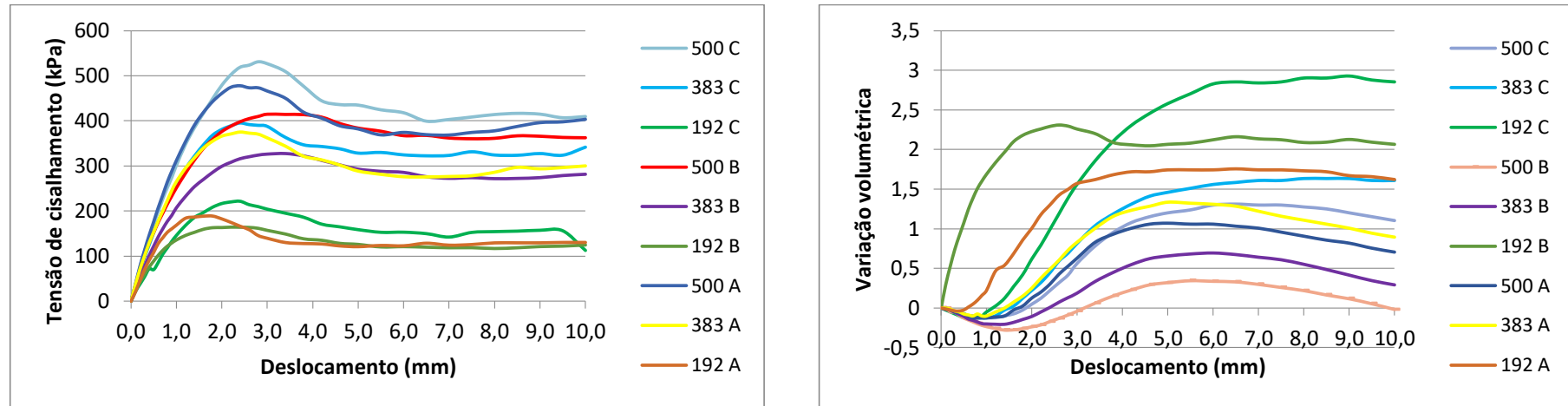
Tabela 4.8 – Resultados ensaios de Cisalhamento Direto.

	Amostra	Litologia	Cisalh. 192 KPa Met. A	Cisalh. 383 KPa Met. A	Cisalh. 500 KPa Met. A	Cisalh. 192 KPa Met. B	Cisalh. 383 KPa Met. B	Cisalh. 500 KPa Met. B	Cisalh. 192 KPa Met. C	Cisalh. 383 KPa Met. C	Cisalh. 500 KPa Met. C
A01	Cruz Alta	Basalto	209,76	417,96	520,64	185,93	356,44	469,71	260,07	454,83	653,12
A07	Santa Rosa	Basalto	209,57	392,66	531,12						
A11	Dilermando de Aguiar	Basalto	197,41	400,80	530,25						
A13	Erechim	Basalto	157,00	350,20	434,83						
A16	Santa Cruz do Sul	Basalto	195,54	398,93	489,74						
A22	São Luiz Gonzaga	Basalto	222,12	377,16	539,07						
A02	Santana do Livramento	Diabásio	206,72	382,17	507,10						
A03	Santa Maria - CT	Diabásio	221,83	427,37	479,84						
A04	Sarandi	Diabásio	206,72	400,80	544,37						
A17	Uruguaiana	Diabásio	246,34	400,90	542,99						
A19	Santo Antônio da Patrulha	Diabásio	185,25	412,17	545,64						
A06	Itaara - DP	Riodacito	215,75	445,81	587,12						
A08	Itaara - BP	Riodacito	234,08	443,85	600,07						
A12	Passo Fundo	Riodacito	211,73	372,46	517,79	176,45	334,57	453,36	222,91	439,44	515,44
A18	Itaara - CP	Riodacito	183,09	412,66	547,60						
A21	Itaara - Areia	Riodacito	212,80	298,42	542,99						
A05	Eldorado do Sul	Granito	205,45	390,70	480,43						
A20	Capão do Leão	Granito	188,78	375,10	477,78	164,23	327,44	414,66	221,63	395,21	530,93
A09	Caçapava do Sul	Mármore	197,60	370,59	502,89						
A10	Bagé	Mármore	178,09	342,25	434,43	154,42	316,46	403,90	200,64	419,33	550,25
A14	Passo do Verde cava	Areia	151,91	331,37	394,91						
A15	Passo de Verde leito	Areia	165,83	384,22	457,77	155,57	310,12	389,81	143,96	285,18	379,52

Tabela 4.9 – Resultados ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão (c).

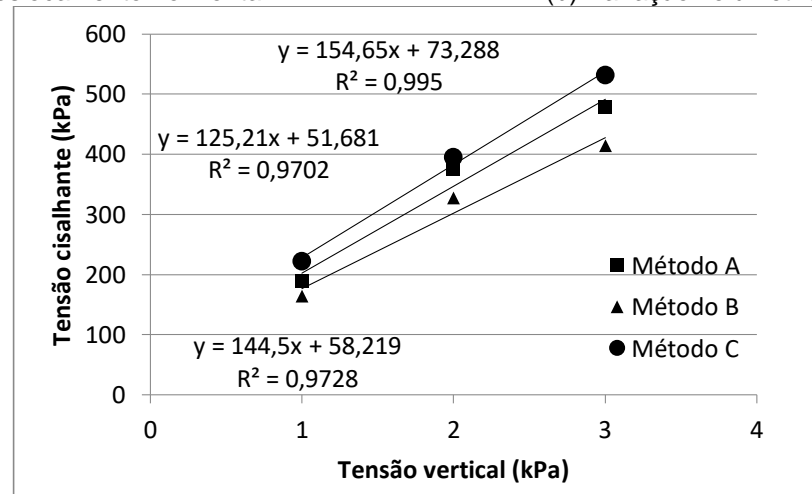
Amostra		Litologia	MÉTODO A				MÉTODO B				MÉTODO C			
			c (KPa)	$\phi$	c = 0	$\phi$	c (KPa)	$\phi$	c = 0	$\phi$	c (KPa)	$\phi$	c = 0	$\phi$
A01	Cruz Alta	Basalto	18,30	45,49	0	46,74	8,21	42,27	0	43,20	7,68	51,36	0	51,79
A07	Santa Rosa	Basalto	6,24	46,05	0	46,48			0				0	
A11	Dilermando de Aguiar	Basalto	0	46,48	0	46,48			0				0	
A13	Erechim	Basalto	0	41,36	0	41,36			0				0	
A16	Santa Cruz do Sul	Basalto	15,30	44,01	0	45,11			0				0	
A22	São Luiz Gonzaga	Basalto	18,29	45,23	0	46,48			0				0	
A02	Santana do Livramento	Diabásio	17,85	44,12	0	45,40			0				0	
A03	Santa Maria - CT	Diabásio	67,84	40,73	0	45,82			0				0	
A04	Sarandi	Diabásio	0	47,03	0	47,03			0				0	
A17	Uruguaiana	Diabásio	56,99	43,47	0	47,45			0				0	
A19	Santo Antônio da Patrulha	Diabásio	0,00	47,08	0	47,08			0				0	
A06	Itaara - DP	Riodacito	0	49,39	0	49,39			0				0	
A08	Itaara - BP	Riodacito	3,35	49,71	0	49,91			0				0	
A12	Passo Fundo	Riodacito	16,56	44,39	0	45,46	1,79	41,74	0	41,88	45,83	44,06	0	47,24
A18	Itaara - CP	Riodacito	0	47,13	0	47,13			0				0	
A21	Itaara - Areia	Riodacito	0	44,54	0	44,54			0				0	
A05	Eldorado do Sul	Granito	36,25	42,00	0	44,72			0				0	
A20	Capão do Leão	Granito	9,69	43,29	0	44,01	9,31	39,25	0	40,04	26,08	44,85	0	46,66
A09	Caçapava do Sul	Mármore	4,84	44,50	0	44,85			0				0	
A10	Bagé	Mármore	19,07	39,86	0	41,42	0,00	39,14	0	39,14	0,00	47,57	0	47,57
A14	Passo do Verde	Areia	4,75	38,79	0	39,19			0				0	
A15	Passo de Verde	Areia	0	43,25	0	43,25	10,94	37,43	0	38,39	0,00	36,99	0	36,99

Figura 4.20 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A20.



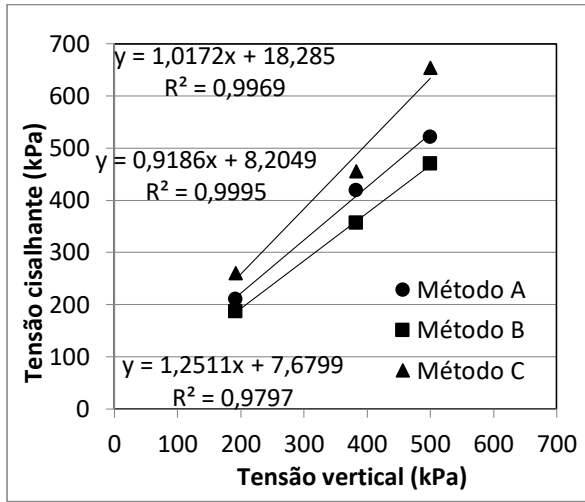
(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

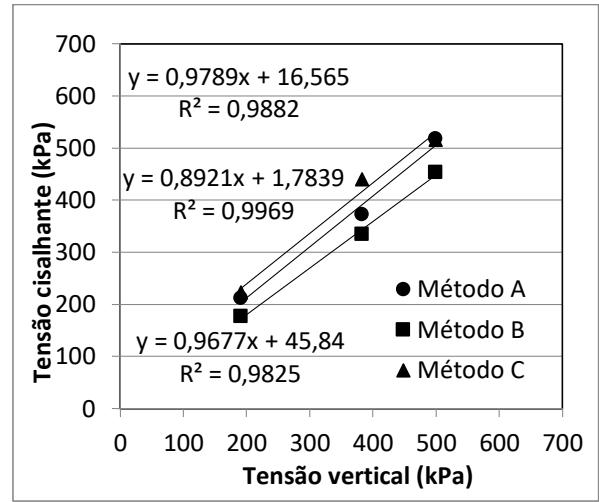


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

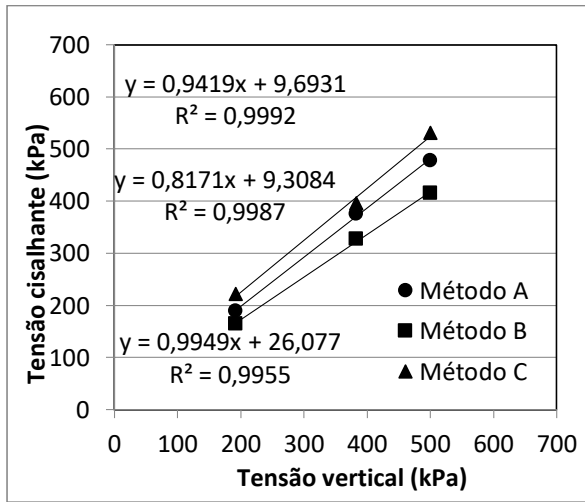
Figura 4.21 – Tensão vertical x tensão cisalhante, (a) basalto ;( b) riodacito; (c) granito; (d) mármore e (e) areia.



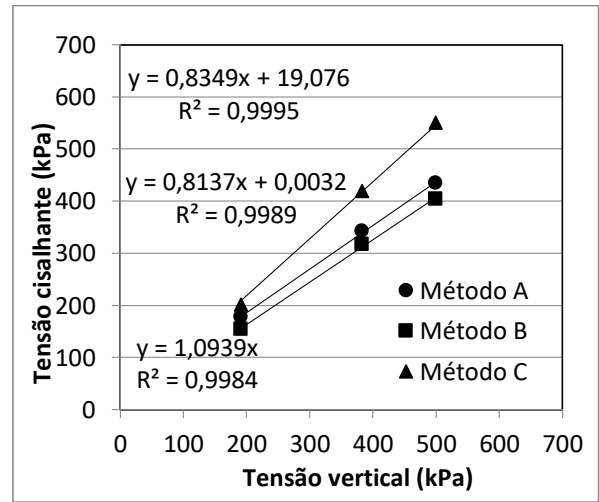
(a)



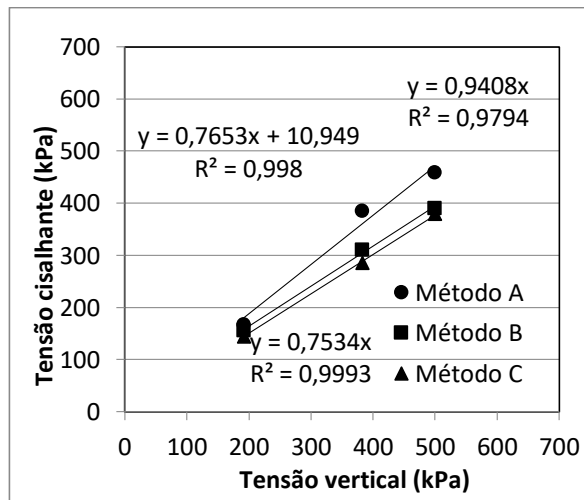
(b)



(c)



(d)



(e)



## 5 CONCLUSÃO

As considerações desta pesquisa são fundamentais devido que agregados finos com altos valores de FAA tendem a apresentar suas partículas angulosas com textura superficial rugosa, tendo como consequência um maior intertravamento entre suas partículas, resistindo melhor as tensões cisalhantes referente as lisa e polidas. Com base nos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais pode-se concluir:

- a) Através do ensaio de avaliação microscópio determinou-se a classificação dos agregados sendo: basalto, granito, mármore, riolacito, diabásio e areia, sendo de suma importância esta classificação para as demais análises.
- b) A caracterização física dos agregados determinada através dos ensaios de absorção, M.E.A e M.E.R seus resultados são influenciados diretamente pela classificação e composição rochosa, as areias apresentam uma densidade coerente sempre entre elas, mesmo com amostras de outros locais, isso se dá devido a formação rochosa, é composta por quartzo.
- c) A implantação do ensaio de FAA na Universidade Federal de Santa Maria vai acrescentar junto com os ensaios de caracterização dos agregados finos uma análise mais específica para o comportamento das misturas asfálticas. Com a determinação do volume de vazios não compactados de acordo com o volume de tráfego determinado.
- d) A maior parte dos agregados utilizado na pesquisa é de rochas ígneas apresentando assim textura superficial rugosa e angularidade variada, contem partículas puxando para o arredondamento. O granito apresenta textura polido, onde os agregado polidos não apresenta boa estabilidade em misturas asfálticas. Já as areia e os mármore são de textura lisa com partícula alongada e arredondas não sendo indicado para uso em misturas asfálticas de alto volume de tráfego.
- e) Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto indicam que um agregado fino com maior FAA não apresenta, necessariamente, uma maior resistência ao cisalhamento, observou-se que apenas o ensaio de FAA não será possível identificar o melhor agregado fino a ser utilizado em misturas asfálticas para alto volume de tráfego, será necessário a análise visual em conjunto com o cisalhamento direto para sua identificação, sendo levando

em consideração que até agregados de textura superficial polida satisfazem as especificações recomendadas;

- f) A areia natural devido a sua textura superficial ser lisa apresenta menores valores de resistência ao cisalhamento máxima, para todas as tensões normais ensaiadas indiferente do método a ser adotado, não a intertamento suficiente entre as partículas;
- g) As amostra de rochas granitas apresentam valores inferior a resistência de cisalhamento máxima devido a textura superficial ser polida, mas mesmo assim seu comportamento perante a resistência ao cisalhamento é inconstante, resistindo a tensão de 192 KPa e 383 KPa para uma das amostras, não resistindo para ambas na tensão de 500 KPa.

## **6 SUGESTÃO DE PESQUISAS**

Buscando complementar e prosseguir a pesquisa segure-se a seguinte continuidade:

- a) Estudo do comportamento deste agregados referente a especificação Superpave;
- b) Estudo sobre os efeitos da forma, angularidade e textura superficial dos agregados na vida de fadiga das misturas asfálticas;
- c) Estudo da influência das propriedades dos agregados sobre os vazios do agregado mineral (VAM) e a influência na durabilidade das misturas asfálticas;



## REFERÊNCIAS

- AL ROUSAN, T. M. – Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system. Dissertacion. Texas A&M University, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1252: Standard Test Method for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 128: Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 125: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - especificação, Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: Agregados - determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: Agregados – Terminologia, Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12052: Solo ou agregado miúdo - determinação de equivalente de areia, Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.
- BALBO, J. T., Restauração de pavimentos urbanos – Dificuldades e diretrizes para soluções. In: Reunião Anual De Pavimentação, 8, 1997, São Carlos. Rio de Janeiro: ABPV, 1997.
- Benson, F.J. Effects of Aggregate Size, Shape, and Surface Texture on the Properties of Bituminous Mixtures - A literature Survey. *Highway Research Board*, SR 109, 1970.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 2006.
- BREAKAH, T. M.; BAUSANO, J. P.; WILLIAMS, R. C. & Stan Vitton. The impact of fine aggregate characteristics on asphalt concrete pavement design life. *International Journal of Pavement Engineering* Vol. 12, No. 2, April 2011, 101–109
- BROWN, E. R.; CROSS, S. A.; A study of in-place rutting of asphalt pavements. NCAT Report 89-02. Auburn, Abril 1989

BUTTON, J. W.; PERDOMO, D. e LYTTON, R. L. Influence of Aggregate on Rutting of Asphalt Concrete Pavements. *Transportation Research Record*, 1990. n. 1259, p. 141-152.

CNT: CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias 2015: relatório geral. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregado - Análise granulométrica. DNER-ME 83. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregado - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. DNER-ME 89. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregado - determinação abrasão " Los Angeles". DNER-ME 35. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregado - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. DNER-EM 194. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregado em estado solto - determinação da massa unitária. DNER-ME 152. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregado graúdo para concreto cimento. DNER-EM 37. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregado miúdo para concreto de cimento. DNER-EM 38. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. DNIT-ES 31. Rio de Janeiro, 2006.

DUMKE, MARILAN PEDRO. Concreto Asfáltico Drenante com Fibras de Celulose, Ligante Modificado por Polímero e Asfalto-Borracha. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2005.

Fernandes, J. L.; R Roque; M. Tia e L. Casanova. Evaluation of uncompacted void content of fine aggregate as a quality indicator of materials used in Superpave mixtures. *79th Annual Meeting in January of the Transportation Research Board*, Washington, D.C, 2000.

GOUVEIA, L. T. Avaliação do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) da especificação Superpave. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 2002.

GOUVEIA, L. T. Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos, 2006.

KANDHAL, P. S.; COOLEY, L. A. Jr. Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer. NCHRP Report 508. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 2003.

Kandhal, P. S.; PARKER JR, F. Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements. *National Cooperative Highway Research Program*, Report 405. 1998.

LEAL, C. L. D. Aproveitamento do bagaço de cana de açúcar em misturas asfálticas. Niterói-RJ, 2013.

LEE, C-J.; White, T. D.; West, T. R. Effect of Fine Aggregate Angularity on Asphalt Mixture Performance. Joint Transportation Research Program, Project No: C-36-21H, File No: 2-8-8, 1999.

LEINZ, V. Geologia Geral. Segunda edição, revista. São Paulo, editora Nacional, 1963.

LIN, C., TONGJING, W. Effect of fine aggregate angularity on skid-resistance of asphalt pavement using accelerated pavement testing. *Construction and Building Materials* 168, 2018. 41–46

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V. Introdução à geologia de engenharia. Ed. UFSM, Santa Maria/RS, 2014.

MALYSZ, R. Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2004.

MARQUES, G. L. O. Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio De Janeiro, RJ. 2004.

MOURA, E. Estudo de deformação permanente em trilha de roda misturas asfálticas em pista e em laboratório. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2010.

MOTTA, L. M. G.; TONIAL, I.; LEITE, L. M.; CONSTANTINO, R. S. Princípio do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas - tradução comentada. COPPE/UFRJ/PETROBRAS/DEPIN/CENPES. Rio de Janeiro-RJ, 1996.

NOGUEIRA, M. G. Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para revestimentos de pavimentos. São Paulo, 2008.

OLIVEIRA, A. M. dos S.; DE BRITO, A. N. S.; Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

PAZOS, A. G.; SACRAMETO, F. T.; MOTTA, L. M. G. Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas. 44ª RAPV – reunião anual de pavimentação e 18º ENACOR – encontro nacional de conservação rodoviária. Foz do Iguaçu-PR, 2015.

PEREIRA, C. A. Análise da aderência pneu-pavimento em rodovias do Estado de Pernambuco e da Paraíba com elevado índice de acidentes. Recife, 2010.

PINTO, S. Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 1991.

SILVA, H. M. R. D. Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-Mastique. Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas. Tese (doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Ninho, Portugal, 2005.

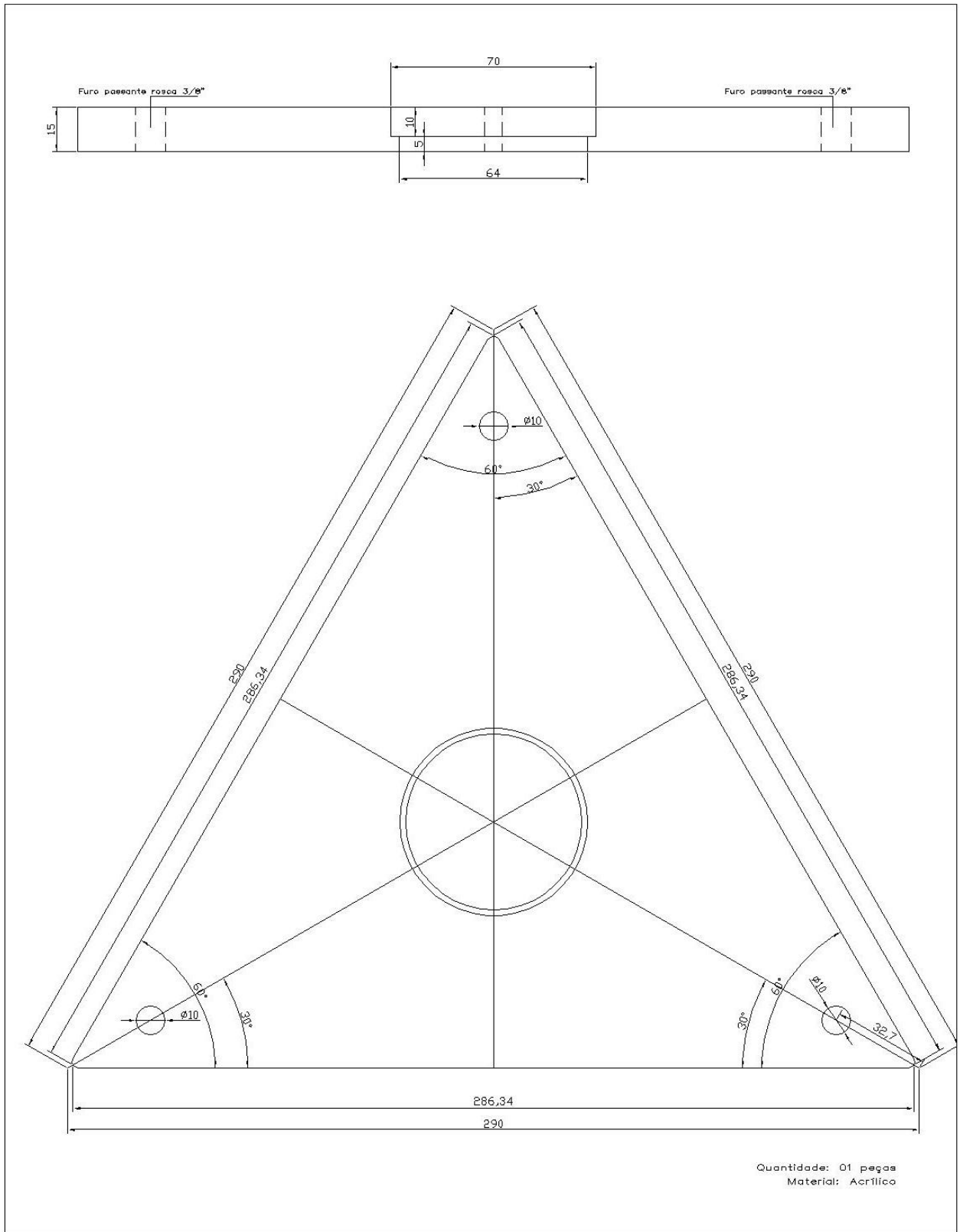
SINTRALOG – Sindicato das Empresas de Transporte de Cargas e Logística de Santa Rosa. 2019. Acessado em: 10/08/2019. Disponível em: <http://www.sintralog.com.br/noticias/conheca-os-13-principais-defeitos-do-pavimento-das-rodovias>.

SOUZA, J. B., HARVEY, J., OAINTER, L., et al. Evaluation of Laboratory Procedures for Compacting Asphalt - Aggregate Mixtures. In: Report n° SHRPAUWP - 91-523, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., EUA. 1991.

SUGUIO, K. *Introdução à Sedimentologia*. Edgard Blucher Ltda. / Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

TOPAL, A., SENGOZ, B. Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials* 19, 2005. Pg.155–163.

## ANEXO A

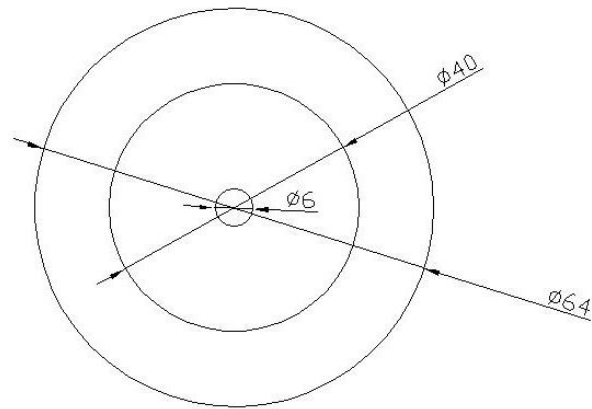
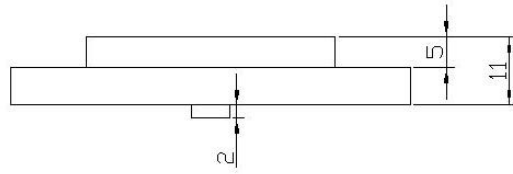


**UFSM - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**

PROJETO: APARELHO PARA ENSAIO DE ANGULARIDADE DO AGREGADO FINO

FOLHA: 02





Quantidade: 01 peças  
Material: Aço

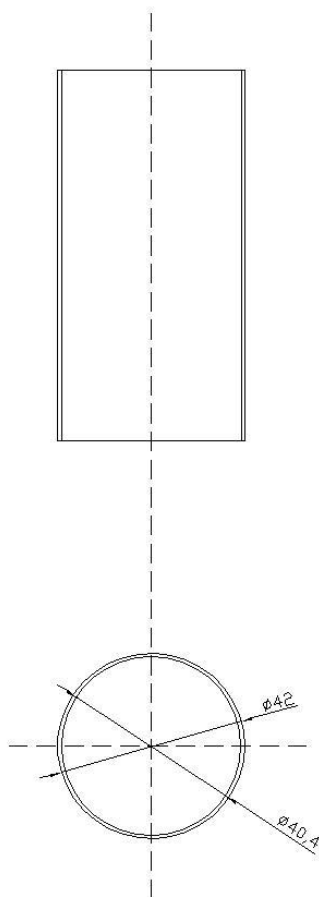
**UFSM - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**

PROJETO: APARELHO PARA ENSAIO DE ANGULARIDADE DO AGREGADO FINO

FOLHA: 04





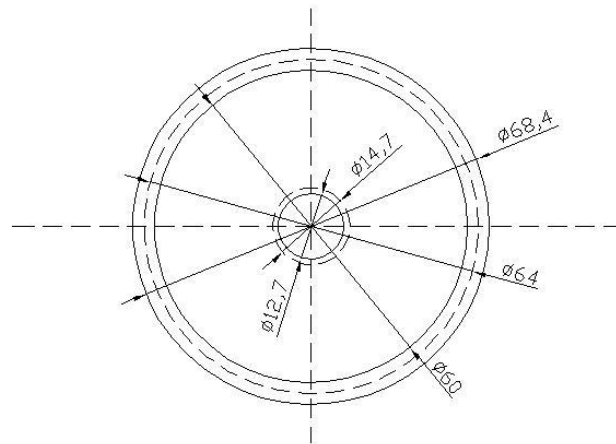
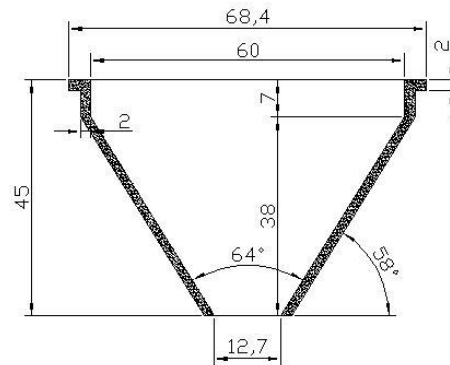


Quantidade: 01 peças  
Material: Aço

**UFSM - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**

PROJETO: APARELHO PARA ENSAIO DE ANGULARIDADE DO AGREGADO FINO

FOLHA: 06

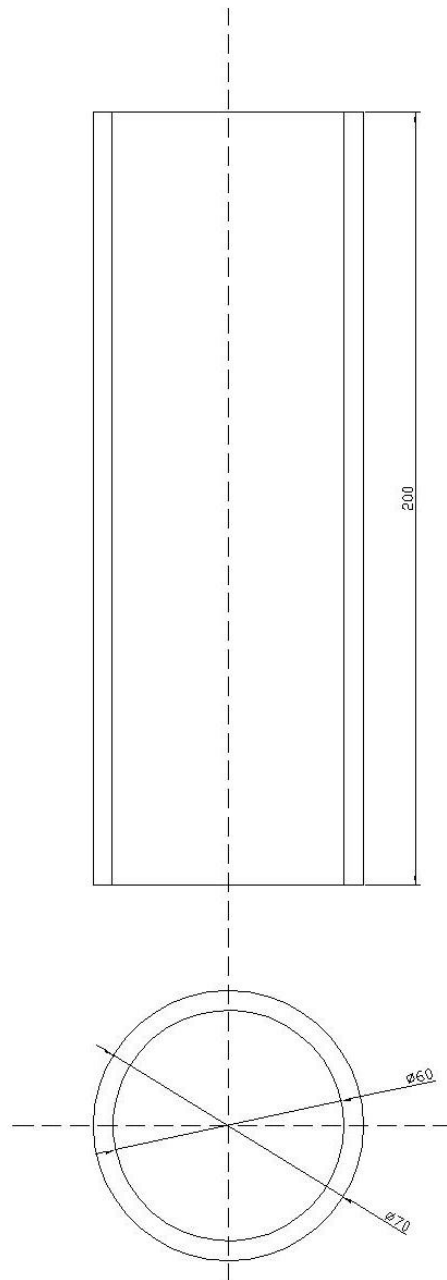


Quantidade: 01 peças  
Material: Alumínio

**UFSM - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**

PROJETO: APARELHO PARA ENSAIO DE ANGULARIDADE DO AGREGADO FINO

FOLHA: 07



Quantidade: 01 peças  
Material: Acrílico

**UFSM - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**

**PROJETO: APARELHO PARA ENSAIO DE ANGULARIDADE DO AGREGADO FINO**

**FOLHA: 08**

**ANEXO B**

ANEXO B1 – Resultado geral dos ensaios de caracterização de PAZOS (2015).

Pedreira	Classif. Rocha	Acidez da Rocha	M.E.A (g/cm <sup>3</sup> )	M.E.R (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	FAA	EA
Rio de Janeiro	Basalto	Básica	2,699	2,73	0,835	49,2	71
Areia			2,595	2,621	0,759	46,5	

ANEXO B2 – Resultado geral dos ensaios de caracterização de MARQUES (2004).

Pedreira	Classif. Rocha	Acidez da Rocha	M.E.A (g/cm <sup>3</sup> )	M.E.R (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	EA
Pó de pedra	Granítica	Ácida	2,677	2,729	0,71	71
Areia			2,573	2,64	1	80

ANEXO B3 – Resultado geral dos ensaios de caracterização de MARQUES (2004).

Pedreira	Classif. Rocha	Acidez da Rocha	M.E.A (g/cm <sup>3</sup> )	M.E.R (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	FAA
01. Pedreira Santa Isabel	Basalto	básica	2,83	2,961	1,56	51,1
02. Pedreira Fazenda Velha	Granito	Ácida	2,89	3,022	1,52	50,4
03. Pedreira Contil	Gnaiss	Metamórfica	2,709	2,744	0,47	49,7
07. Pedreira São Roque	Granito	Ácida	2,732	2,918	2,33	48,3
11. Pedreira 52.314 AM:01	Granito	Ácida	2,654	2,694	0,42	47,9
12. pedreira Basalto - Jguariuna	Gnaiss	Metamórfica	2,891	3,034	1,63	47,8
15. Pedreira Basalto 05	Gnaiss	Metamórfica	2,941	3,044	1,16	47
17. Pedreira Edispel	Basalto	básica	2,818	3,021	2,39	46,9
19. Rio Moji Guaçú	Areia natural britada		2,632	2,644	0,24	46,7
19. Rio Moji Guaçú	Areia natural		2,632	2,649	0,22	44

## APÊNDICE A

### APÊNDICE A1 - Resultado geral dos ensaios (Continua).

Amostra	Local	Litologia	Dmáx (mm)	Modulo Finura	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Def.	Cu	Cc	M.E.R (g/cm³) Chapnann	M.E.R (g/cm³) Picnôm.	M.E.R. ASTM C 128 (g/cm³)	M.E.A. ASTM C 128 (g/cm³)	Absorção (g/cm³)	Massa Unitária	EA
01	Cruz Alta	Basalto	6,30	4,88	0,240	1,10	2,70	0,24	11,25	1,87	2,944	2,903	2,980	2,781	2,336	1,84	68,74
02	Santana do Livramento	Diabásio	4,75	4,37	0,175	0,67	1,90	0,18	10,86	1,35	2,841	2,979	2,814	2,644	2,228	1,61	78,26
03	Santa Maria - CT	Diabásio	4,75	4,51	0,230	0,74	2,10	0,23	9,13	1,13	2,675	2,754	2,693	2,529	2,355	1,89	91,18
04	Sarandi	Diabásio	4,75	4,31	0,190	0,59	1,80	0,19	9,47	1,02	2,949	3,087	3,068	2,880	2,086	2,09	86,36
07	Santa Rosa	Basalto	6,30	4,61	0,170	0,60	2,60	0,17	15,29	0,81	2,963	3,065	3,041	2,877	1,832	2,17	86,32
11	Dilermando de Aguiar	Diabásio	6,30	5,04	0,350	1,40	2,85	0,35	8,14	1,96	2,857	2,970	2,974	2,825	1,738	1,92	87,76
13	Erechim	Basalto	4,75	4,33	0,230	0,70	1,70	0,23	7,39	1,25	2,830	3,004	2,989	2,764	2,646	1,86	51,56
16	Santa Cruz do Sul	Basalto	4,75	4,10	0,165	0,45	1,65	0,17	10,00	0,74	2,857	2,927	2,945	2,799	1,744	1,99	89,05
17	Uruguiana	Diabásio	6,30	5,36	0,480	1,65	3,20	0,48	6,67	1,77	2,840	2,952	2,943	2,736	2,506	1,94	98,89
19	Santo Antônio da Patrulha	Diabásio	6,30	4,73	0,155	0,74	2,50	0,16	16,13	1,41	2,759	2,834	2,814	2,631	2,418	2,05	90,72
22	São Luiz Gonzaga	Basalto	6,30	4,63	0,250	0,80	2,10	0,25	8,40	1,22	2,941	3,005	2,967	2,841	1,474	2,25	90,11
06	Itaara - DP	Riodacito	6,30	4,72	0,255	0,88	2,40	0,26	9,41	1,27	2,589	2,679	2,680	2,489	2,768	1,86	85,55
08	Itaara - BP	Riodacito	4,75	4,33	0,220	0,61	2,25	0,22	10,23	0,75	2,667	2,574	2,667	2,486	2,652	1,81	76,81
12	Passo Fundo	Riodacito	9,50	5,90	0,650	2,30	4,40	0,65	6,77	1,85	2,625	2,687	2,674	2,465	3,060	1,64	88,07
18	Itaara - CP	Riodacito	6,30	5,42	0,660	2,20	3,30	0,66	5,00	2,22	2,564	2,673	2,637	2,465	2,572	1,78	100,00
21	Itaara - Areia	Riodacito	6,30	4,82	0,330	1,00	2,40	0,33	7,27	1,26	2,559	2,710	2,686	2,464	3,244	1,81	92,31
09	Caçapava do Sul	Mármore	4,75	4,12	0,185	0,50	1,95	0,19	10,54	0,69	2,734	2,803	2,772	2,712	0,796	1,72	78,95
10	Bagé	Mármore	4,75	4,12	0,185	0,50	1,55	0,19	8,38	0,87	2,747	2,775	2,782	2,692	1,190	1,92	76,51
05	Eldorado do Sul	Granito	4,75	4,23	0,120	0,53	1,60	0,12	13,33	1,46	2,620	2,648	2,560	2,514	0,714	1,85	91,00
20	Capão do Leão	Granito	4,75	4,29	0,180	0,54	1,75	0,18	9,72	0,93	2,601	2,607	2,588	2,551	0,564	1,86	89,12
14	Passo do Verde	Areia	4,75	3,66	0,250	0,40	0,73	0,25	2,92	0,88	2,610	2,617	2,622	2,589	0,478	1,86	76,15
15	Passo de Verde	Areia	2,40	3,56	0,310	0,40	0,48	0,31	1,55	1,08	2,614	2,620	2,632	2,579	0,768	1,93	96,63

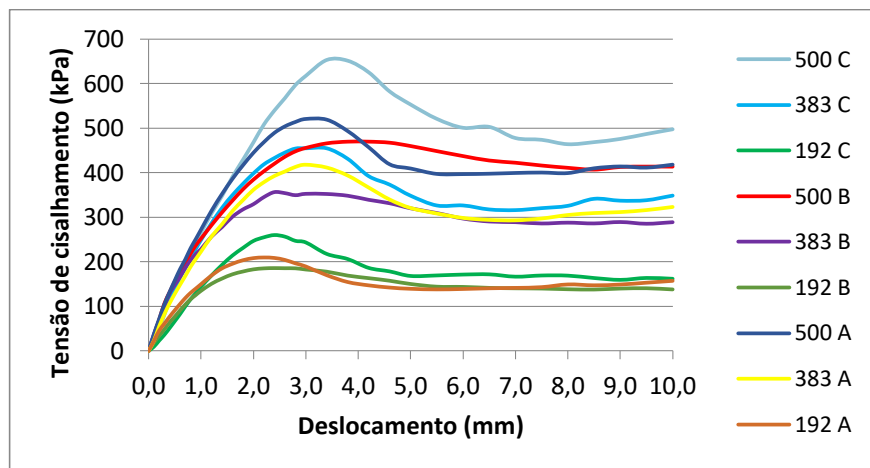
## APÊNDICE A1 - Resultado geral dos ensaios (Continuação).

Amostra	Local	Litologia	FAA Metodo A	FAA Metodo B	FAA Metodo C	Cisalh. 192 KPa Met. A	Cisalh. 383 KPa Met. A	Cisalh. 500 KPa Met. A	Cisalh. 192 KPa Met. B	Cisalh. 383 KPa Met. B	Cisalh. 500 KPa Met. B	Cisalh. 192 KPa Met. C	Cisalh. 383 KPa Met. C	Cisalh. 500 KPa Met. C
01	Cruz Alta	Basalto	46,54	50,17	38,25	209,76	417,96	520,64	185,93	356,44	469,71	260,07	454,83	653,12
02	Santana do Livramento	Diabásio	47,61	51,79		206,72	382,17	507,10						
03	Santa Maria - CT	Diabásio	45,99	49,40	38,13	221,83	427,37	479,84						
04	Sarandi	Diabásio	46,84	51,22		206,72	400,80	544,37						
07	Santa Rosa	Basalto	46,04	50,11		209,57	392,66	531,12						
11	Dilermando de Aguiar	Diabásio	44,37	49,25		197,41	400,80	530,25						
13	Erechim	Basalto	50,64	54,67		157,00	350,20	434,83						
16	Santa Cruz do Sul	Basalto	46,99	52,14		195,54	398,93	489,74						
17	Uruguaiana	Diabásio	48,56	52,53		246,34	400,90	542,99						
19	Santo Antônio da Patrulha	Diabásio	42,67	47,31		185,25	412,17	545,64						
22	São Luiz Gonzaga	Basalto	46,32	49,81		222,12	377,16	539,07						
06	Itaara - DP	Riodacito	46,69	50,34		215,75	445,81	587,12						
08	Itaara - BP	Riodacito	46,85	51,18		234,08	443,85	600,07						
12	Passo Fundo	Riodacito	52,17	56,86	44,12	211,73	372,46	517,79	176,45	334,57	453,36	222,91	439,44	515,44
18	Itaara - CP	Riodacito	52,40	55,61		183,09	412,66	547,60						
21	Itaara - Areia	Riodacito	53,17	56,37		212,80	298,42	542,99						
09	Caçapava do Sul	Mármore	47,42	52,55		197,60	370,59	502,89						
10	Bagé	Mármore	47,92	52,60	41,40	178,09	342,25	434,43	154,42	316,46	403,90	200,64	419,33	550,25
05	Eldorado do Sul	Granito	47,50	52,11		205,45	390,70	480,43						
20	Capão do Leão	Granito	52,42	56,59	41,62	188,78	375,10	477,78	164,23	327,44	414,66	221,63	395,21	530,93
14	Passo do Verde	Areia	43,17	46,95		151,91	331,37	394,91						
15	Passo de Verde	Areia	40,42	44,92	39,47	165,83	384,22	457,77	155,57	310,12	389,81	143,96	285,18	379,52

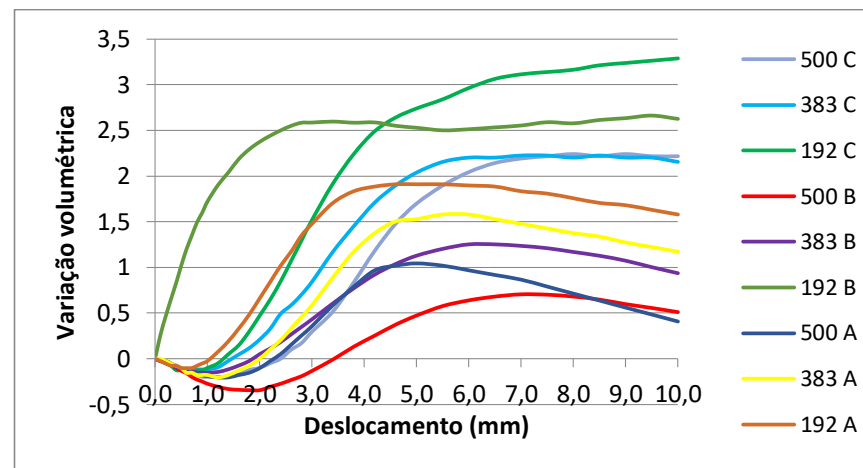
## APÊNDICE A2 -

Método A						Método B															Método C										
ÍNDICE DE VAZIOS			VOL. COMPAC. (cm³)			ÍNDICE DE VAZIOS			VOL. COMPAC. (cm³)			ÍNDICE DE VAZIOS			VOL. COMPAC. (cm³)			ÍNDICE DE VAZIOS			VOL. COMPAC. (cm³)										
192 KPa	383 KPa	500 KPa	192 KPa	383 KPa	500 KPa	192 KPa			383 KPa			500 KPa			192 KPa	383 KPa	500 KPa	192 KPa	383 KPa	500 KPa											
						#16	#30	#50	#16	#30	#50	#16	#30	#50	#16	#30	#50	#16	#30	#50											
0,58 6	0,58 6	0,58 6	101,1	101,1	101,1	0,81 0	0,77 4	0,80 4	106,3	102,3	105,9 4	0,81 2	0,79 8	0,77 3	103,9	102,8	104,1	0,78 2	0,81 7	0,79 7	103,5	103,3	105,4	0,62 1	0,72 5	0,64 0	103,4	110,0	104,6		
0,56 6	0,55 5	0,70 0	97,83	97,13	106,2 3																										
0,66 9	0,62 9	0,62 1	106,1	103,5	103,1																										
0,59 4	0,61 8	0,59 7	102,9	104,4	103,1																										
0,55 7	0,61 2	0,62 9	99,68	103,2	104,3																										
0,55 9	0,49 1	0,54 5	105,2 5	100,6 9	104,3 5																										
0,52 8	0,45 3	0,45 3	108,2	102,9	102,9																										
0,63 0	0,63 6	0,68 2	101	101,4	104,2																										
0,67 0	0,63 8	0,65 8	106,7	104,6	105,9																										
0,41 5	0,36 1	0,58 1	91,36	87,88	102,1																										
0,54 5	0,51 9	0,54 3	104,3	102,6	104,1																										
0,52 5	0,40 2	0,51 4	108,1	99,45	107,4																										
0,45 5	0,45 8	0,50 8	103,7	103,9	107,4																										
0,44 9	0,49 4	0,49 5	103	106,2	106,2	0,67 9	0,44 2	0,48 5	104,8	102,4	105,5	0,81 9	0,45 6	0,49 1	107	103,4	105,9	0,75 5	0,45 6	0,65 0	106,9 5	103,5 0	102,3 4	0,59 1	0,65 4	0,55 6	103,4	110,0	104,6		
0,48 2	0,48 3	0,35 4	106,8	106,8	97,59																										
0,45 7	0,45 7	0,45 7	103,1	103,1	103,1																										
0,48 8	0,34 0	0,38 8	110,4	99,45	103,1																										
0,42 9	0,39 3	0,39 3	104,9	102,3	102,3	0,72 9	0,45 3	0,56 8	111,4	106,7	106,7	0,70 2	0,44 6	0,67 1	103,5	106,1	108,2	0,69 3	0,52 0	0,65 2	106,6	111,5	105,9	0,41 4	0,41 7	0,43 1	103,8	104,1	105,1		
0,52 7	0,53 8	0,52 7	104,7	105,5	104,7																										
0,51 4	0,61 0	0,53 1	103,4	110	104,6	0,76 3	0,91 3	0,89 0	105,1 7	105,1 7	103,1 9	0,89 0	0,78 8	0,90 5	105	107,4	109,6	0,90 4	0,82 9	0,81 2	102,7 0	105,2	104,2	0,51 4	0,61 0	0,53 1	103,4	110	104,6		
0,42 3	0,42 3	0,42 3	103,1	103,1	103,1																										
0,42 8	0,42 8	0,42 8	103,1	103,1	103,1	0,65 2	0,49 0	0,45 2	104,8	107,6	104,8	0,79 0	0,44 4	0,46 8	107	104,2	105,9	0,72 7	0,52 2	0,66 2	106,9	109,9	104,7	0,42 8	0,41 7	0,42 1	103,1	102,3	102,6		

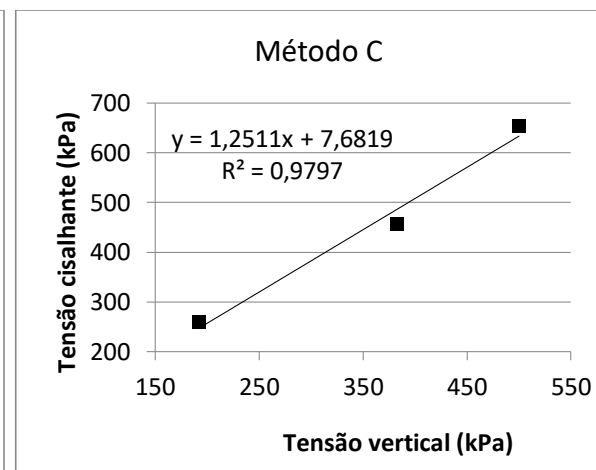
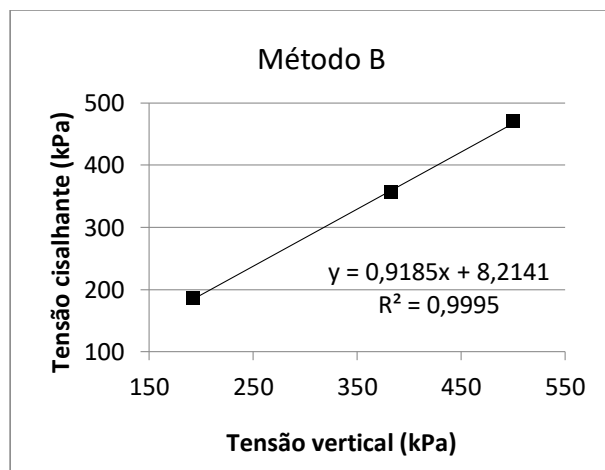
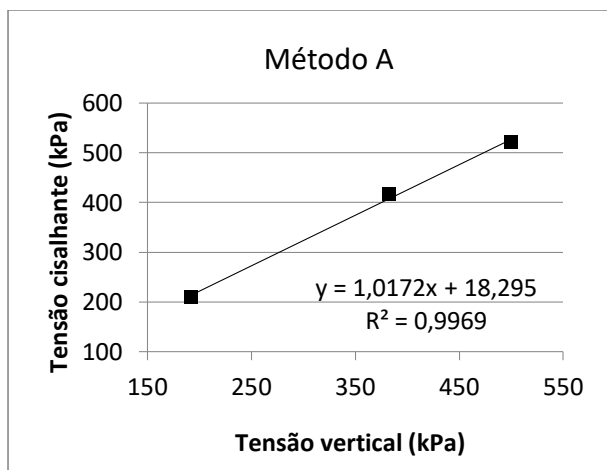
APÊNDICE A3 - Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A1.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal



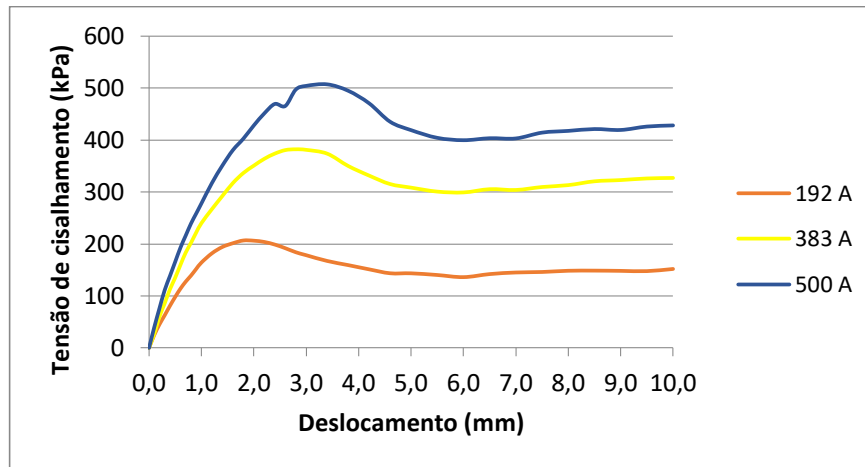
(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal



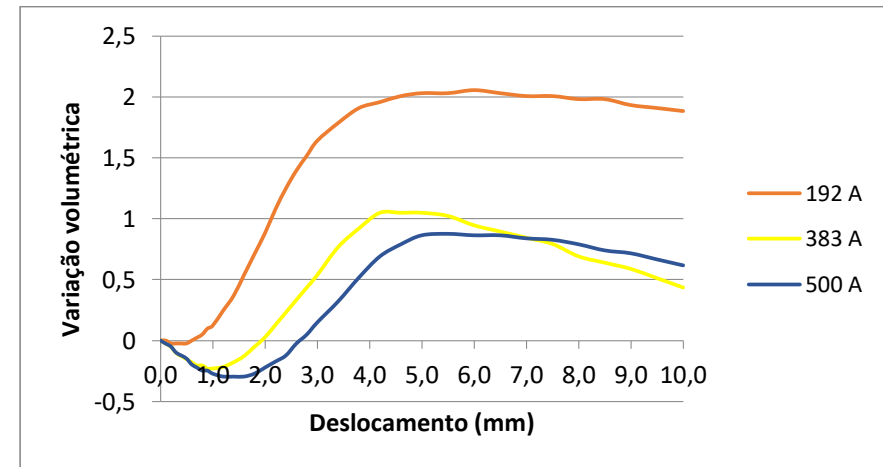
(c) Envolvórias de resistência para altas e baixas tensões normais



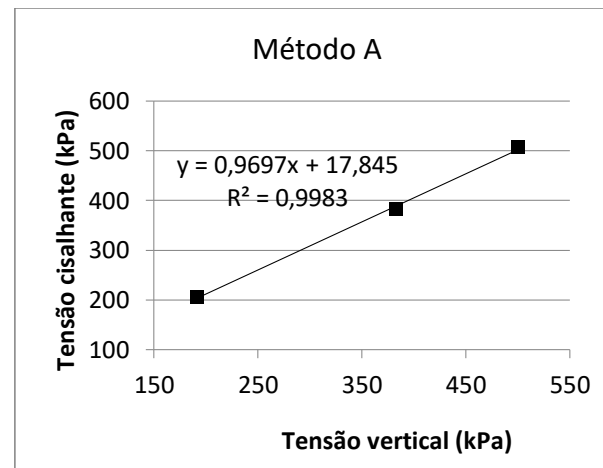
APÊNDICE A4 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A2.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

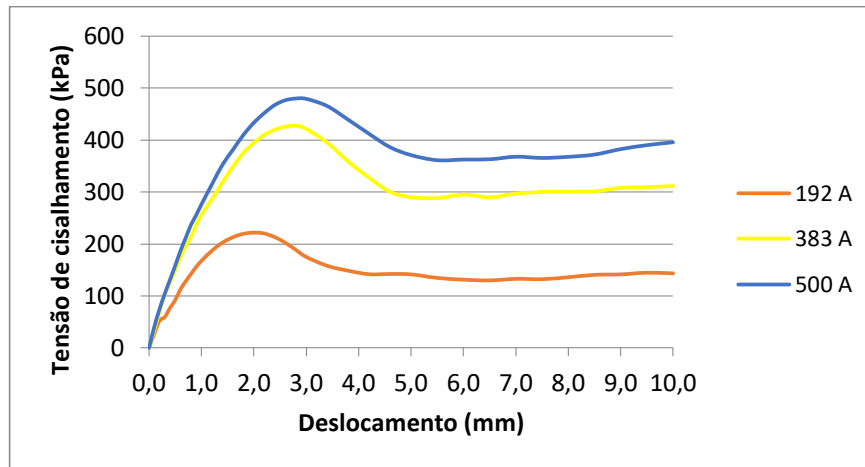


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

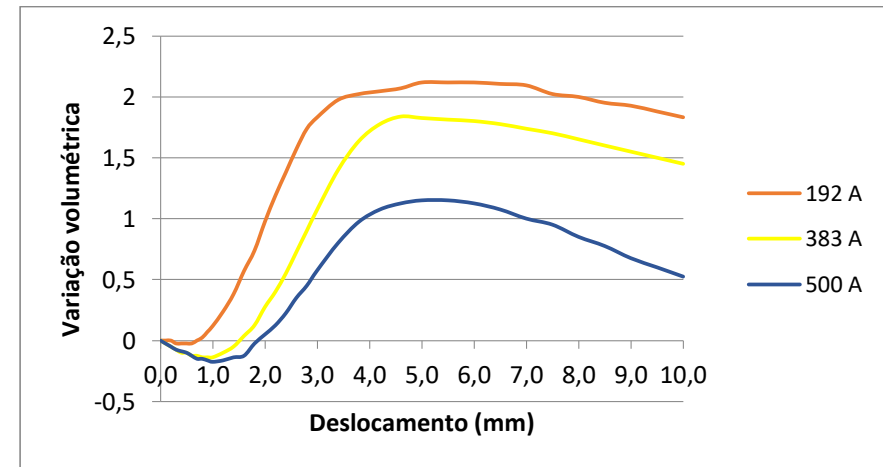


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

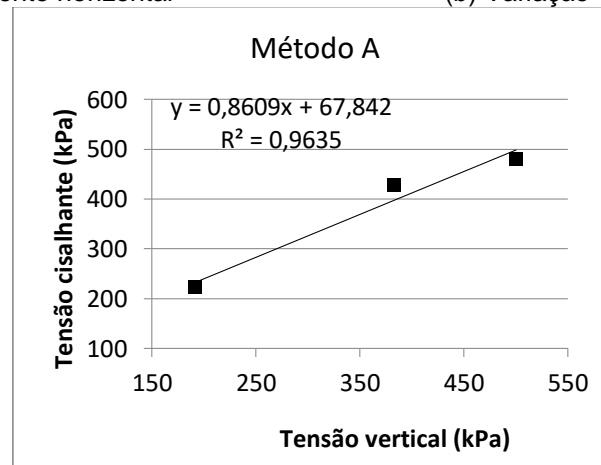
APÊNDICE A5 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A3.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

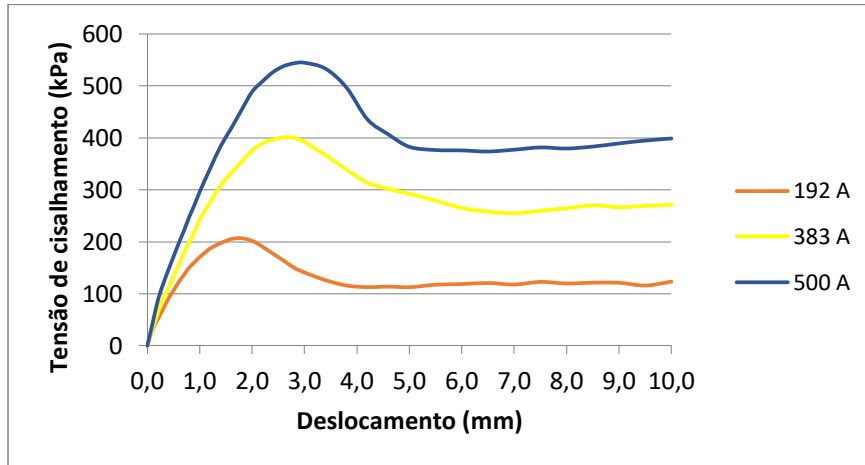


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

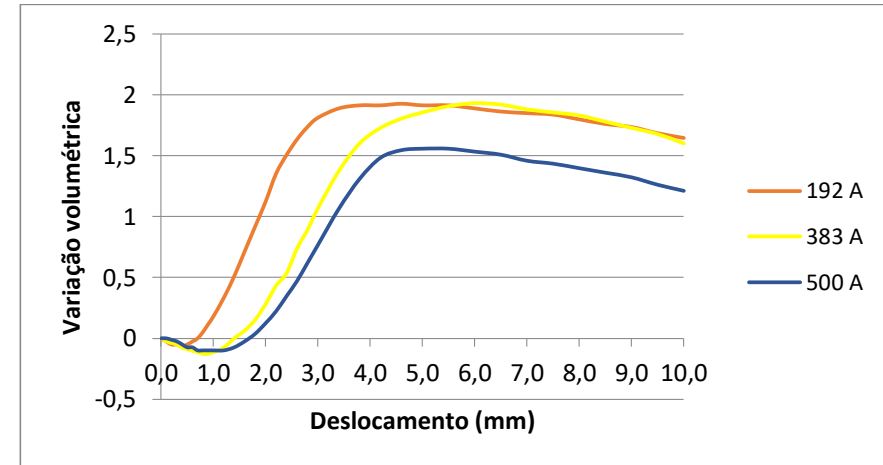


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

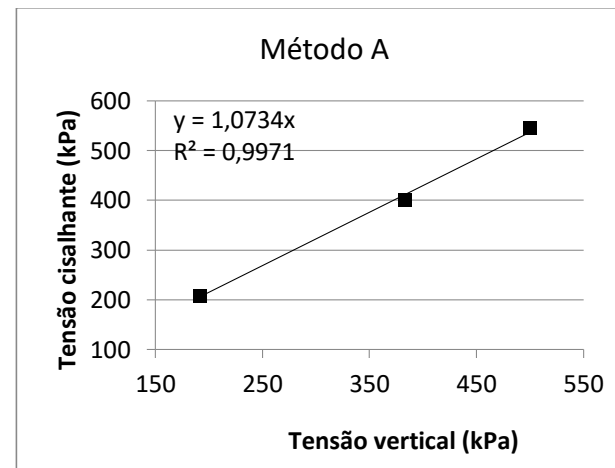
APÊNDICE A6 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A4.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

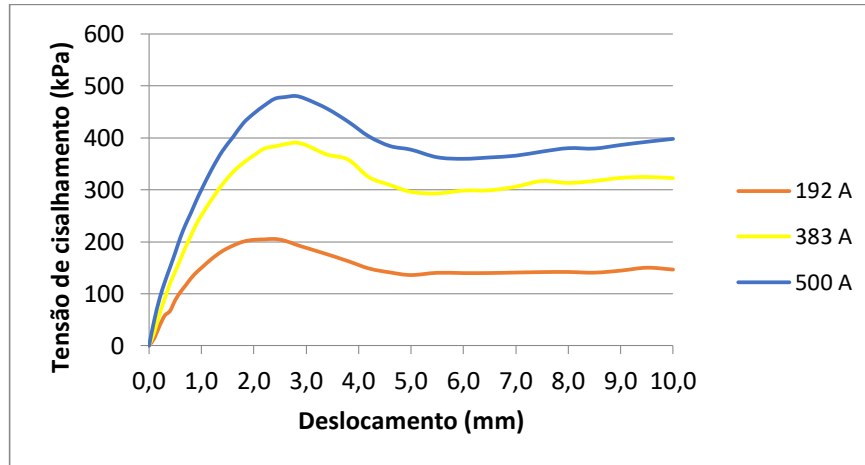


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

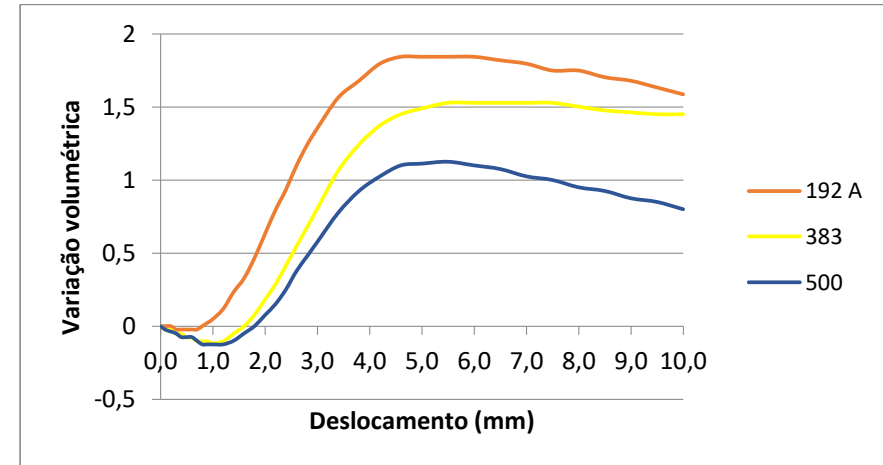


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

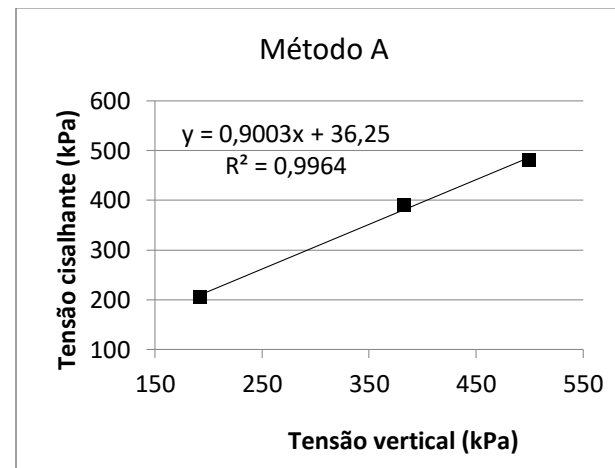
APÊNDICE A7 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A5.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

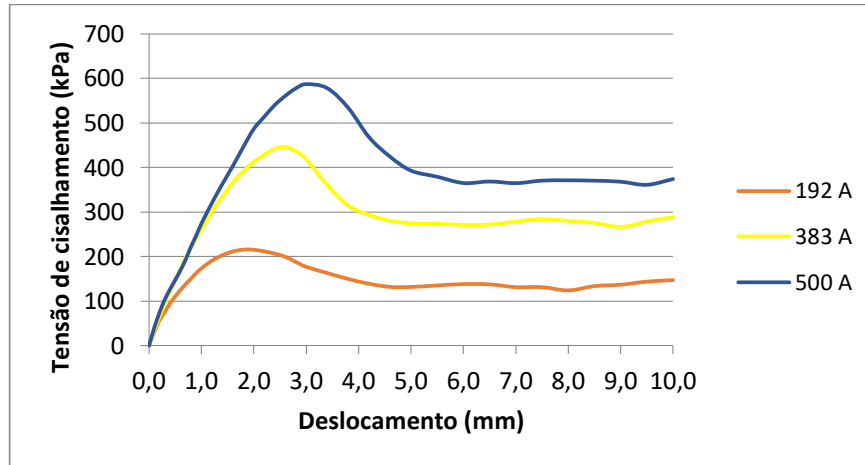


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

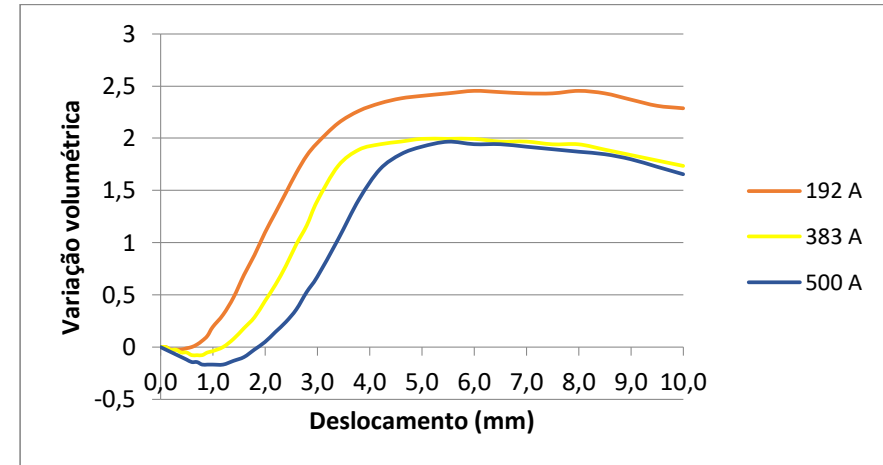


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

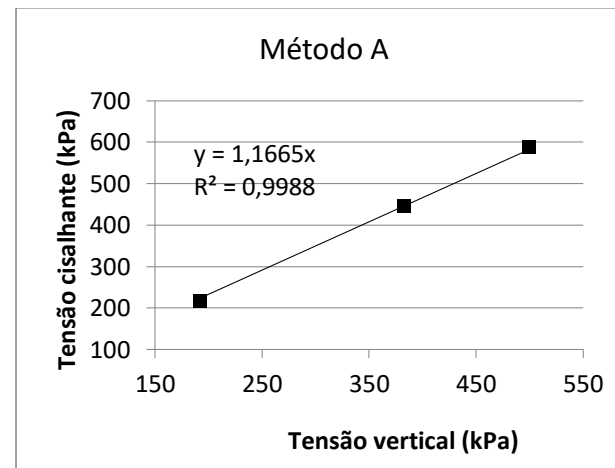
APÊNDICE A8 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A6.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

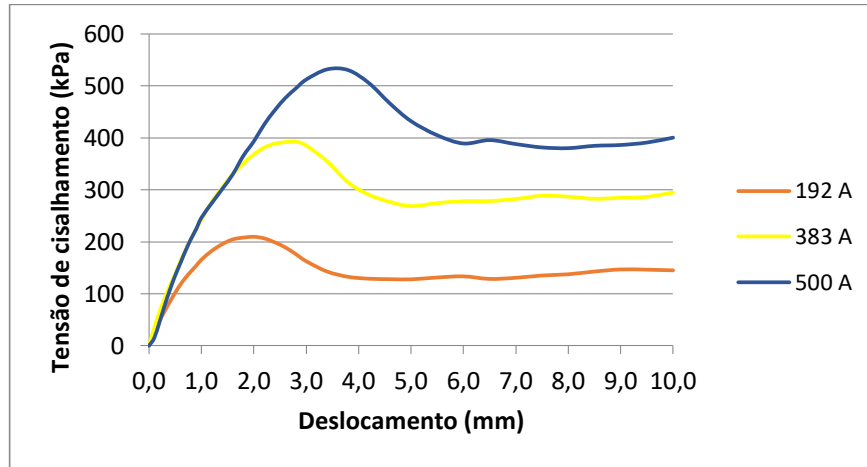


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

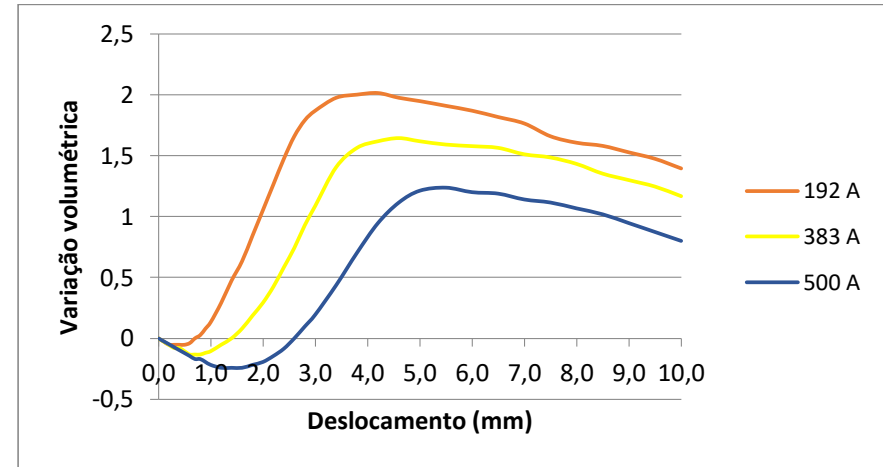


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

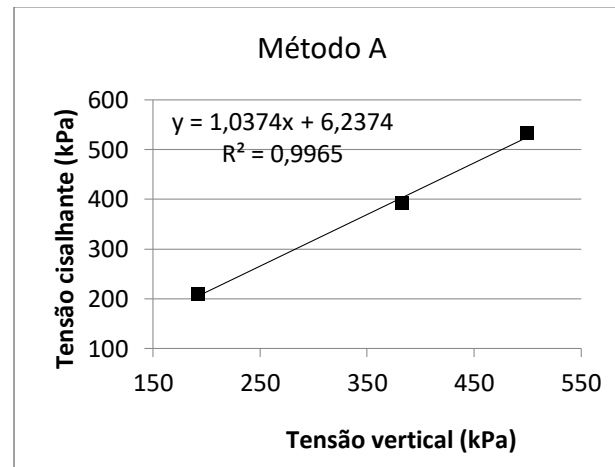
APÊNDICE A9 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A7.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

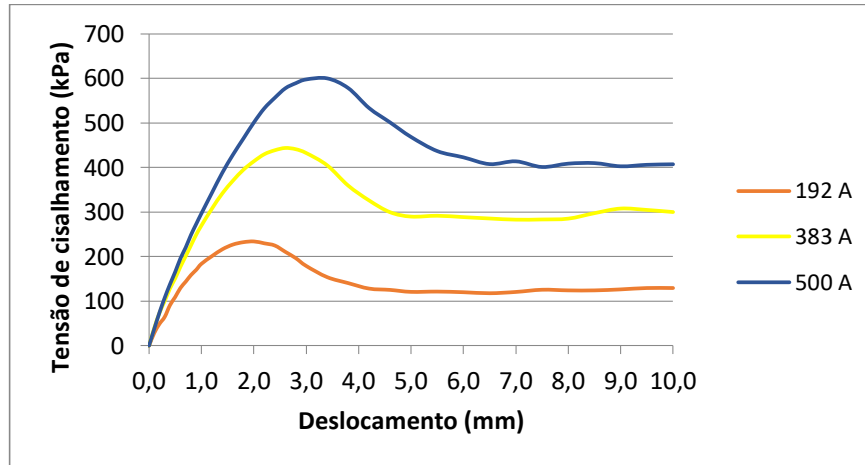


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

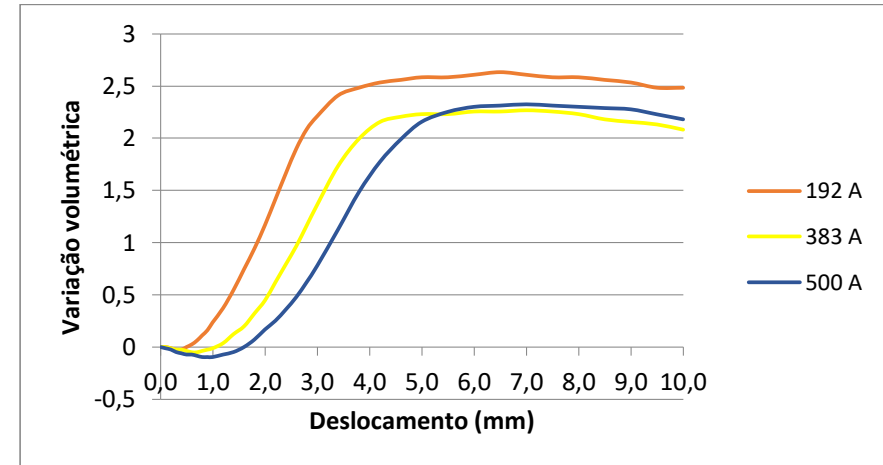


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

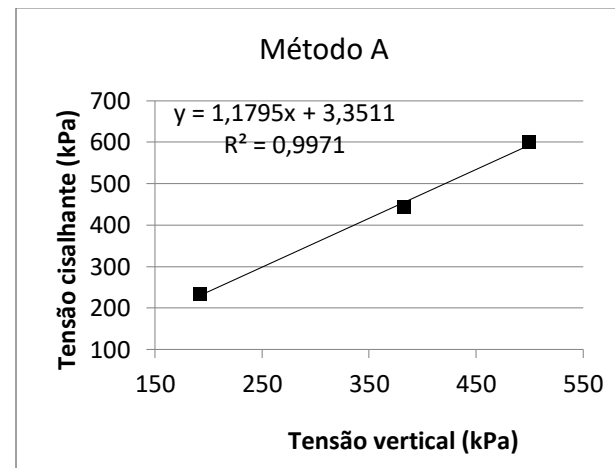
APÊNDICE A10 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A8.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

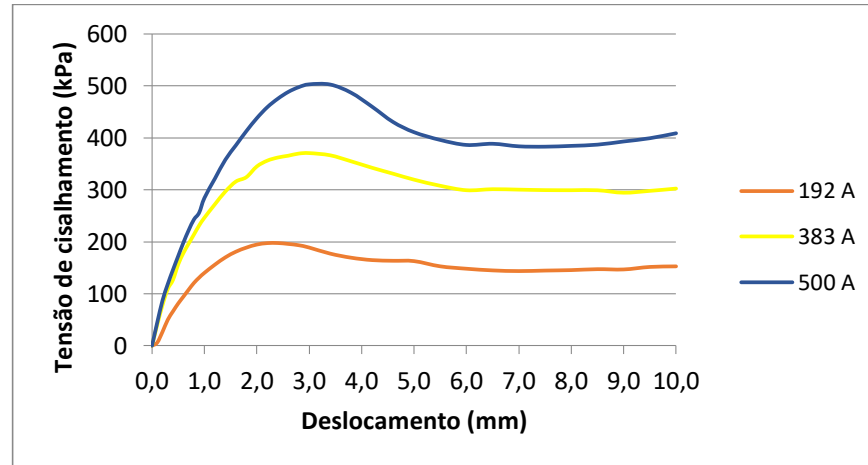


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

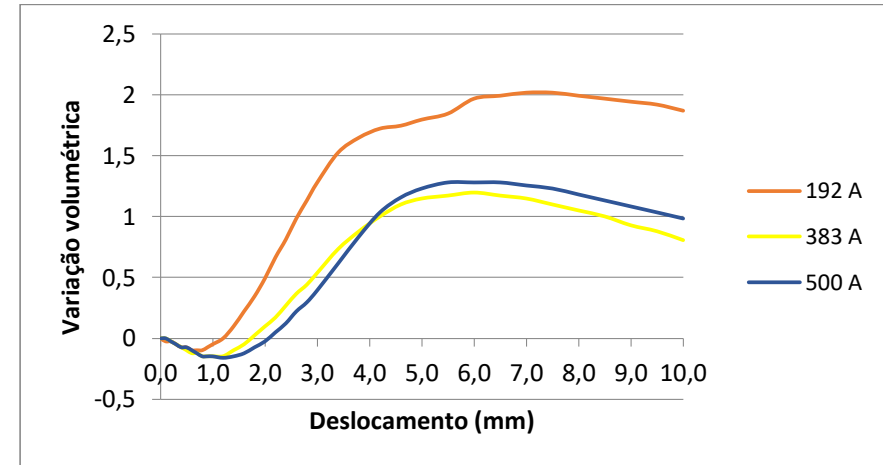


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

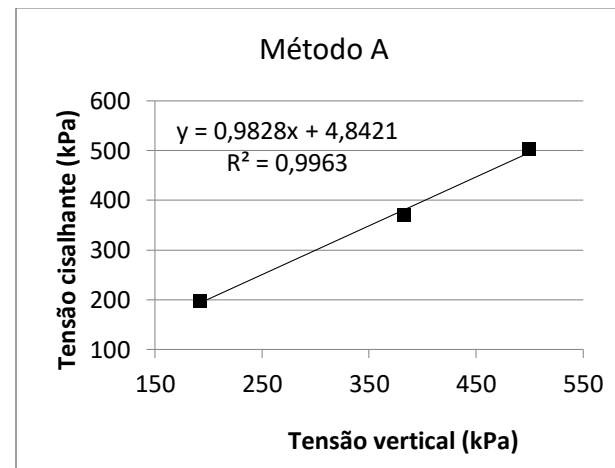
APÊNDICE A11 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A9.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal



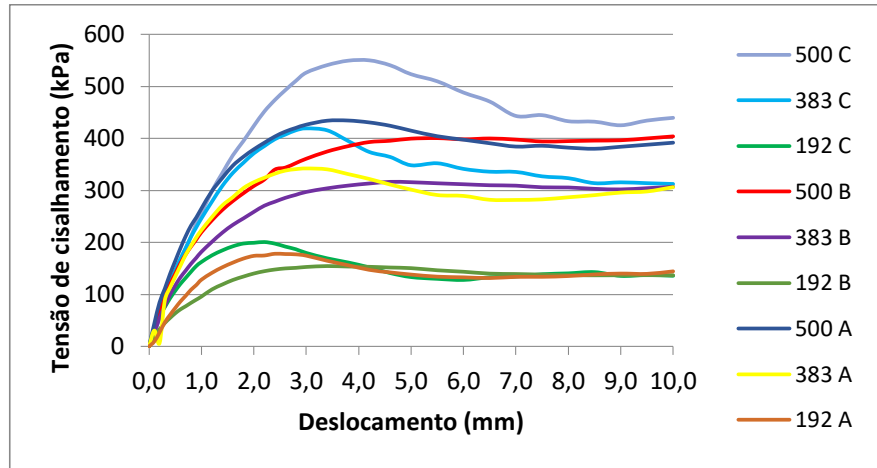
(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal



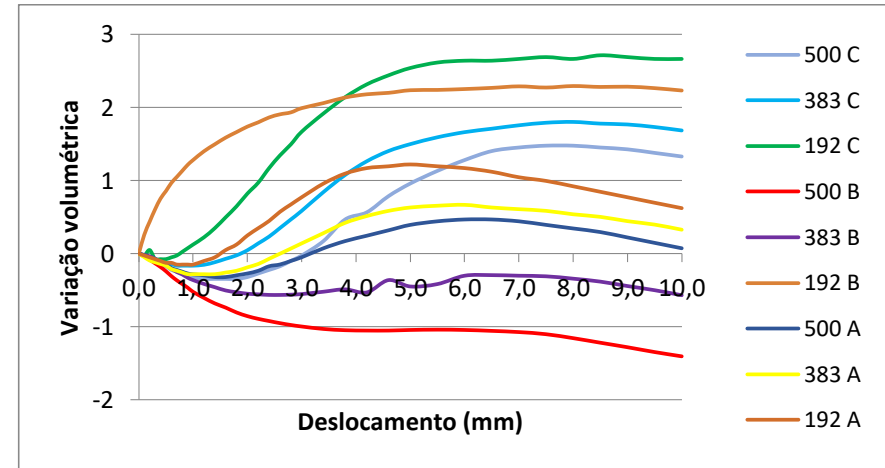
(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais



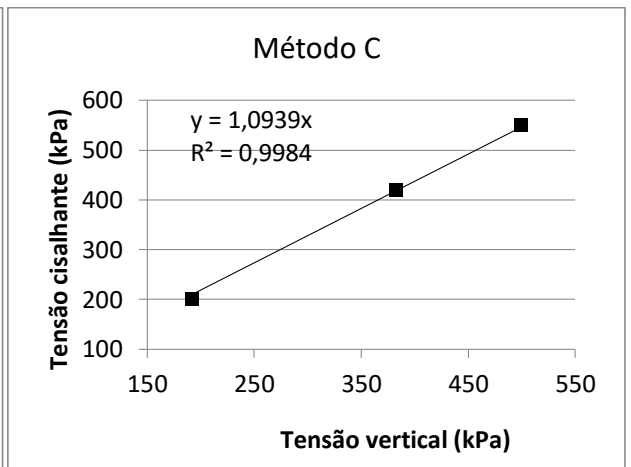
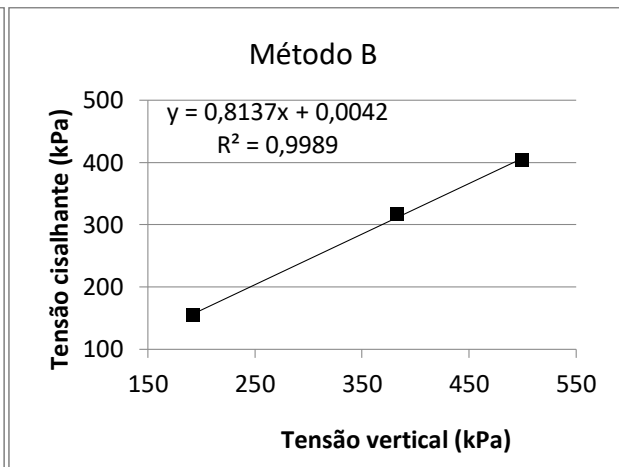
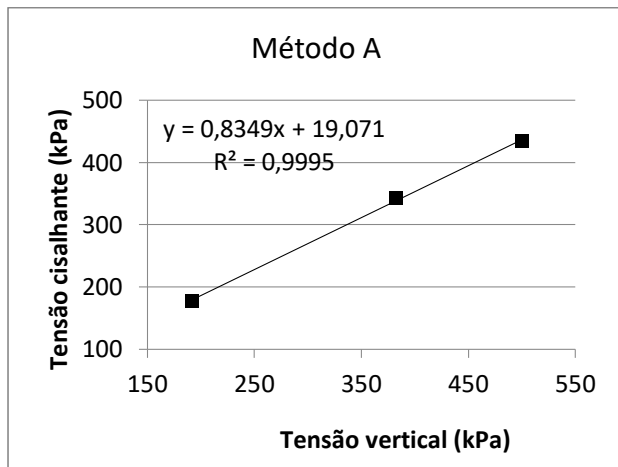
APÊNDICE A12 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A10.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

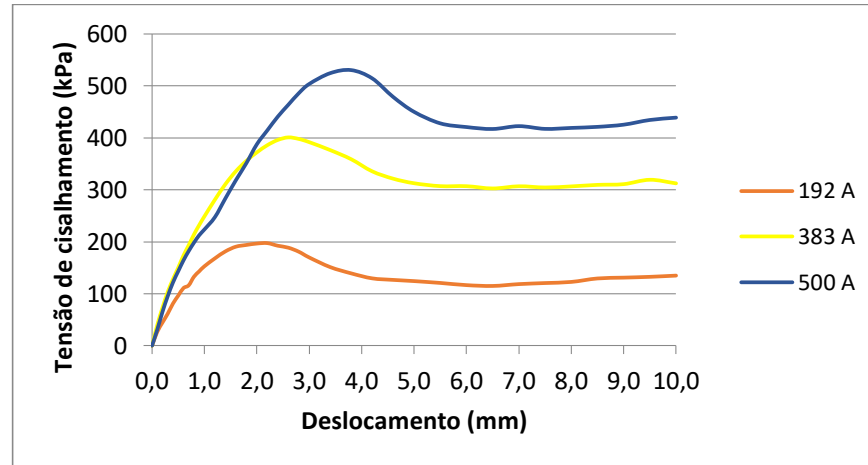


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

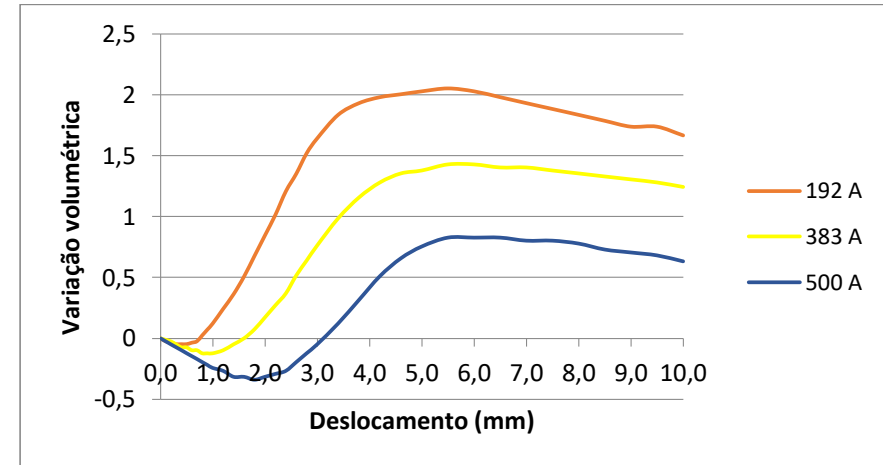


(c) Envolvórias de resistência para altas e baixas tensões normais

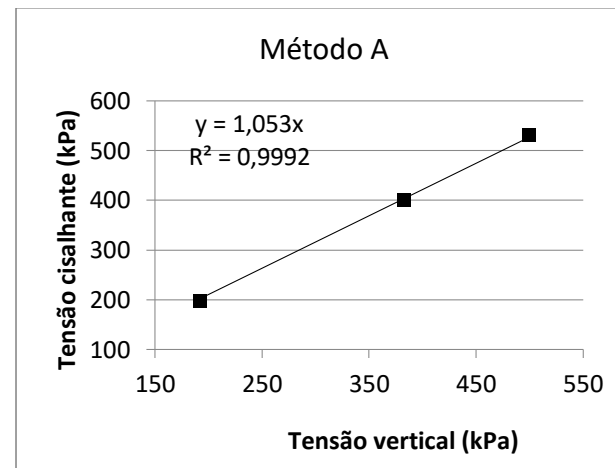
APÊNDICE A13 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A11.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

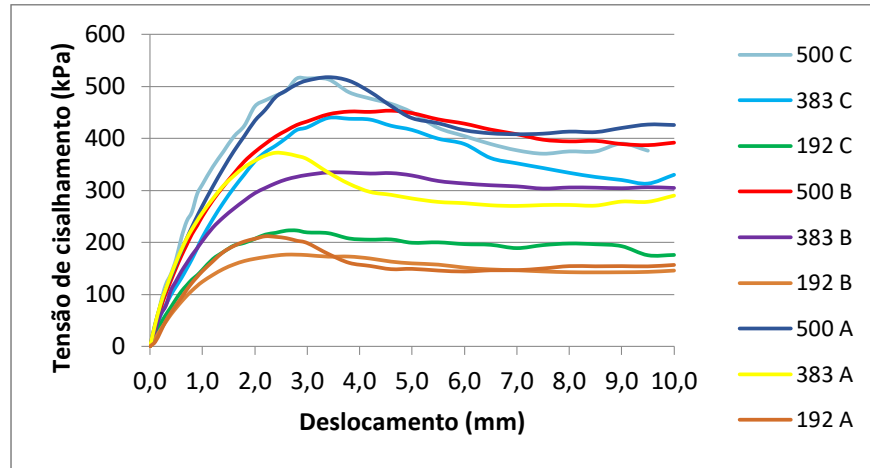


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

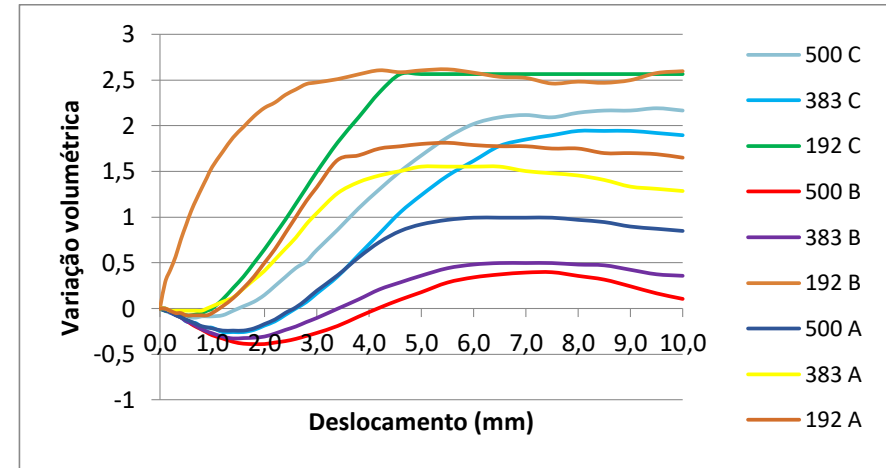


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

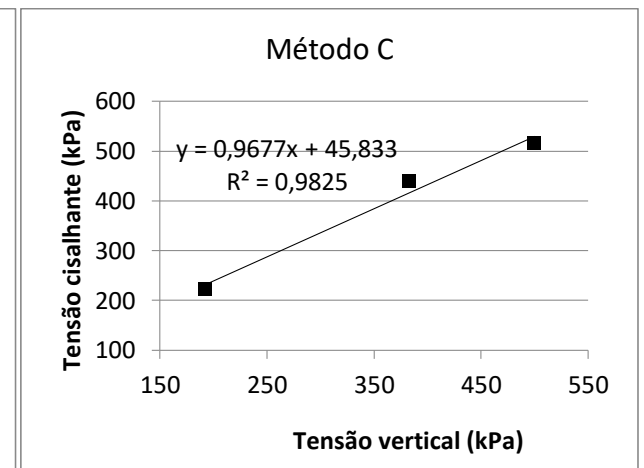
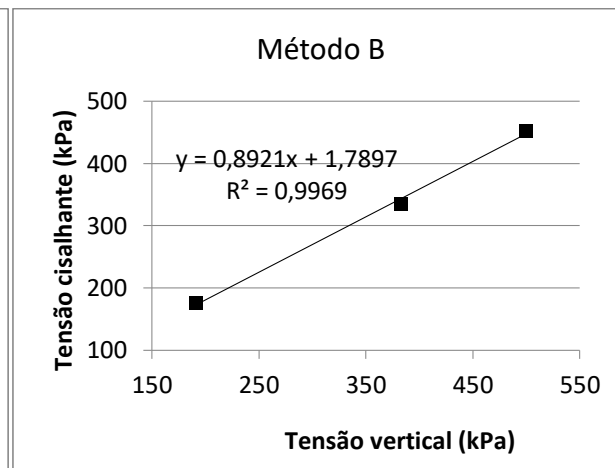
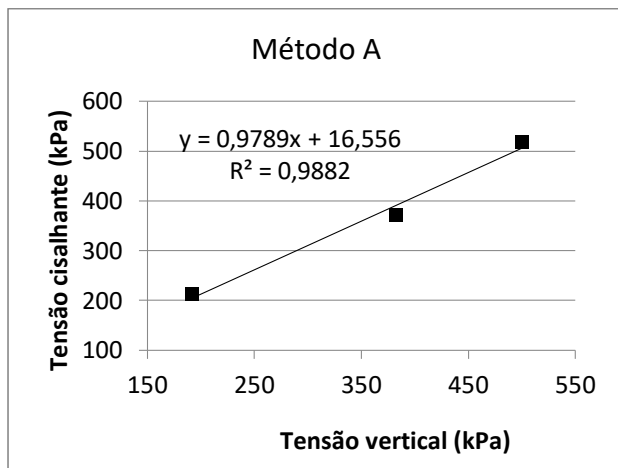
APÊNDICE A14 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A12.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

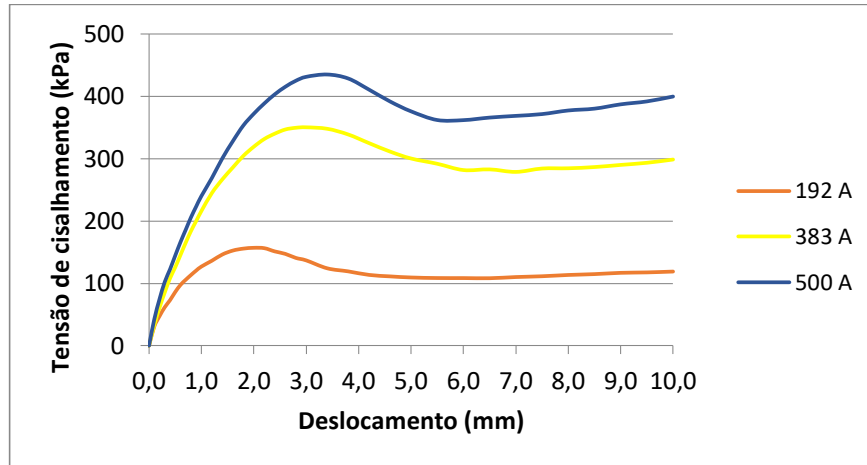


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

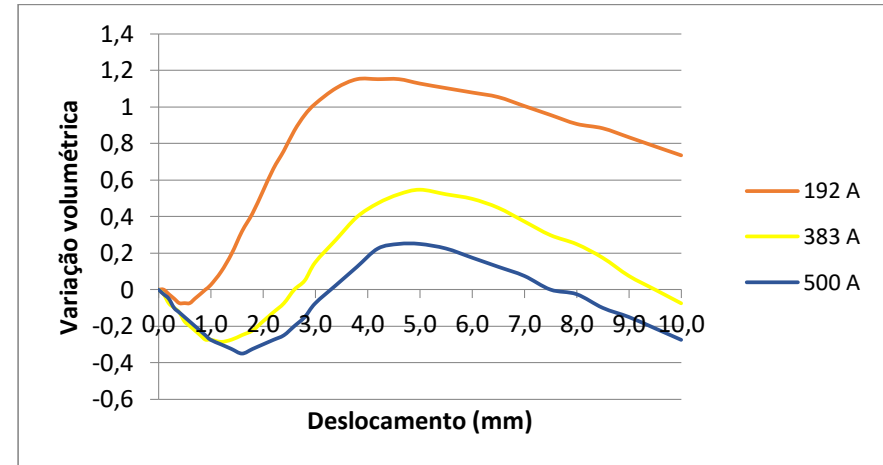


(c) Envolvórias de resistência para altas e baixas tensões normais

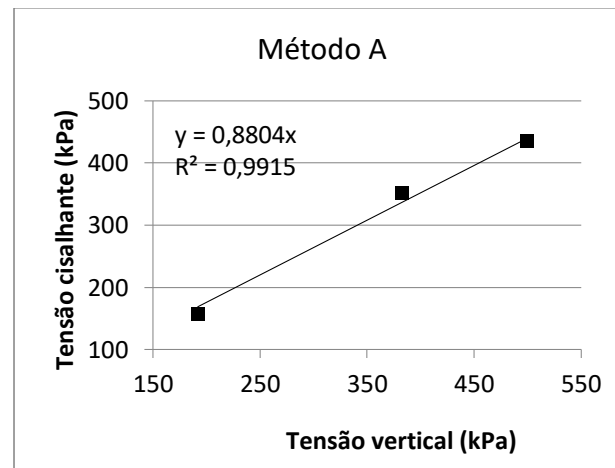
APÊNDICE A15 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A13.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

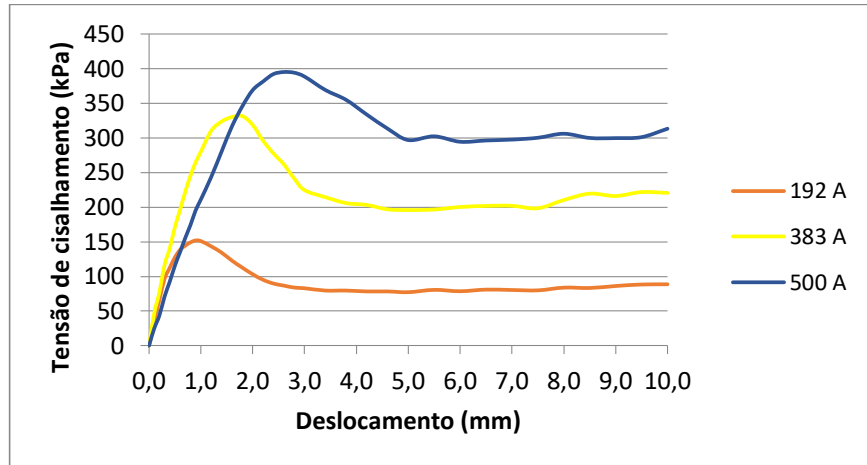


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

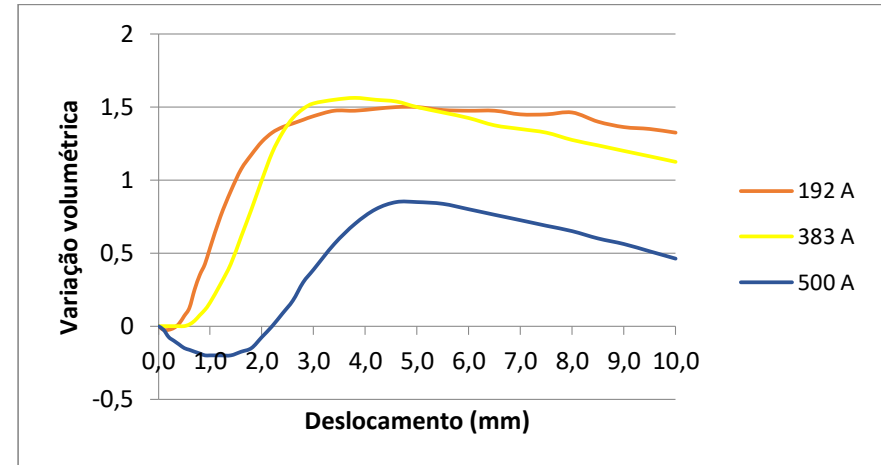


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

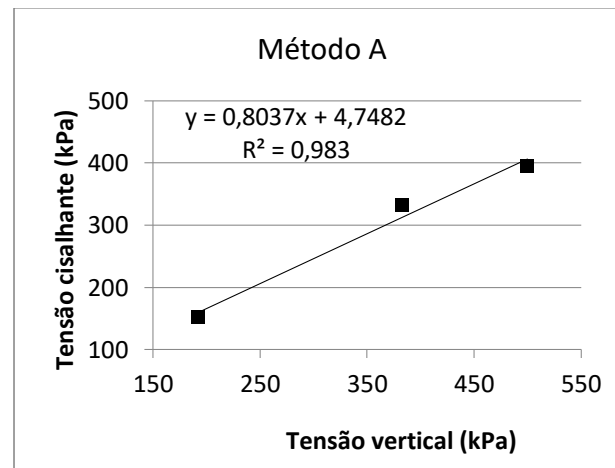
APÊNDICE A16 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A14.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

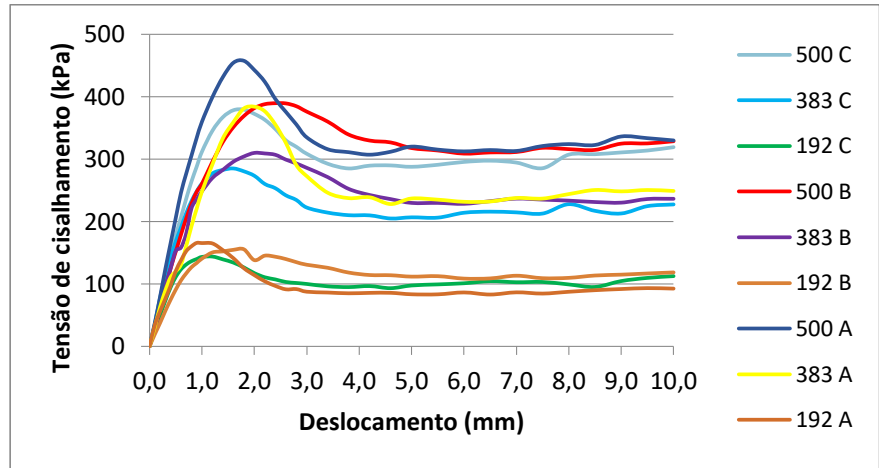


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

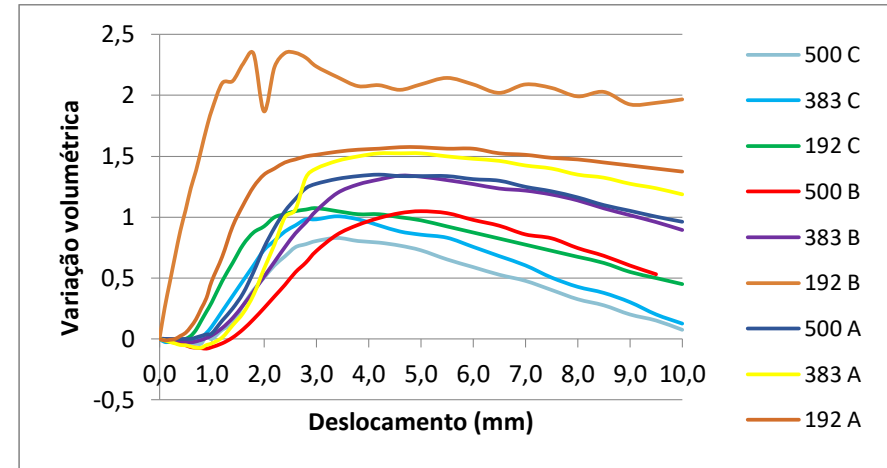


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

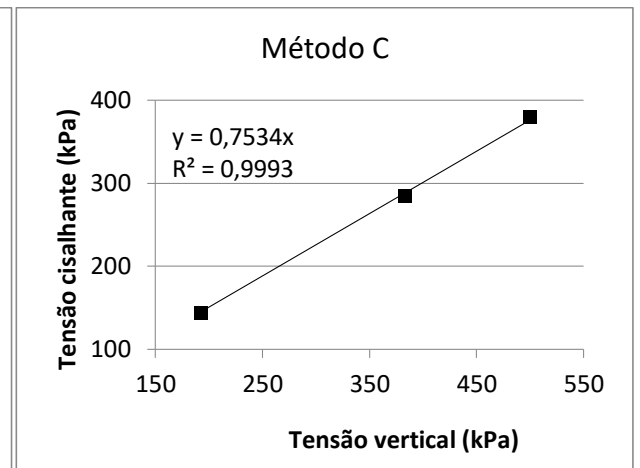
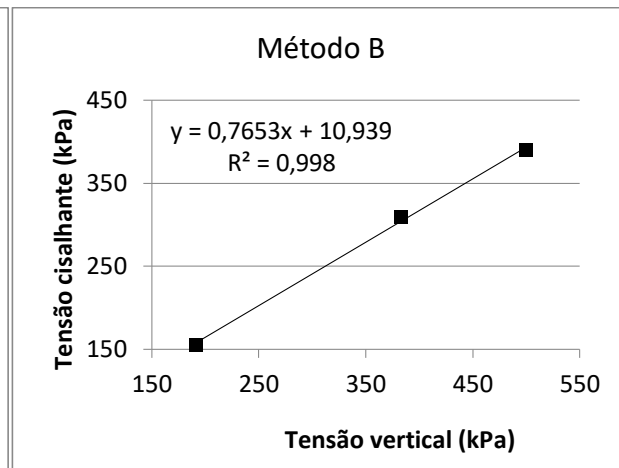
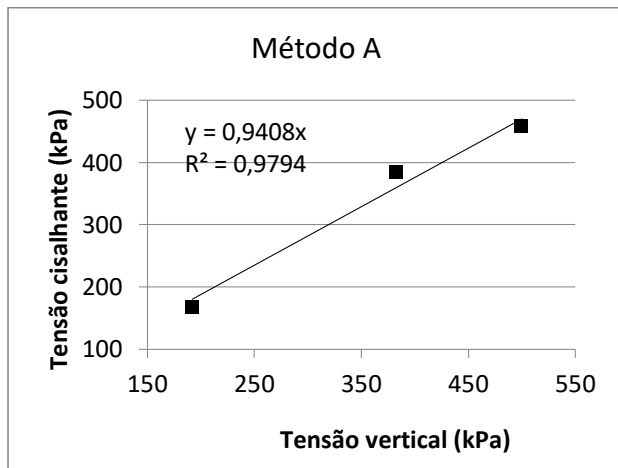
APÊNDICE A17 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A15.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

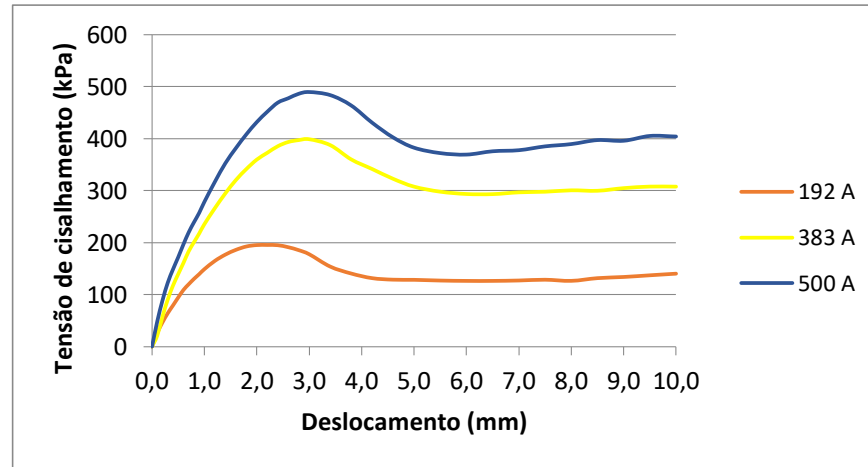


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

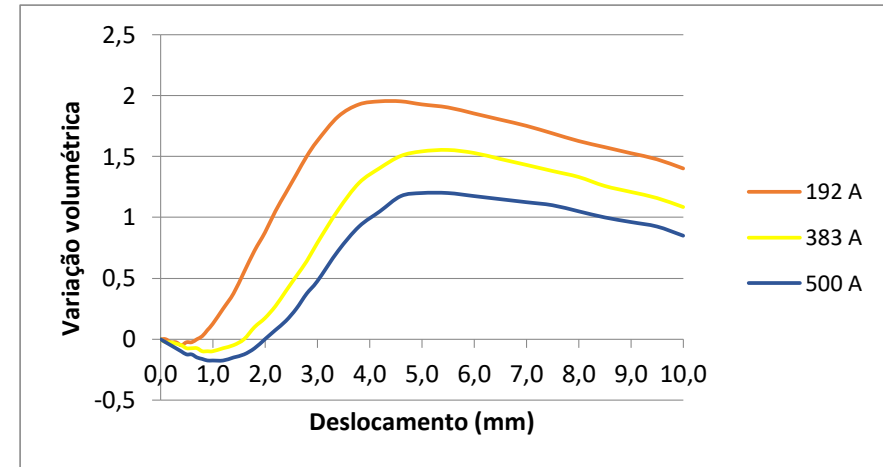


(c) Envolvórias de resistência para altas e baixas tensões normais

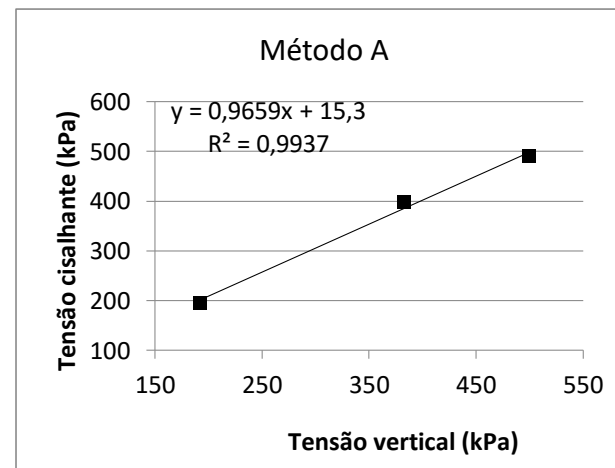
APÊNDICE A18 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A16.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

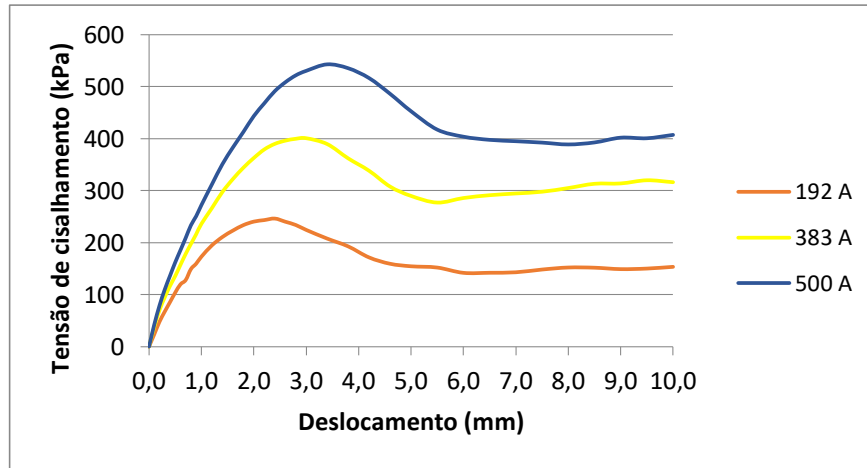


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

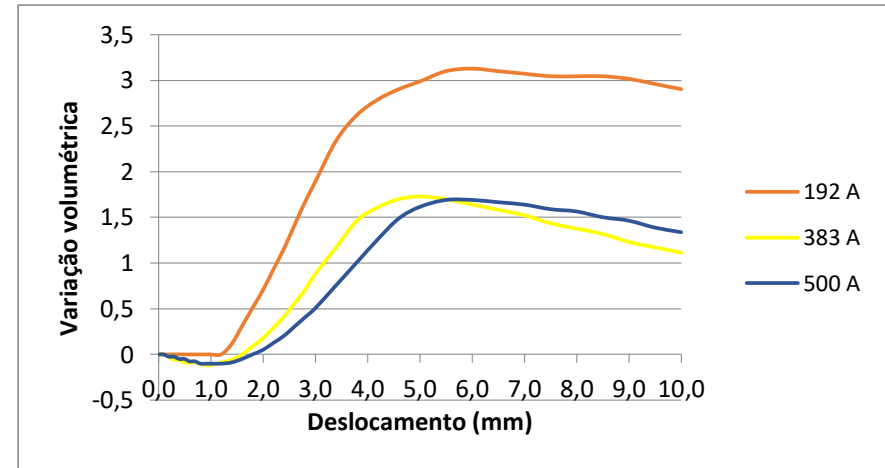


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

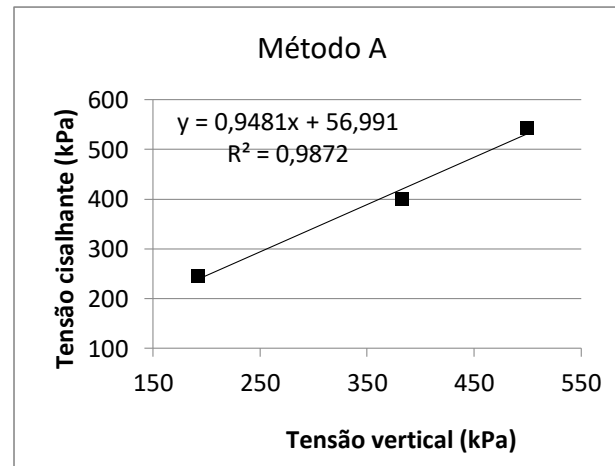
APÊNDICE A19 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A17.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal



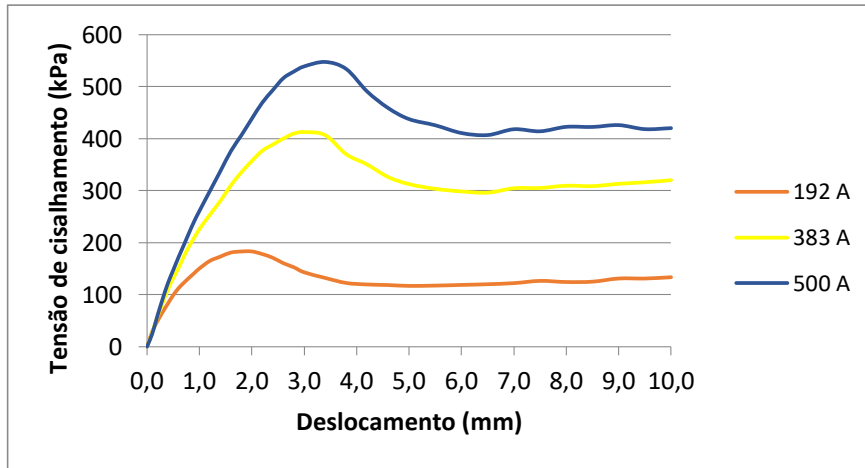
(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal



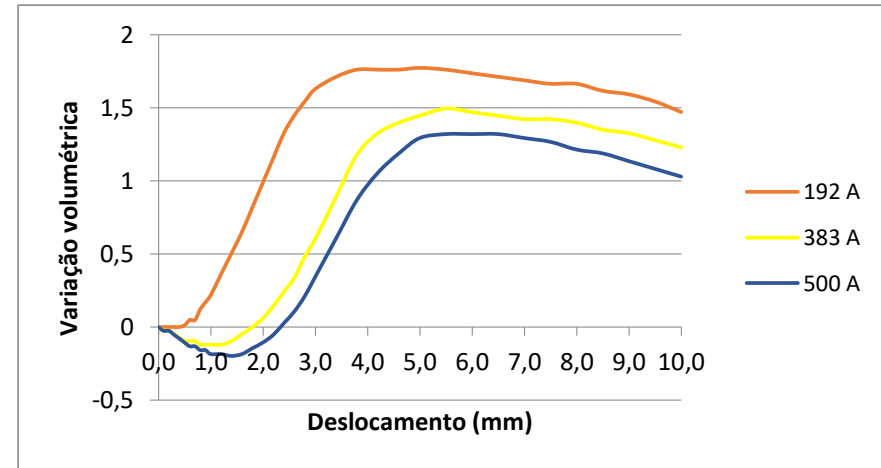
(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais



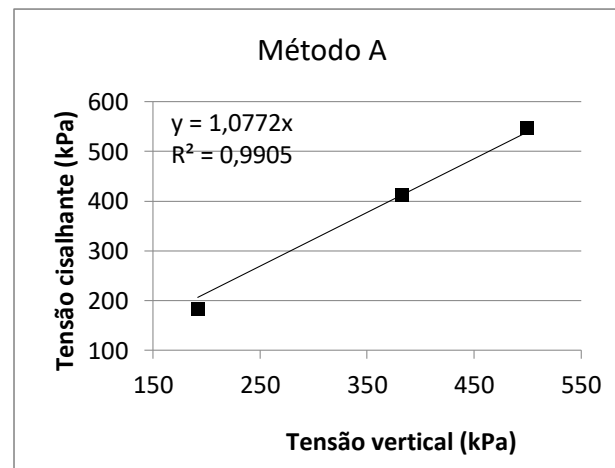
APÊNDICE A20 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A18.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

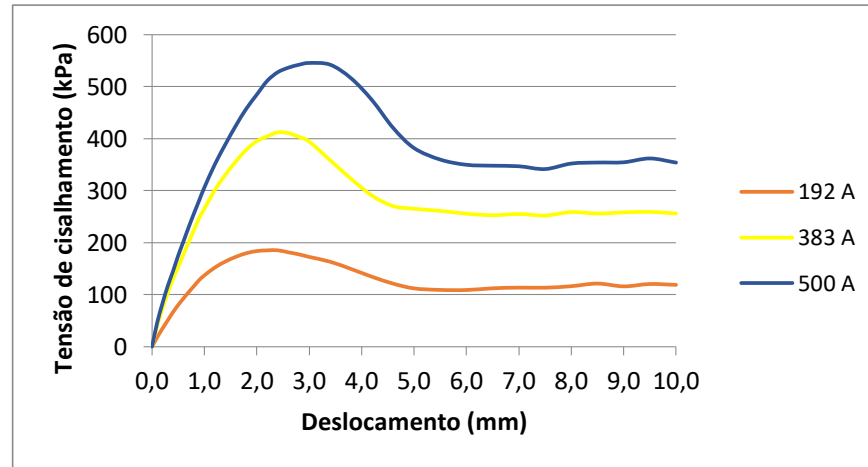


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

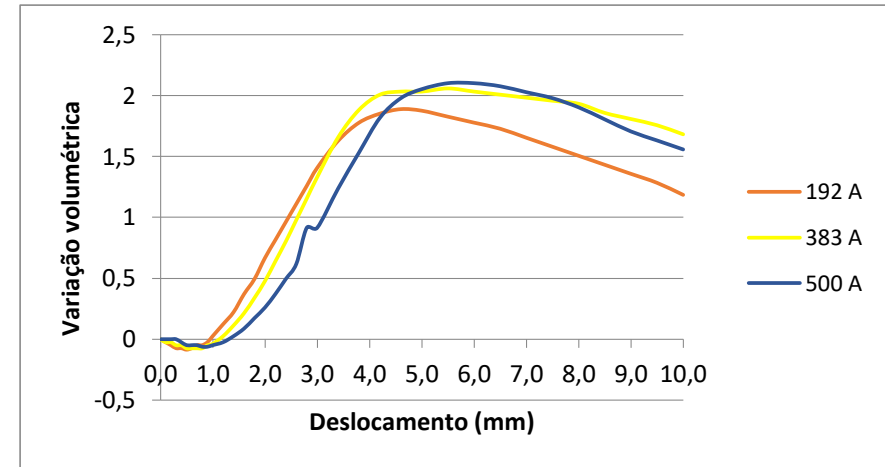


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

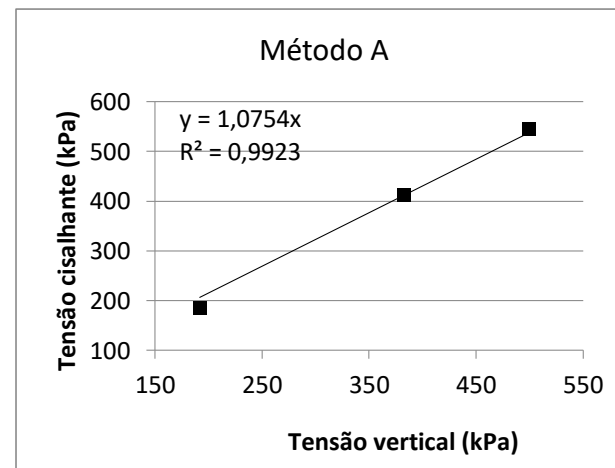
APÊNDICE A21 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A19.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

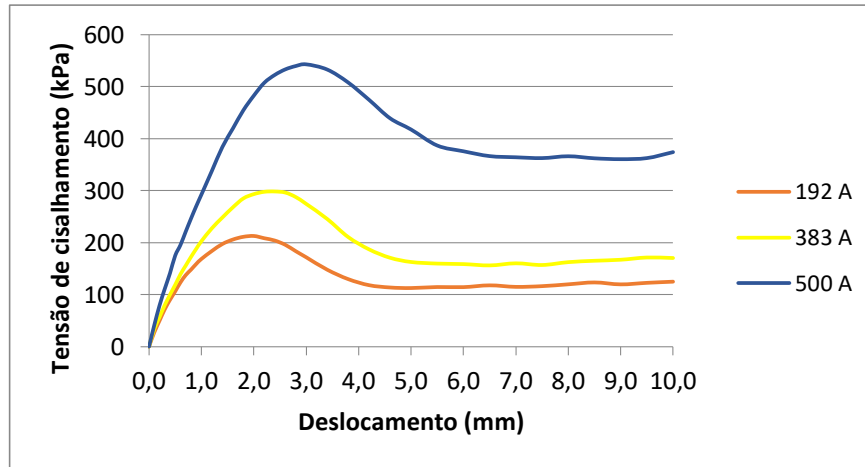


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

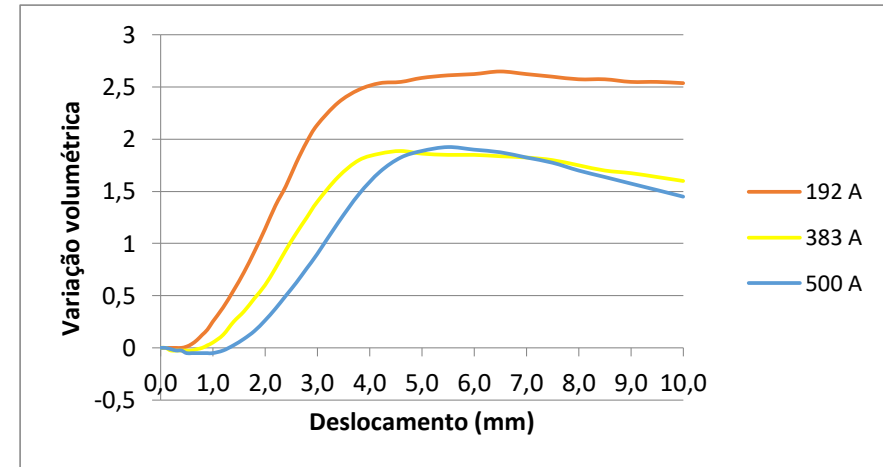


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

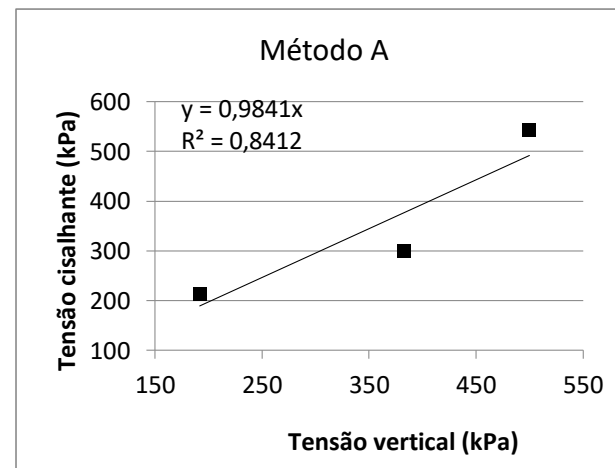
APÊNDICE A22 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A21.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

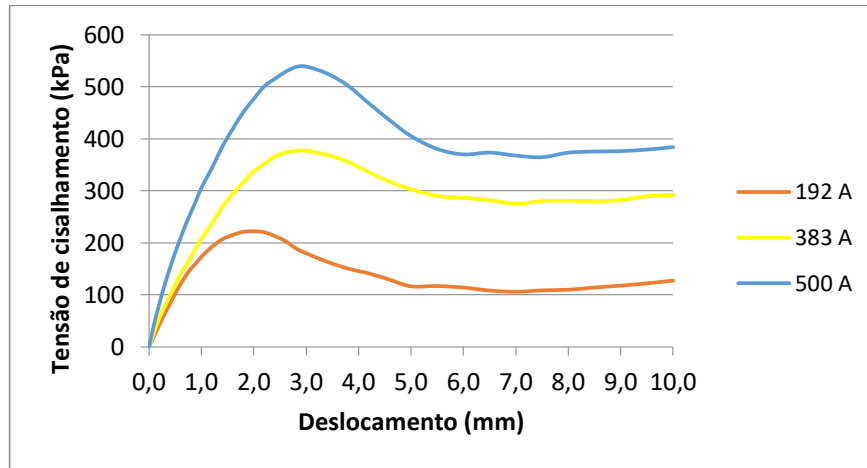


(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

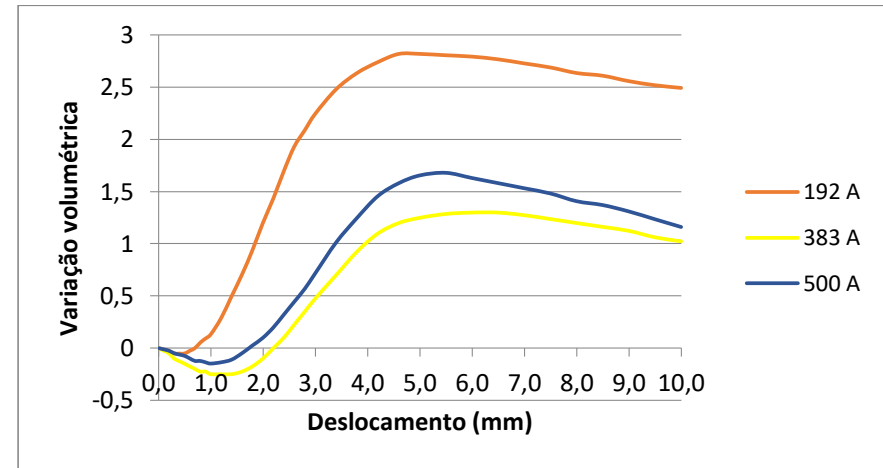


(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais

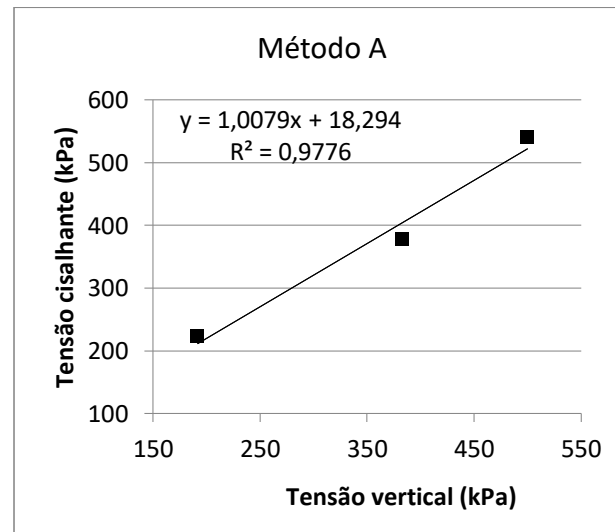
APÊNDICE A23 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto amostra A22.



(a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal



(b) Variação volumétrica versus deslocamento horizontal



(c) Envoltórias de resistência para altas e baixas tensões normais