

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**CONSTRUÇÃO DE CÉLULA TRIAXIAL CÚBICA PARA
AVALIAÇÃO DA RESPOSTA MULTIAXIAL DE UMA AREIA
CIMENTADA**

Dionatas Hoffmann Andreghetto

Porto Alegre

2022

DIONATAS HOFFMANN ANDREGHETTO

**CONSTRUÇÃO DE CÉLULA TRIAXIAL CÚBICA PARA
AVALIAÇÃO DA RESPOSTA MULTIAXIAL DE UMA AREIA
CIMENTADA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Andreghetto, Dionatas Hoffmann
Construção de célula triaxial cúbica para avaliação
da resposta multiaxial de uma areia cimentada /
Dionatas Hoffmann Andreghetto. -- 2022.
270 f.
Orientador: Lucas Festugato.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2022.

1. Triaxial cúbico. 2. areia cimentada. 3.
Melhoramento de solos. 4. Anisotropia. I. Festugato,
Lucas, orient. II. Título.

DIONATAS HOFFMANN ANDREGHETTO

**CONSTRUÇÃO DE CÉLULA TRIAXIAL CÚBICA PARA AVALIAÇÃO
DA RESPOSTA MULTIAXIAL DE UMA AREIA CIMENTADA**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, 10 de março de 2022.

Prof. Lucas Festugato

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Lucas Festugato

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profa. Karla Salvagni Heineck
UFRGS

Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do sul

Prof. Pedro Domingos Marques Prietto
Universidade de Passo Fundo

Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Profa. Raquel Quadros Velloso
PUC-Rio

Dra. Pela Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Profa. Carina Silvani

Universidade de Campina Grande
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do sul

Dedico este trabalho a Traudi Hoffmann.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às seguintes instituições e, principalmente, às pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho:

A minha mãe Traudi Hoffman, que fez de todo possível para garantir que eu recebesse o melhor estudo, sendo de fundamental importância para eu ter chegado a este ponto da minha carreira. A minha namorada, Tássia Cristina Lemos Pinheiro, por todo apoio durante a realização deste trabalho, além de me manter são no decorrer deste tempo.

Ao Dr. Lucas Festugato, pela orientação, ensinamentos, discussões e confiança.

Aos meus colegas de disciplinas e amigos, Gustavo e Aziz, que contribuíram e facilitaram muito os trabalhos e estudos das disciplinas.

Ao João, a Marina, a Mariana e a Helena, que sempre me forneceram discussões inteligentes, as quais aguçaram reflexões pertinentes aos estudos sobre geotecnia. E, ao João, pelas instigações consideráveis sobre assuntos diversos.

Meus agradecimentos se estendem também às amizades que construí em Porto Alegre: Eclesielter, Gustavo, Lucas, Mariana, Dudi, Paulo, Gonça, Helena, Hugo, Estéfano, Mozara, Pablo, Renato, Bruna, Andressa, Sergio e David pelas incontáveis risadas e histórias compartilhadas, e a Munique, Mari, Nilton, Wendel e todos os outros que viabilizaram a superação de todos os percalços e frustrações da pesquisa.

À UFRGS, pelo suporte ao providenciar insumos necessários que permitiram a composição de minha formação, tais como: laboratório, instalações físicas e seus funcionários, em especial, os da segurança, que sempre se preocupam conosco e se acostumaram as nossas longas jornadas.

À UFMT, pelo suporte financeiro de meu afastamento remunerado.

À CNPq, pelos eventuais suportes financeiros de insumos.

RESUMO

ANDREGHETTO, D. H. **Construção de célula triaxial cúbica para avaliação da resposta multiaxial de uma areia cimentada.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2022.

Solos que não apresentam propriedades mecânicas satisfatórias para determinadas aplicações podem melhorá-las a partir de cimentação artificial. Este tipo de material, devido à fabricação por meio do processo de compactação, pode apresentar comportamento anisotrópico. Para uma melhor análise do comportamento deste material, foi desenvolvido um triaxial cúbico ou triaxial verdadeiro. Esse dispositivo tem a capacidade de aplicar a corpos de prova cúbicos uma infinidade de condições de tensões. Desta forma, pode-se estudar com obstinação a influência da tensão intermediária e a anisotropia em solos cimentados. O aparato demonstrou resultados similares de ângulo de atrito e coesão comparado com amostras de triaxial convencional. Ao realizar os estudos, o material de análise utilizado foi a areia de Osório cimentada por Cimento Portland CP V – ARI, assim, observa-se que a resistência à compressão simples paralela à compactação 17% maior do que a perpendicular a ela. Para as análises de triaxial cúbico, foram usados quatro tipos de amostras, uma sem cimentação, outros dois teores de cimentações e, por fim, duas durações de cura. Nas análises de triaxial cúbico, anisotropia é observada, e a mesma é vista também em outras relações com a tensão intermediária e em ensaios de extensão. Com esse experimento, observa-se um aumento relativo ganho da resistência nos eixos perpendiculares com a adição da cimentação quando comparado com a direção paralela à compactação. Os resultados foram comparados com os modelos de Mohr-Coulomb, Lade e William-Warkne, e estes apresentaram uma superestimativa de resistência para compressões na direção perpendicular à compactação.

Palavras-chave: triaxial cúbico, areia cimentada, melhoramento de solos, anisotropia.

ABSTRACT

ANDREGHETTO, D. H. **A Cubic cell triaxial build for multiaxial behaviour analysis of artificially cemented sand.** Thesis (Engineering Doctorship) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2022.

Soils that do not have satisfactory mechanical properties for certain applications can improve them using artificial cement. This type of material, due to the manufacture through the compaction process, can present anisotropic behavior. For a better analysis of the behavior of this material, a cubic triaxial or true triaxial was developed. This device has the ability to apply a multitude of stress conditions to cubic specimens. In this way, the influence of intermediate stress and anisotropy in cemented soils can be studied obstinately. The apparatus showed similar results of friction angle and cohesion compared to conventional triaxial samples. When carrying out the studies, the material used for analysis was Osório sand cemented by Portland Cement CP V - ARI, thus, it is observed that the simple compressive strength parallel to the compaction is 17% greater than the perpendicular to it. For the cubic triaxial analyses, four types of samples were used, one without cement, another two cementing levels and, finally, two curing durations. In cubic triaxial analyses, anisotropy is observed, and the same is also seen in other relationships with intermediate stress and in extension tests. With this experiment, a relative increase in strength gain is observed in the perpendicular axes with the addition of cement when compared to the direction parallel to compaction. The results were compared with the Mohr-Coulomb, Lade and William-Warkne models, and these showed an overestimation of strength for compressions in the direction perpendicular to compaction.

Keywords: true triaxial; cubic triaxial; improved sand, soil improvement; anisotropy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	25
1.2	OBJETIVOS	26
1.2.1	Objetivo geral	26
1.2.2	Objetivos específicos.....	26
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTRUTURADOS E CIMENTADOS	28
2.1.1	Solos naturalmente estruturados e cimentados	28
2.1.2	Solos artificialmente cimentados e estruturados	29
2.1.3	Materiais	30
2.1.4	Fisioquímica da cimentação	31
2.1.5	Comportamento mecânico de solos cimentados e estruturados.....	35
2.2	CARREGAMENTO MULTIAXIAL	44
2.3	COMPORTAMENTO TRÓPICO DE SOLOS.....	50
2.3.1	Anisotropia em relação a rigidez.....	51
2.3.2	Anisotropia em relação a resistências	55
2.3.3	Anisotropia em aplicações numéricas	64
2.4	EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS	67
2.4.1	Triaxiais cilíndricos ou triaxiais convencionais	67
2.4.2	Triaxiais cúbicos de paredes rígidas.....	69

2.4.3 Triaxiais cúbicos de paredes flexíveis.....	70
2.4.4 Triaxiais cúbicos de paredes mistas	71
2.5 SUPERFÍCIES DE FALHA EM CARREGAMENTOS MULTIAXIAIS	
72	
2.5.1 Mohr-Coulomb	72
2.5.2 William-Warnke	73
2.5.3 Lade	75
3 SUBSÍDIOS NECESSÁRIOS AO DESENVOLVIMENTO DA	
PESQUISA	78
3.1 LEITOR DE CÉLULAS DE CARGA	78
3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO	81
3.3 SISTEMA DOS ATUADORES	84
3.4 CÉLULA CÚBICA.....	86
3.5 SOFTWARE DE CONTROLE E MONITORAMENTO.....	97
3.5.1 Comunicação computador Arduino	98
3.5.2 Sistema de leituras	101
3.5.3 Sistema de atuação	104
3.5.4 Sistema de principal	105
3.6 VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO	110
3.6.1 Materiais e métodos.....	110
3.6.2 Resultados areia de Osório não cimentada.....	116
3.6.3 Resultados com areia de Osório cimentada.....	118
3.6.4 Resultados com BRS cimentada.....	119

4	ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES	121
4.1	MATERIAIS E METODOLOGIA.....	121
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	126
5	ENSAIOS TRIAXIAIS CÚBICOS	129
5.1	AREIA DE OSÓRIO NÃO CIMENTADA	130
5.2	AREIA DE OSÓRIO CIMENTADA	138
5.3	APLICAÇÃO DE MODELOS	140
5.3.1	Mohr-Coulomb	140
5.3.2	William-Warnke	141
5.3.3	Lade	141
5.3.4	Resultados compilados e discussões	142
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS... 158	
	REFERÊNCIAS	160
7	APÊNDICE.....	170
7.1	SISTEMA DE LEITURA DAS CÉLULAS DE CARGA	170
7.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	179
7.2.1	Esquema elétrico	179
7.2.2	Código do Arduino	180
7.3	SISTEMA DE ATUADORES.....	183
7.3.1	Código Arduino Moradin	183
7.3.2	Código Arduino Talos	186
7.4	PROJETO CÉLULA CÚBICA	190

7.5	GRÁFICOS DE TODOS OS TRIAXIAIS REALIZADOS.....	209
7.5.1	Triaxiais cúbicos de areia de Osório não cimentada.....	209
7.5.2	Triaxiais cúbicos de areia de Osório cimentada cura atmosférica cimentação menor sete dias de cura.....	223
7.5.3	Triaxiais cúbicos de areia de Osório cimentada cura atmosférica cimentação menor três dias de cura	237
7.5.4	Triaxiais cúbicos de areia de Osório cimentada cura atmosférica cimentação maior e três dias de cura	251

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Módulo cisalhante relativo de areias com diferentes graus de cimentações.....	33
Figura 2-2 Microestrutura de areia de Ottawa com cimento tipo SS50 à baixa cimentação. (a) Grau de cimentação = 0% e (b) 19 %	34
Figura 2-3 MEV de areia calcária com 8% de cimento Portland	35
Figura 2-4 Teor de cimento vs resistência à compressão simples para diferentes solos.....	36
Figura 2-5 Resistência à compressão simples de areia uniforme de Osório e areia siltosa bem graduada do Porto.....	37
Figura 2-6 Parâmetros de resistência em função da densidade relativa (a) e ângulo de atrito (b).	38
Figura 2-7 Porosidade e resistência à compressão simples com diferentes cimentações.....	38
Figura 2-8 Resistência à compressão simples conforme idade de solo cimentado.	39
Figura 2-9 Influência da idade de solo na resistência à compressão simples de solos reforçados com diferentes teores de cimento (a) e porosidades (b).	40
Figura 2-10 Influência da temperatura de cura na resistência à compressão simples de solos cimentados. Argilas, pedregulho (a) e areia orgânica e inorgânica (b).	41
Figura 2-11 Efeitos de temperatura de cura de argila na resistência de compressão simples. .	42
Figura 2-12 Resposta tensão média e desviadora (a) e desviadora normalizada versus deformação (b) de solo cimentado.....	43
Figura 2-13 Deformação axial versus tensão desviadora de calcarenito.....	44
Figura 2-14 Plano Octaédrico das Tensões.	45
Figura 2-15 Direção dos carregamentos, projeção isométrica (a) e plano octaédrico (b).	47
Figura 2-16 Orientação da amostra em relação aos eixos cartesianos (a) e plano octaédrico (b).	48

Figura 2-17 Distribuição de grãos em areia compactada.	51
Figura 2-18 Módulo de elasticidade a 50% da deformação para a falha em ensaios cúbicos da areia da praia de Santa Mônica.	52
Figura 2-19 Módulo de elasticidade a 50% da deformação para a falha em ensaios cúbicos de caolim.	53
Figura 2-20 Influência de carregamento anisotrópico prévio, com pré-compressão (A) e pré-extensão (b) no eixo Z (vertical).	53
Figura 2-21 Tensão deformação de areia Leighton Buzzard em diferentes ângulos de disposição com a vertical.	55
Figura 2-22 Variação do ângulo de atrito de pico em areia da praia de Santa Mônica.	56
Figura 2-23 Variação da resistência na areia de Nevada.	57
Figura 2-24 Variação do ângulo de atrito em função para caolim	58
Figura 2-25 Anisotropia inicial na resistência em mistura (KSS, 50% caolim, 25% silte e 25% areia), areia do rio Ham (HRS), HRS com 10% de caolim (HK), silte artificial (HPF4)	59
Figura 2-26 Variação da resistência da argila de Londres a 10,5m de profundidade.	60
Figura 2-27 Variação da resistência de areia densa em função do ângulo de tensão principal com a deposição.	60
Figura 2-28 Variação da resistência de areia cimentada artificialmente.	61
Figura 2-29 Resultados em <i>hollow cylinder</i> de doze tipos diferentes de solos em parâmetro M . a-Kumruzzaman e Yin (2010), b-Zdravkovic´ e Jardine (2000), c-Chu (2002) <i>apud</i> Liu <i>et al.</i> (2021), d-Yang <i>et al.</i> (2015); e-Brouse <i>et al.</i> (2017).	61
Figura 2-30 Resultados em <i>hollow cylinder</i> de seis solos diferentes de resistência não drenada. Kumruzzaman e Yin (2010). a-Kumruzzaman e Yin (2010), e-Brouse <i>et al.</i> (2017).	62
Figura 2-31 Variação do ângulo de atrito com diferentes relações de pré-carregamentos (R_c) e ângulos de pré-carregamentos (α_c).	62

Figura 2-32 Variação da resistência em função de densidade e formato de grão.	63
Figura 2-33 Variação da resistência conforme diferentes ângulos de aplicação de carga de areia-cinza volante.	64
Figura 2-34 Geometria de carregamento modelado.	65
Figura 2-35 Projeção de resistência última de fundação em sapata corrida.	65
Figura 2-36 Projeção de resistência última de fundação em sapata circular.	66
Figura 2-37 Comparação numérica de recalque de escavação com modelos isotrópicos e anisotrópicos.	67
Figura 2-38 Triaxial convencional	68
Figura 2-39 Triaxial cúbico de paredes rígidas.	69
Figura 2-40 Triaxial cúbico de paredes flexíveis. Vista isométrica (a) e vista em corte (b). ...	70
Figura 2-41 Triaxial de paredes mistas.	71
Figura 2-42 Critérios de escoamento de Mohr-Coulomb no plano tensão normal-cisalhante (esquerda) e octaédrico (direita).	73
Figura 2-43 Contorno de superfície William-Warnke no plano octaédrico.	75
Figura 2-44 Obtenção dos parâmetros m e η_1 a partir da areia do rio Sacramento.	76
Figura 2-45 Intersecção da superfície de ruptura no plano octaédrico segundo modelo de Lade.	77
Figura 3-1 Leitor de célula de carga.	78
Figura 3-2 Amplificador e conversor analógico digital HX 711.	79
Figura 3-3 Interior do leitor de célula de carga.	80
Figura 3-4 Exterior do sistema de aquisição.	81
Figura 3-5 Conversor analógico digital ADS 1115.	82

Figura 3-6 Interior do sistema de aquisição (a) superior, (b) inferior	83
Figura 3-7 Sistema de atuação (a) vista exterior, (b) vista interior.	85
Figura 3-8 Célula cúbica.....	86
Figura 3-9 Tampa de face rígida.	87
Figura 3-10 LVDT Lemaq LR 12-50	88
Figura 3-11 Tampa flexível.....	88
Figura 3-12 Transdutor de pressão Ashcroft.	88
Figura 3-13 Interface entre a parte pressurizada da cartola e parte despressurizada.....	89
Figura 3-14 Suporte LVDTs.....	89
Figura 3-15 Suporte com LVDTs (esquerda), tampa flexível (centro), conjunto montado (direita).	90
Figura 3-16 Válvula de precisão.....	91
Figura 3-17 Motor de passo.....	91
Figura 3-18 Engrenagem motor de passo (a), engrenagem da válvula (b) e suporte motor de passo (c).....	92
Figura 3-19 Sistema de controle de pressões.	93
Figura 3-20 Formas inferior (esquerda), forma superior (centro) e interface pronta (direita).	94
Figura 3-21 Moldagem <i>cushion</i>	95
Figura 3-22 Componentes triaxial cúbico.	96
Figura 3-23 Tampa para montagem de amostra.	97
Figura 3-24 LabVIEW painel frontal (esquerda) e diagrama de blocos (direita).....	98
Figura 3-25 Iniciador de comunicação.	101

Figura 3-26 Aquisição leitura.	102
Figura 3-27 Leitor e criador da calibração.	102
Figura 3-28 Micrômetro com LVDT.	103
Figura 3-29 Calibrador.	103
Figura 3-30 Controle motor básico.	104
Figura 3-31 Controle motor avançado.	105
Figura 3-32 Painel frontal com configuração básica.	106
Figura 3-33 Escolha modo de operação consolidação (esquerda) e cisalhamento (direita)...	106
Figura 3-34 Painel acompanhamento de pressões.	107
Figura 3-35 Display LVDTs.	108
Figura 3-36 Qx e qz.	109
Figura 3-37 Controle LVDTs.	109
Figura 3-38 Curva granulométrica areia de Osório.	110
Figura 3-39 Microscopia óptica areia de Osório. Escala de 500 μm (esquerda) 100 μm (direita).	111
Figura 3-40 Molde cúbico metálico.	115
Figura 3-41 Amostra de areia cimentada para triaxial cúbico.	115
Figura 3-42 Resultados de validação em areia de Osório	117
Figura 3-43 Resultado dos triaxiais de validação em areia de Osório cimentada.	118
Figura 3-44 Ensaios de BRS cimentado em triaxiais.	120
Figura 4-1 Molde para os cubos de 5cm de aresta. Da esquerda para a direita, paredes de contenção, base, extrusor/compactador e lâmina.	122

Figura 4-2 Corte do processo de moldagem e extrusão cubos de 5cm de aresta. A esquerda ao final da compactação e a direita processo inicial de extrusão.	122
Figura 4-3 Molde bipartido cilíndrico.	123
Figura 4-4 Amostras de compressão simples. Esquerda amostras antes da imersão com 6 dias de cura e direita saturadas com 7 dias de cura prontas para ruptura.	124
Figura 4-5 Amostra de compressão simples antes (esquerda) e depois da ruptura (centro e direita) com força aplicada paralelamente a compactação.	125
Figura 4-6 Amostra de compressão simples antes (esquerda) e depois da ruptura (centro e direita) com força aplicada perpendicularmente a compactação.	125
Figura 4-7 Resistência a compressão simples amostras cúbicas.	127
Figura 5-1 Tensão-deformação dimensional da amostra aOnc-0°. Compressão triaxial no eixo da compactação.....	130
Figura 5-2 Tensão desvio versus deformação planificada da amostra aOnc-0°.....	131
Figura 5-3 Comportamento volumétrico da amostra aOnc-0°.....	131
Figura 5-4 Comportamento sob invariantes da amostra aOnc-0°.....	132
Figura 5-5 Tensão-deformação dimensional da amostra aOnc-60°. Extensão triaxial no eixo paralelo a compactação.....	133
Figura 5-6 Tensão desvio versus deformação planificada amostra aOnc-60°.....	134
Figura 5-7 Comportamento volumétrico da amostra aOnc-60°.....	134
Figura 5-8 Comportamento sob invariantes da amostra aOnc-60°.	135
Figura 5-9 Roseta areia de Osório não cimentada.	136
Figura 5-10 Areia de Osório não cimentada em função das invariantes.	137
Figura 5-11 Comportamento relativo entre a areia de Osório com diferentes cimentações e $\rho = 0^\circ$	139

Figura 5-12 Obtenção dos parâmetros do modelo de Lade para a amostra aO1c7d.	142
Figura 5-13 Roseta amostras aOnc.	143
Figura 5-14 Resultados e modelos amostras aOnc.	144
Figura 5-15 Tensão desvio vs deformação cisalhante aOnc.	144
Figura 5-16 Variação da rigidez das amostras aOnc em função dos carregamentos.	145
Figura 5-17 Roseta amostras aO1c7d.	148
Figura 5-18 Resultados e modelos amostras aO1c7d.	148
Figura 5-19 Tensão desvio versus deformação cisalhante amostra aO1c7d.	149
Figura 5-20 Variação da rigidez das amostras aO1c7d em função dos carregamentos.	150
Figura 5-21 Roseta amostras aO2c3d.	151
Figura 5-22 Resultados e modelos amostras aO2c3d.	151
Figura 5-23 Tensão desviadora vs deformação cisalhante aO2c3d.	152
Figura 5-24 Variação da rigidez das amostras aO2c3d em função do carregamento.	152
Figura 5-25 Roseta amostra aO1c3d.	153
Figura 5-26 Resultados e modelos amostras aO1c3d.	153
Figura 5-27 Tensão desviadora vs deformação cisalhante aO1c3d.	154
Figura 5-28 Variação da rigidez das amostras aO1c3d em função do carregamento.	154
Figura 5-29 Resultados comparativos com todas as amostras.	155
Figura 5-30 Areia do Hudson cimentada.	156
Figura 5-31 Rigidez em função dos carregamentos de todos os materiais ensaiados.	157
Figura 7-1 Esquema elétrico aquisição.	170

Figura 7-2 Tensão deformação amostra aOnc-0°	209
Figura 7-3 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-0°	209
Figura 7-4 Comportamento volumétrico amostra aOnc-0°	210
Figura 7-5 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-0°	210
Figura 7-6 Tensão deformação amostra aOnc-30°	211
Figura 7-7 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-30°	211
Figura 7-8 Comportamento volumétrico amostra aOnc-30°	212
Figura 7-9 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-30°	212
Figura 7-10 Tensão deformação amostra aOnc-60°	213
Figura 7-11 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-60°	213
Figura 7-12 Comportamento volumétrico amostra aOnc-60°	214
Figura 7-13 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-60°	214
Figura 7-14 Tensão deformação amostra aOnc-90°	215
Figura 7-15 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-90°	215
Figura 7-16 Comportamento volumétrico amostra aOnc-90°	216
Figura 7-17 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-90°	216
Figura 7-18 Tensão deformação amostra aOnc-120°	217
Figura 7-19 Tensão desviadora versus tensão cisalhante amostra aOnc-120°	217
Figura 7-20 Comportamento volumétrico amostra aOnc-120°	218
Figura 7-21 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-120°	218
Figura 7-22 Tensão deformação amostra aOnc-150°	219

Figura 7-23 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-150°.....	219
Figura 7-24 Comportamento volumétrico amostra aOnc-150°	220
Figura 7-25 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-150°.....	220
Figura 7-26 Tensão deformação amostra aOnc-180°	221
Figura 7-27 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-180°.....	221
Figura 7-28 Comportamento volumétrico amostra aOnc-180°	222
Figura 7-29 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-180°.....	222
Figura 7-30 Tensão deformação amostra aO1c7d-0°	223
Figura 7-31 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-0°.....	223
Figura 7-32 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-0°	224
Figura 7-33 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-0°.....	224
Figura 7-34 Tensão deformação amostra aO1c7d-30°	225
Figura 7-35 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-30°.....	225
Figura 7-36 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-30°	226
Figura 7-37 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-30°.....	226
Figura 7-38 Tensão deformação amostra aO1c7d-60°	227
Figura 7-39 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-60°.....	227
Figura 7-40 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-60°	228
Figura 7-41 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-60°.....	228
Figura 7-42 Tensão deformação amostra aO1c7d-90°	229
Figura 7-43 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-90°.....	229

Figura 7-44 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-90°	230
Figura 7-45 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-90°.....	230
Figura 7-46 Tensão deformação amostra aO1c7d-120°	231
Figura 7-47 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-120°	231
Figura 7-48 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-120°	232
Figura 7-49 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-120°	232
Figura 7-50 Tensão deformação amostra aO1c7d-150°	233
Figura 7-51 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-150°.....	233
Figura 7-52 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-150°	234
Figura 7-53 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-150°.....	234
Figura 7-54 Tensão deformação amostra aO1c7d-180°	235
Figura 7-55 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-180°	235
Figura 7-56 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-180°	236
Figura 7-57 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-180°	236
Figura 7-58 Tensão deformação da amostra aO1c3d-0°.....	237
Figura 7-59 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-0°.....	237
Figura 7-60 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-0°	238
Figura 7-61 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-0°.....	238
Figura 7-62 Tensão deformação amostra aO1c3d-30°	239
Figura 7-63 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-30°	239
Figura 7-64 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-30°	240

Figura 7-65 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-30°	240
Figura 7-66 Tensão deformação amostra aO1c3d-60°	241
Figura 7-67 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-60°	241
Figura 7-68 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-60°	242
Figura 7-69 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-60°	242
Figura 7-70 Tensão deformação amostra aO1c3d-90°	243
Figura 7-71 deformação desviadora vs deformação cisalhante amostra aO1c3d-90°	243
Figura 7-72 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-90°	244
Figura 7-73 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-90°	244
Figura 7-74 Tensão deformação amostra aO1c3d-120°	245
Figura 7-75 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-120°	245
Figura 7-76 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-120°	246
Figura 7-77 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-120°	246
Figura 7-78 Tensão deformação amostra aO1c3d-150°	247
Figura 7-79 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-150°	247
Figura 7-80 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-150°	248
Figura 7-81 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-150°	248
Figura 7-82 Tensão deformação amostra aO1c3d-180°	249
Figura 7-83 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-180°	249
Figura 7-84 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-180°	250
Figura 7-85 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-180°	250

Figura 7-86 Tensão deformação amostra aO2c3d-0°	251
Figura 7-87 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-0°	251
Figura 7-88 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-0°	252
Figura 7-89 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-0°	252
Figura 7-90 Tensão deformação amostra aO2c3d-30°	253
Figura 7-91 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-30°	253
Figura 7-92 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-30°	254
Figura 7-93 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-30°	254
Figura 7-94 Tensão deformação amostra aO2c3d-60°	255
Figura 7-95 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-60°	255
Figura 7-96 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-60°	256
Figura 7-97 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-60°	256
Figura 7-98 Tensão deformação amostra aO2c3d-90°	257
Figura 7-99 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-90°	257
Figura 7-100 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-90°	258
Figura 7-101 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-90°	258
Figura 7-102 Tensão deformação amostra aO2c3d-120°	259
Figura 7-103 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-120°	259
Figura 7-104 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-120°	260
Figura 7-105 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-120°	260
Figura 7-106 Tensão deformação amostra aO2c3d-150°	261

Figura 7-107 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-150°.....	261
Figura 7-108 Comportamento volumétrica amostra aO2c3d-150°.....	262
Figura 7-109 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-150°.....	262
Figura 7-110 Tensão deformação amostra aO2c3d-180°	263
Figura 7-111 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-180°.....	263
Figura 7-112 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-180°	264
Figura 7-113 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-180°.....	264

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Equivalência de carregamentos	49
Tabela 2-2 Razões de anisotropia de diferentes materiais.....	54
Tabela 3-1 Propriedades físicas dos solos utilizados.....	112
Tabela 4-1 Desvios Padrões Relativos entre os processos de moldagem, extrusão e bipartido	126
Tabela 5-1 Nomenclatura das amostras do triaxial cúbico	138
Tabela 5-2 Resultados e modelos para amostra aOnc	143
Tabela 5-3 Resultados amostras aO1c7d.....	146
Tabela 5-4 Resultados e modelos para amostra aO2c3d	146
Tabela 5-5 Resultados e modelos para amostra aO1c3d	147

LISTA DE SÍMBOLOS

α_z	Relação entre resistência a tração e compressão simples
α_u	Relação entre a resistência biaxial e compressão simples
ε_a	Deformação axial
ε_v	Deformação volumétrica
$\varepsilon_q, \varepsilon_{cs}$	Deformação cisalhante
ε_{j2}	Segundo invariante do tensor de deformações
$\varepsilon_x, \varepsilon_y,$	Deformação nas direções perpendiculares a compactação
$\varepsilon_z,$	Deformação na direção paralela a compactação
ϕ'	Ângulo de atrito interno efetivo
Γ	Peso específico do solo
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_s	Peso específico real dos grãos
H	Porosidade
η_1	Parâmetro escalar do modelo de Lade
ρ	Ângulo de carregamento em relação ao eixo de compactação
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões normais principais maior, intermediária e menor
σ_z	Tensão normal paralela a compactação
σ_x, σ_y	Tensões normais perpendiculares a compactação
σ_{oct}	Tensão média

τ_{oct}	Tensão cisalhante no plano octaédrico
Θ	Ângulo de Lode
'	Relativo a tensões efetivas
c'	Intercepto coesivo efetivo
E	Índice de vazios
G_0 ou G	Módulo cisalhante inicial ou elástico
I_1	Primeiro invariante de tensões
I_3	Terceiro invariante de tensões
J_2	Segundo invariante das tensões desviadoras
f_{cb}	Resistência a compressão biaxial
f_{cu}	Resistência a compressão simples
f_t	Resistência a tração direta
f_{tcd}	Resistência a tração por compressão diametral
M	Parâmetro linear do modelo de Lade
p'	$(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, $(\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ ou $I_1/3$
p_a	Pressão atmosférica
Q	Tensão desviadora
q_x	Projeção no eixo perpendicular a compactação da tensão desviadora no plano octaédrico
q_z	Projeção no eixo paralelo a compactação da tensão desviadora no plano octaédrico

r_1, r_2 Raios característicos da semi-elipse do modelo William-Warkne

Z Parâmetro relativo a tensão média do modelo William-Warkne

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ADC	<i>Analogic-to-Digital Converter</i>
ADDR	<i>Pino Address</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials
CPV - ARI	Cimento Portland V – Alta Resistência Inicial
CV	Coefficiente de Variação
DP	Desvio Padrão
DPR	Desvio Padrão Relativo
EPS	Poliestireno Expandido
IP	Índice de Plasticidade
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LEGG	Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
NBR	Norma Brasileira
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
SCL	<i>Serial Clock</i>
SDA	<i>Serial Data</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Tendo em vista que o solo, na maioria das vezes, é o primeiro componente estrutural de quase toda obra de engenharia – servindo de base para todos os outros elementos estruturais – sendo que um entendimento limitado de seu comportamento pode levar a acidentes, gerando prejuízos financeiros e de vidas. Diante disso, a engenharia geotécnica é o primeiro anteparo para evitar que aconteçam tragédias, como as barragens de Brumadinho (BRUMADINHO, 2019), três gargantas (THREE, 1995) e escavações como do metrô em São Paulo (AGÊNCIA BRASIL, 2017).

Por conseguinte, um completo entendimento de seu comportamento é imprescindível para se obter modelos completos que levem em consideração todos os possíveis e diferentes tipos de solos, tanto naturalmente formados como artificialmente melhorados. Neste âmbito, pesquisas com solos cimentados têm diversos trabalhos que podem ser citados, tais quais: Núñez (1991), Consoli *et al.* (1998, 2001, 2003, 2006, 2007, 2007, 2009, 2010, 2012, 2012, 2014, 2017, 2020), Heineck (1998), Rotta (2000), Martins (2001), Prietto (2004), Cruz (2008), Dalla Rosa (2009), Marques (2014), Silvani (2017), Leon (2018) e Festugato *et al.* (2019). Como subsídio na elaboração de um modelo, é de fundamental importância observar em primeira mão as realidades obtidas a partir de aparatos que sustentam essa constatação para, posteriormente, serem compiladas para propor uma maneira de prever a realidade. Para isto, são desenvolvidos numerosos tipos de equipamentos a fim de observar o comportamento dos solos, visto que, muitos destes levam como princípio o comportamento do solo é isotrópico, como por exemplo o de triaxial convencional. Uma das maneiras de avaliar o comportamento anisotrópico dos solos é por meio de aparatos conhecidos como triaxiais verdadeiros ou triaxiais cúbicos, que apresentam uma infinita possibilidade de aplicar trajetórias de carregamentos. Esta capacidade não é adjetiva aos triaxiais convencionais, possuindo limitação de trajetórias de carregamento que, em um espaço cilíndrico, limita-se a trajetórias, a tensão intermediária é igual à tensão menor ou igual à tensão maior (REDDY, 1990). Tendo em vista que, aparatos de investigação geotécnica possuem em geral um grande custo financeiro, há a necessidade de pesquisar

alternativas menos onerosas e suficientemente precisas para o desenvolvimento deste tipo de equipamento.

Visto que, um dos casos em que há condições de tensões complexas que merecem um cuidado especial com a tensão intermediária é a escavação de túneis, observa-se uma grande diferença das tensões nas direções longitudinal, radial e tangencial. Inclusive, outro caso salientável é a influência de fundações adjacentes em maciços de solo, levando em consideração que bulbos de tensões podem entrar em contato e gerar situação complexa de tensão.

1.2 OBJETIVOS

Dos objetivos da presente pesquisa, são definidos previamente os objetivos gerais a serem atingidos e, na forma de objetivos específicos, elencam-se os tópicos essenciais para a concepção do trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Neste trabalho, deseja-se investigar o comportamento de uma areia cimentada sobre uma gama de diferentes tensões principais, médias e ângulos com eixo de compactação.

1.2.2 Objetivos específicos

Para obter êxito nos objetivos supracitados, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) realizar uma bateria de ensaios em prensa de compressão simples em amostras cúbicas para avaliar o comportamento trópico da areia e, para isso;
- b) desenvolver um leitor de células de carga para prensa de compressão simples;
- c) desenvolver um aparelho triaxial cúbico em conjunto com seus sistemas de aquisições, atuação por motores acoplados a válvulas manuais, *cushions*;
- d) investigar o comportamento trópico de areia com cimentação artificial em diferentes relações de tensão intermediária.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O atual trabalho está organizado em seis capítulos, sendo eles dispostos da seguinte maneira:

Capítulo 1: Apresenta a introdução desta produção, contendo a justificativa e relevância da pesquisa, os objetivos gerais detalhados pelos objetivos específicos e a exposição da estrutura da análise.

Capítulo 2: Abrange a revisão da literatura atual sobre os assuntos necessários para elaboração do estudo.

Capítulo 3: Evidencia os subsídios necessários para a base do desenvolvimento dessa pesquisa, tais quais: o desenvolvimento do hardware para alcançar os objetivos dispostos e sua avaliação.

Capítulo 4: Aborda a pesquisa realizada sobre a anisotropia de areia de Osório cimentada com CPV – ARI em cubos de 5cm de aresta, justamente com seus métodos e resultados.

Capítulo 5: Expressa os resultados relativos aos ensaios triaxiais cúbicos e convencionais e suas análises.

Capítulo 6: Apresenta a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 7: Resulta o apêndice para uma visualização minuciosa do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são evidenciadas noções acerca de comportamento de materiais cimentados, triaxiais cúbicos, bem como uma revisão sobre o comportamento multiaxial dos solos.

2.1 COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTRUTURADOS E CIMENTADOS

Solos estruturados são materiais que possuem comportamento que não pode ser descrito somente com os parâmetros básicos, como: índice de vazios, confinamento e histórico de tensões (BURLAND, 1990; LEROUEIL, VAUGHAN, 1990). Sendo assim, fazem-se necessários outros fatores para representar o comportamento completo do solo estruturado, tais quais: a cimentação entre partículas, arranjo espacial, intertravamento de grãos etc.

Devido aos solos cimentados possuírem um comportamento distinto dos solos tradicionais, é de extrema necessidade uma revisão sobre o assunto. Nesta sessão é descrito o comportamento e formação dos solos naturalmente e artificialmente cimentados. Em muitos casos, é difícil distinguir qual é a raiz do comportamento de certo solo, sendo a distinção de solo estruturado e cimentado muitas vezes subjetiva, criando, assim, vários nomes para um fenômeno; entre eles “solo estruturado”, “solo cimentado” ou “*bounded soil*”.

2.1.1 Solos naturalmente estruturados e cimentados

Dentre os solos encontrados naturalmente, há solos que possuem substâncias cimentantes entre os contatos intergranulares. A formação dos solos cimentados pode ter duas origens naturais; a primeira é devido a carreamento de sais que entram em contato com as partículas de solo adjacentes e criam de novos sólidos nestes pontos, surgindo interações físico-químicas entre os particulados, a segunda maneira de ser criado solo cimentado é pela decomposição da rocha mãe que, por conta do intemperismo, é progressivamente transformada em solo, sobrando, ainda, alguma cimentação entre as partículas, uma vez que a rocha mãe possuía um comportamento monolítico (CLOUGH et al, 1981; SOUZA PINTO, 2011).

A origem desta cimentação é variada, a qual pode ser decorrente de interações da sílica, decomposição de carbonatos, matéria orgânica em solução, recristalização devido ao intemperismo, tixotropia, alteração do nível de água, e até forças intermoleculares de argilas (LEROUEIL, VAUGHAN, 1990). Exemplos de pesquisas que se amparam em material estruturado e cimentado em solo residual podem ser vistos em Vargas (1953) e Vaughan (1985).

Nishimura *et al.* (2007) investigaram as diferentes resistências da London Clay sobre adensada em díspares inclinações de tensão principal, seus resultados demonstraram alterações nas resistências de até duas vezes, tendo a 45° a maior queda de resistência, enquanto para 90° diferença de até 40% menor, e ainda de até 20% maior, variando o valor do b utilizado. Já em Razeghi e Romani (2015), constatou-se que a resistência de areia com carregamentos isotrópicos e anisotrópicos com b constante e diferentes ângulos com a tensão principal, notou-se um decréscimo da resistência conforme o ângulo entre carregamento e a deposição aumenta.

Em Cai 2010, foram realizados ensaios em duas areias e foi possível notar também uma grande anisotropia que, para casos de areia densa, chega-se a diminuir sua resistência pela metade quando a tensão principal fica a 75° da compactação. Igualmente, fora reportado que quando a densidade relativa é menor a anisotropia diminui para uma ordem de 50%.

Uma simulação numérica pode ser vista em Li e Yu (2009), a qual é encontrada uma variação na resistência da ordem de até 20% dependendo da inclinação da tensão principal com o eixo de compactação e, ainda, sugere uma deformação que tende para o ângulo com a menor resistência em relação a 75° do eixo de compactação.

2.1.2 Solos artificialmente cimentados e estruturados

Estudos sobre solos artificialmente cimentados podem ser vistos em diversas publicações, como por exemplo: Consoli *et al.* (2001), Consoli *et al.* (2007), Consoli *et al.* (2009), Consoli *et al.* (2010), Consoli *et al.* (2012), Marques *et al.* (2014) utilizando diversos tipos de solos matrizes, bem como, diversos reforços cimentantes; dentre eles: cimento, cinzas e cales. Este processo de cimentar artificialmente um solo também é conhecido como estabilização ou melhoramento, uma descrição mais fundamental sobre o assunto pode ser vista em Rotta (2000), Núñez (1991) e Martins (2001).

Além disso, esta abordagem geotécnica permite melhorar o solo em casos como base para fundações rasas, melhoramento de camadas profundas via *grouting*, base de rodovias, barragens de terra e prevenir liquefação (INGLES & METCALF, 1972; DUPAS & PECKER, 1979; PORBAHA *et al.*, 1998; THOMÉ *et al.*, 2005; CONSOLI *et al.*, 2003, 2007, 2008, 2009, 2012, 2017; MOREIRA, 2020).

Conforme Ingles e Metcalf (1972), a quantidade de cimento, mesmo em pequenas quantidades como 2% modificará as propriedades do solo, enquanto teores como 5 até 10%, transformará o comportamento similar a concretos.

Dentre os conceitos fundamentais descritos na literatura, correlacionou-se que avaliar o valor da porosidade dividido com fração volumétrica de cimento (η/C_{iv}) leva a resultados interessantes. Este adimensional é correlacionado com várias propriedades de areias cimentadas, como tensão de ruptura sob compressão simples (CONSOLI *et al* 2007), tração na compressão diametral (CONSOLI *et al* 2010), tração na flexão (CONSOLI *et al* 2020) e módulo de rigidez transversal (CONSOLI *et al* 2012).

Outrossim, em uma análise do comportamento de solos estruturados, rochas fracas, solo residual e artificialmente cimentado sob compressão isotrópica e ensaio triaxiais convencionais podem ser vistos em Leroueil (1990). No estudo de solos estruturados, Bressani & Vaughan (1989) descrevem os detalhes que, inegavelmente, fundamentam pesquisas do gênero, uma vez que, pequenos carregamentos podem comprometer o comportamento das amostras. Bressani (1990) também apresenta uma série de ensaios triaxiais de solos artificialmente cimentados.

2.1.3 Materiais

Ao considerar os materiais fundamentais de um solo artificialmente cimentado, deve-se considerar seus três componentes, solo, cimento e água. A combinação e quantidade de cada componente influenciam de maneira rigorosa no comportamento deste compósito.

2.1.3.1 Cimento

Ingles e Mecalf (1972) descrevem que o cimento Portland é o material cimentante mais utilizado em misturas com solo. Por outro lado, os autores descrevem que é importante

quantificar o teor de cimentação, uma vez que, influencia a quantidade de calor gerado durante a hidratação, bem como, definir o ganho de resistência e controlar a retração. Consoli *et al.* (2013) verificaram que também o tipo de cimento utilizado e o tempo de cura influenciará na resistência de areia de Osório cimentada.

2.1.3.2 Solo

Em relação aos diferentes tipos de solos, Ingles e Metcalf (1972) definem que qualquer solo – exceto solos com grande composição de material orgânico – pode ser tratado para obter um melhoramento em suas propriedades mecânicas. Similarmente, é descrito que solos arenosos são mais facilmente manipulados, visto que tem sua mistura facilitada quando comparado com solos que possuem maiores teores de finos, além de apresentarem maiores respostas mecânicas. Ademais, Croft (1967) descreve que a composição química e mineralógica determinará também o grau de sucesso da melhora das propriedades mecânicas do compósito.

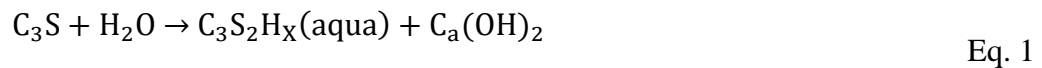
2.1.4 Fisioquímica da cimentação

Tratando-se de fisioquímica da cimentação, é passível de identificação dois tipos de cimentação: a natural, que tem origem fundamental em carbonatos e óxidos feito majoritariamente em uma grande passagem de tempo; e os artificiais engenheirados, os quais permitem ganhos de resistência em curto e médio prazo (CLOUTH *et al.*, 1981). Sobretudo, este estudo tem foco específico em cimentação feita por cimento Portland.

De acordo com Herzog e Mitchell (1963), é definido que na feitura da cimentação em uma argila há distinção dos materiais advindos da dela em duas categorias, os feitos diretamente pela hidratação do cimento Portland e os feitos pela iteração entre o cálcio do cimento e silicato e/ou aluminatos presentes no solo. Os mesmos pesquisadores defendem que solos com sólidos amorfos apresentam melhor performance quando comparados com materiais cristalinos regulares, dado que as extremidades amorfas são mais fáceis de serem atacadas para que então se recombinem com auxílio do cálcio proveniente do cimento.

Por outro lado, Moh (1965) simplifica a interação química resultante de solos estabilizados com cimento Portland na Eq. 1, Eq. 2, Eq. 3 e Eq. 4 cujo C_3S é Silicato tricálcico, CSH silicatos de cálcio hidratados, $C_3S_2H_x$ disilicato tricálcico hidratado, CSH silicatos de cálcio hidratados e

CAH aluminatos de cálcio hidratados, sendo os dois últimos os principais contribuintes para o ganho de resistência do compósito.



Conseqüentemente, na fisioquímica esses processos podem levar até anos para serem completos, o que permite ganhos de resistências com o passar do tempo (ASHBY e JONES, 1980). Uma observação direta do incremento das propriedades mecânicas de areia cimentadas pode ser analisada no trabalho de Chang e Woods (1992), com estes estudos podemos observar que é medido o módulo cisalhante de várias areias em pequenas deformações com diferentes cimentações, porém o mesmo confinamento e índice de vazios na Figura 2-1.

Neste mesmo artigo, Chang e Woods (1992) descrevem diferentes estágios e zonas de cimentação, as quais haveriam três fases de distribuição de cimento nos grãos:

Estágio I: Cimento cobre parcialmente a superfície das partículas de solo com uma ligação inicial (Grau de cimentação <20-25%, correspondente a zona I na Figura 2-1).

Estágio II: Cimentação das partículas de solo é bastante significativa na região de contatos entre as partículas. (20-25% < Grau de cimentação < 60-80%, correspondente a zona II na Figura 2-1).

Estágio III: Cimento cobre a maioria dos vazios entre as partículas de solo, o desenvolvimento das ligações químicas é finalizado e cimento adicional servirá principalmente como preenchimento. (Grau de cimentação >80-90%, correspondente a zona III na Figura 2-1).

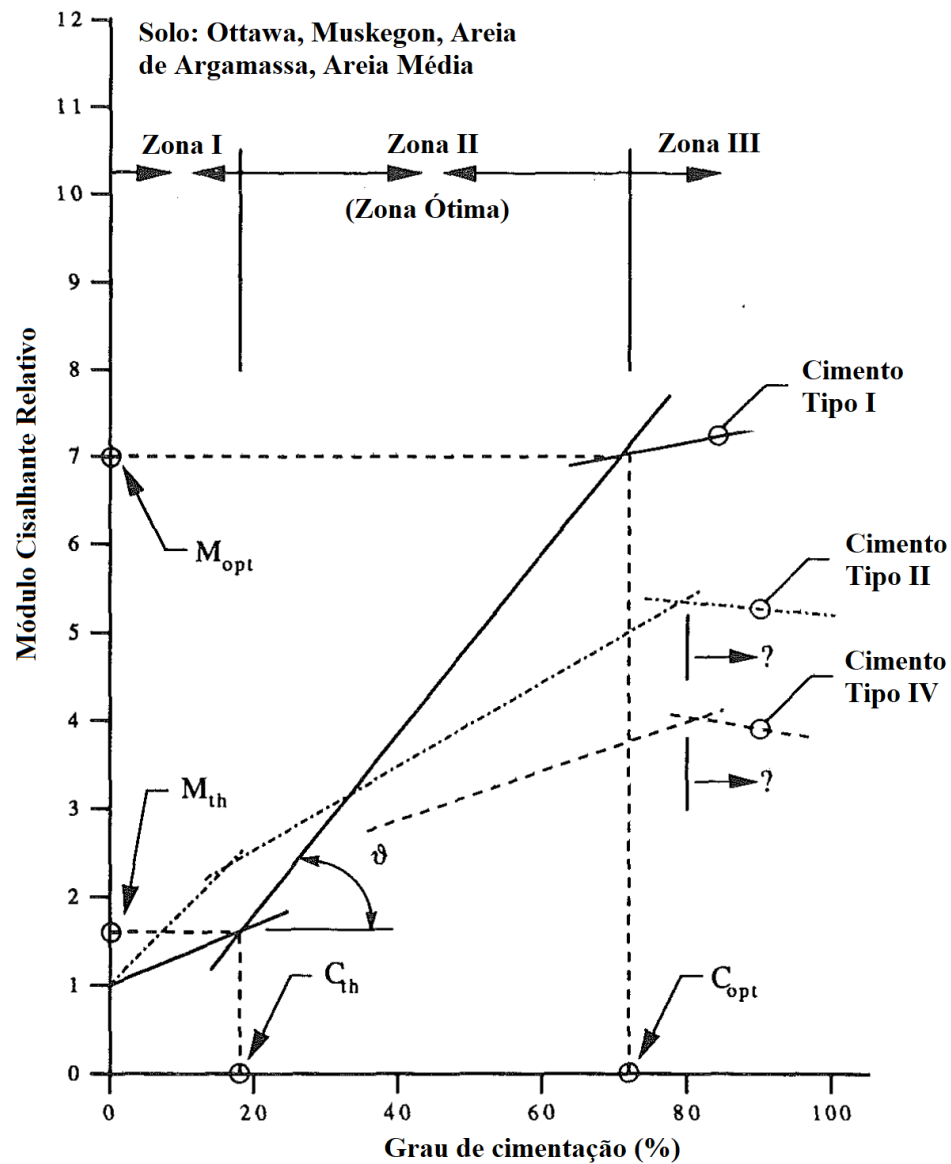


Figura 2-1 Módulo cisalhante relativo de areias com diferentes graus de cimentações

Adaptado de Chang e Woods (1992)

Salienta-se ainda que no trabalho de Chang e Woods (1992) são feitas fotografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) que podem ser vistas na Figura 2-2.

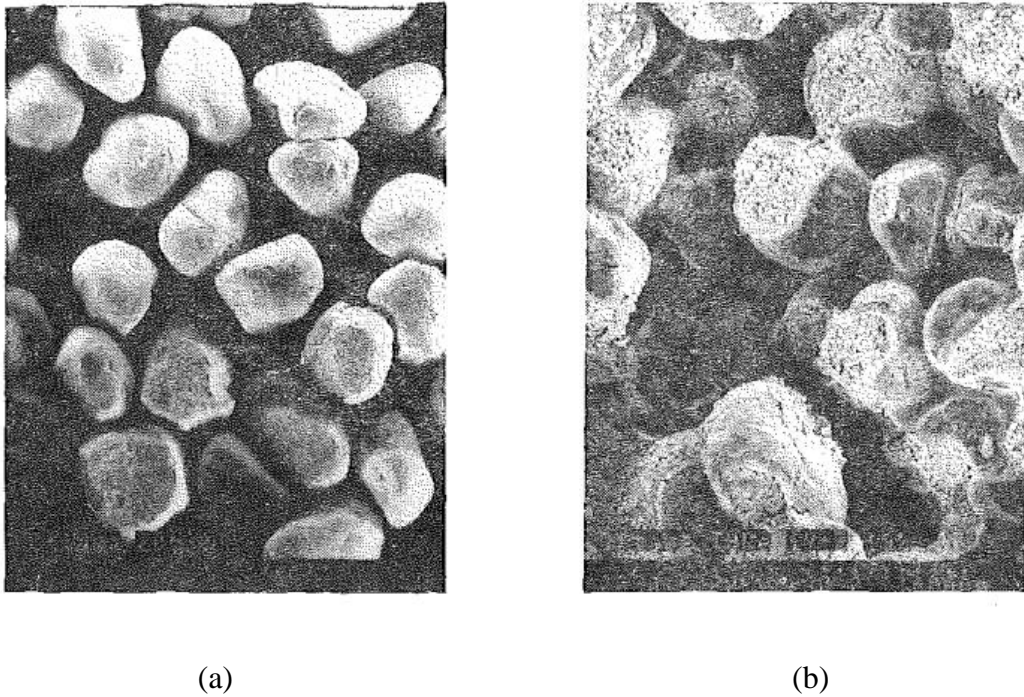


Figura 2-2 Microestrutura de areia de Ottawa com cimento tipo SS50 à baixa cimentação. (a) Grau de cimentação = 0% e (b) 19 %

Adaptado de Chang e Woods (1992)

Em Ismail (2002), é utilizado cimento Portland em areia calcárea marinha e o mesmo padrão de cimentação emerge, como pode ser visto na Figura 2-3.

Importante salientar que neste trabalho somente é explorado o estágio I de cimentação, utilizando a definição de Chang e Woods (1992).

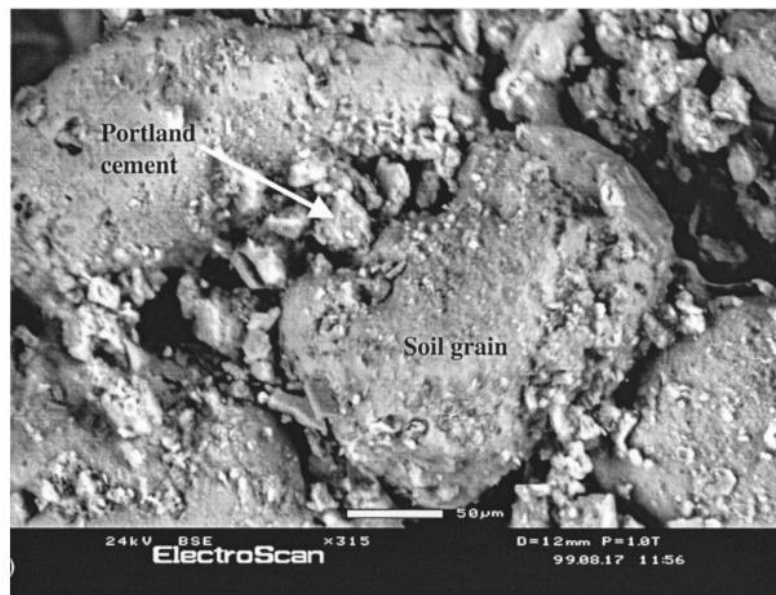


Figura 2-3 MEV de areia calcária com 8% de cimento Portland

Ismail et al (2002)

2.1.5 Comportamento mecânico de solos cimentados e estruturados

A distinção de solos cimentados e estruturados se dá pela divergência de comportamento caso sejam amolgados, tendo propriedades díspares entre material amolgado e não amolgado. Em Leroueil e Vaughan (1990), evidencia-se que a diferença entre amostras esculpidas se dá por meio de um bloco, bem como, tiradas diretamente de tubos com diâmetros crescentes.

Acrescenta-se ainda que, além dos parâmetros comuns de importância para qualquer solo como índice de vazios, a tensão de confinamento, a distribuição granulométrica, Clouth *et al.* (1981) incluem a quantidade de agente cimentante e o arranjo estrutural dos grãos. Igualmente, é salientável a importância do histórico de tensão e deformação, história geológica, e orientação das tensões principais (GENS & NOVA, 1993). Bressani (1990) salienta a importância da composição mineralógica, enquanto O'Rourke e Crespo (1988) destacam o grau de saturação, e Consoli *et al.* (2007) abordam o tempo e temperatura de cura. As maneiras mais comuns de avaliar o grau de melhoria das propriedades mecânicas em solos cimentados incluem, mas não são limitadas a testes de resistência à compressão simples, resistência sob ciclos de

congelamento/descongelamento e molhagem/secagem (INGLES e METCALF, 1972). Será aprofundada a influência de alguns destes parâmetros avaliando o teste de compressão simples, dado que, ele é o de mais fácil aplicação e será executado neste trabalho.

2.1.5.1 Teor de cimento

Em termos gerais, as propriedades mecânicas do solo cimentado são aumentadas conforme o teor de cimento no compósito é elevado, mas com graus de efetividade distintos dependendo do tipo de solo aplicado (INGLES e METCALF, 1972). Clough *et al* (1981) demonstraram que menores deformações e maiores picos de resistência são observados de acordo com o aumento do teor de cimento, além do maior módulo cisalhante descrito no trabalho de Chang (1992) para diferentes tensões confinantes.

Destaca-se, também, o incremento de resistência que pode ser observado em ensaios de compressão simples para diferentes solos – item identificado na Figura 2-4 para solos gerais (INGLES e METCALF, 1972), para a areia de Osório cimentada e areia graduada de Porto, ilustração na Figura 2-5.

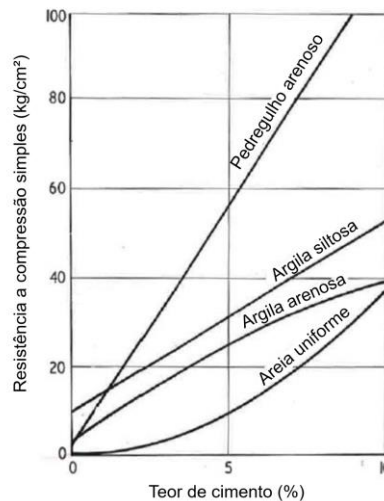


Figura 2-4 Teor de cimento vs resistência à compressão simples para diferentes solos.

Adaptado de Ingles e Metcalf (1972)

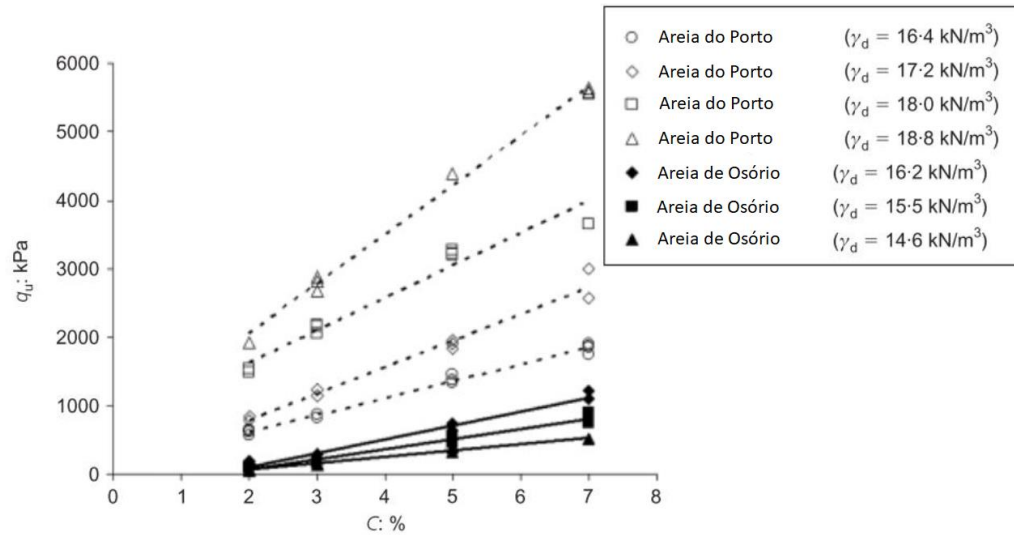


Figura 2-5 Resistência à compressão simples de areia uniforme de Osório e areia siltosa bem graduada do Porto.

Adaptado de Consoli *et al.* (2012)

2.1.5.2 Porosidade

Tratando-se de Porosidade, pode-se observar que tanto nos solos não reforçados quanto nos solos cimentados há a apresentação de resistência sendo governada pelo teor de vazios em seus maciços. Para endossar estes dados, cita-se Ingles e Metcalf (1972) que testaram amostras de solo cimentado em compressão simples com diferentes massas específicas e encontraram uma correlação logarítmica entre elas. Clough *et al.* (1981) fizeram ensaios com mesmo teor cimentício e diferentes densidades relativas em triaxiais convencionais e encontraram correlação linear entre densidade com ângulo de atrito e com o intercepto coesivo, como pode ser visto na Figura 2-6.

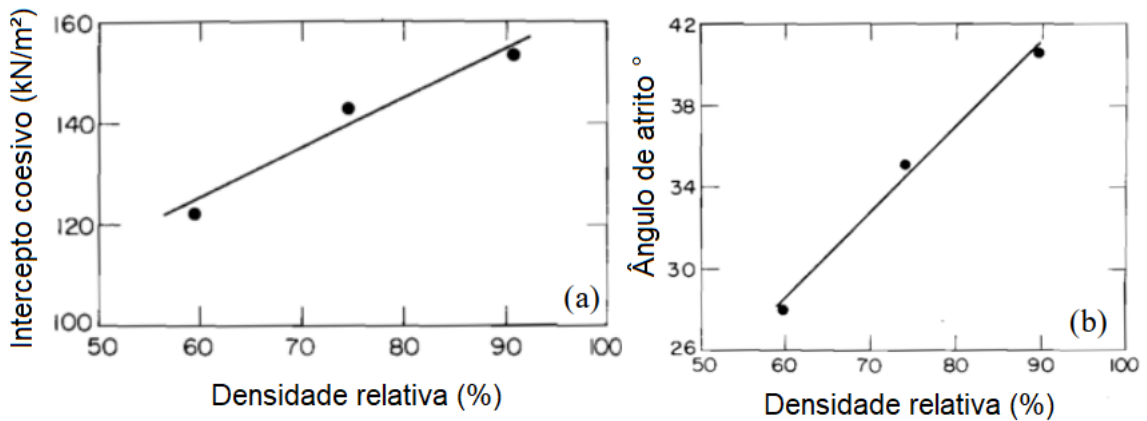


Figura 2-6 Parâmetros de resistência em função da densidade relativa (a) e ângulo de atrito (b).

Adaptado de Clough *et al.* (1981)

Ademais, vários trabalhos mais recentes também encontraram relações logarítmicas correlacionando a porosidade e a resistência à compressão simples como em Ismail *et al.* (2002) e Consoli *et al.* (2006, 2007, 2012, 2013, 2016, 2017), que podem ser observadas na Figura 2-7.

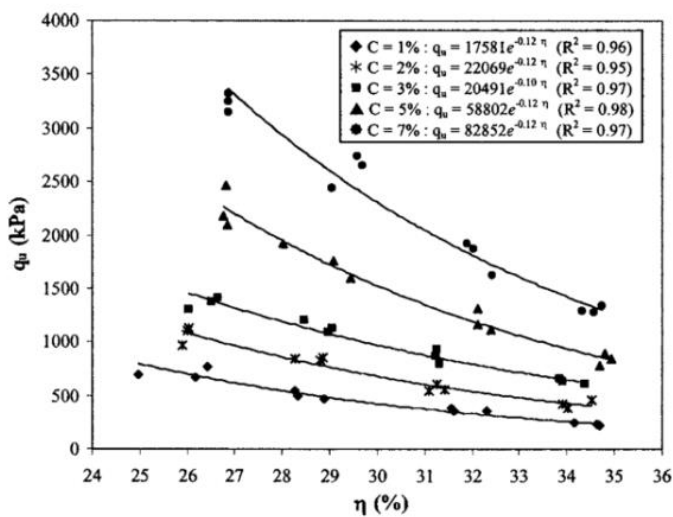


Figura 2-7 Porosidade e resistência à compressão simples com diferentes cimentações.

Consoli *et al.* (2007)

2.1.5.3 Tempo de cura

Em seu trabalho, Ingles e Metcalf (1972) demonstraram a influência do tempo de cura em amostras com 5% de teor cimentício em ensaios de compressão simples. O efeito observado fora de uma elevação na resistência conforme estendia o tempo de cura das amostras, conforme ilustra a Figura 2-8.

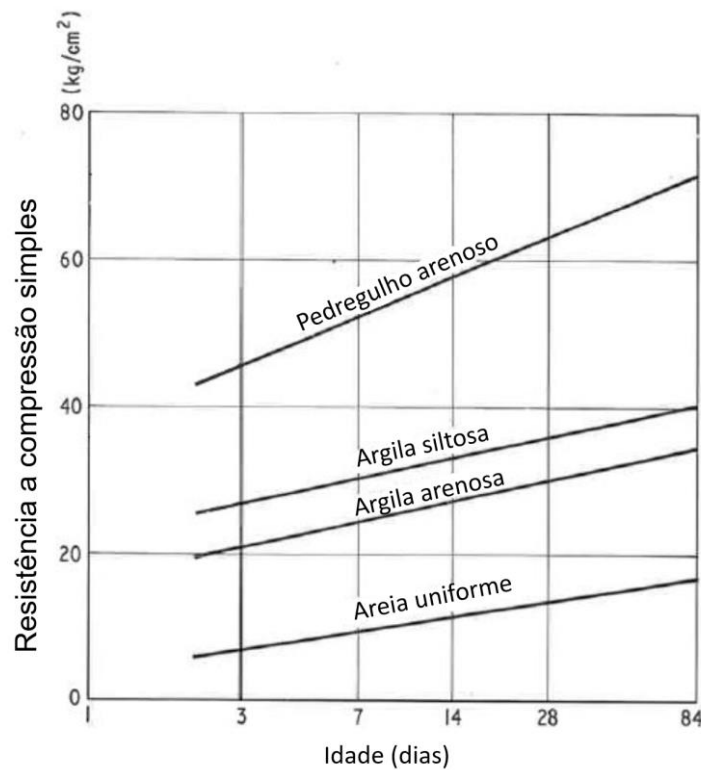


Figura 2-8 Resistência à compressão simples conforme idade de solo cimentado.

Adaptado de Ingles e Metcalf (1972)

Resultados similares também foram obtidos por Consoli *et al.* (2011) para diferentes teores de cimentação e porosidades que podem ser observados na Figura 2-9.

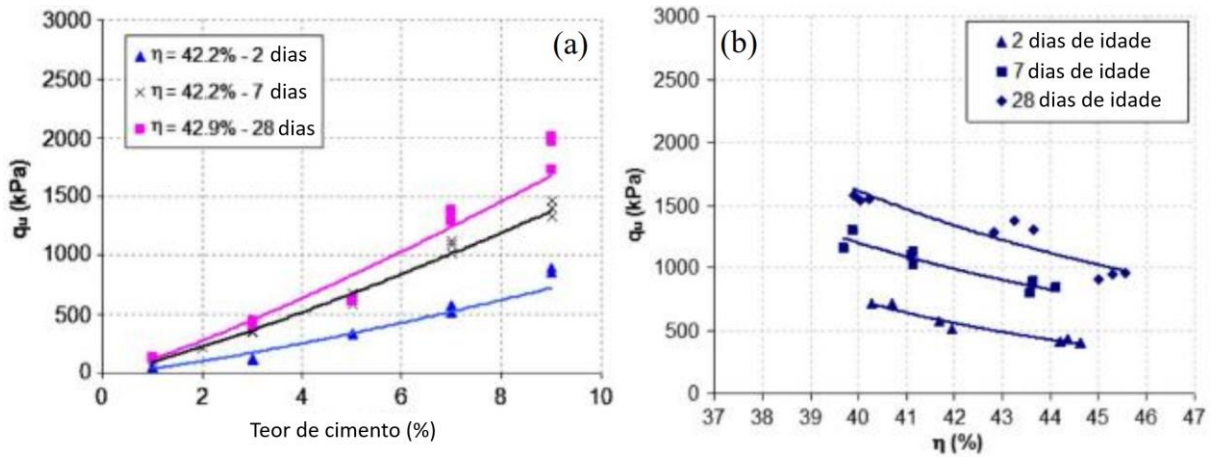


Figura 2-9 Influência da idade de solo na resistência à compressão simples de solos reforçados com diferentes teores de cimento (a) e porosidades (b).

Adaptado de Consoli *et al.* (2011)

2.1.5.4 Temperatura

Como qualquer fenômeno químico, as reações cimentícias também estão sujeitas a efeitos de temperatura. No trabalho descrito por Clare e Pollard (1954), permite-se encontrar uma correlação positiva entre temperatura de cura e a resistência à compressão simples para diferentes solos cimentados em temperaturas entre 0 e 90°C com 7 dias de cura. Para melhor ilustrar os resultados de Clare e Pollard (1954), cita-se a Figura 2-10. O mesmo fenômeno se repete nas pesquisas de Silvani (2017), que permite observar que para solo reforçado com cal em diferentes magnitudes. Mediante do exposto, as ideias de Ingles e Metcalf (1972) vêm corroborar que ao replicaram a metodologia para uma argila, mas com temperaturas de até 62°C, é possível encontrar uma correlação positiva para tanto reforço com cimento Portland quanto com cal, ilustrado na Figura 2-11.

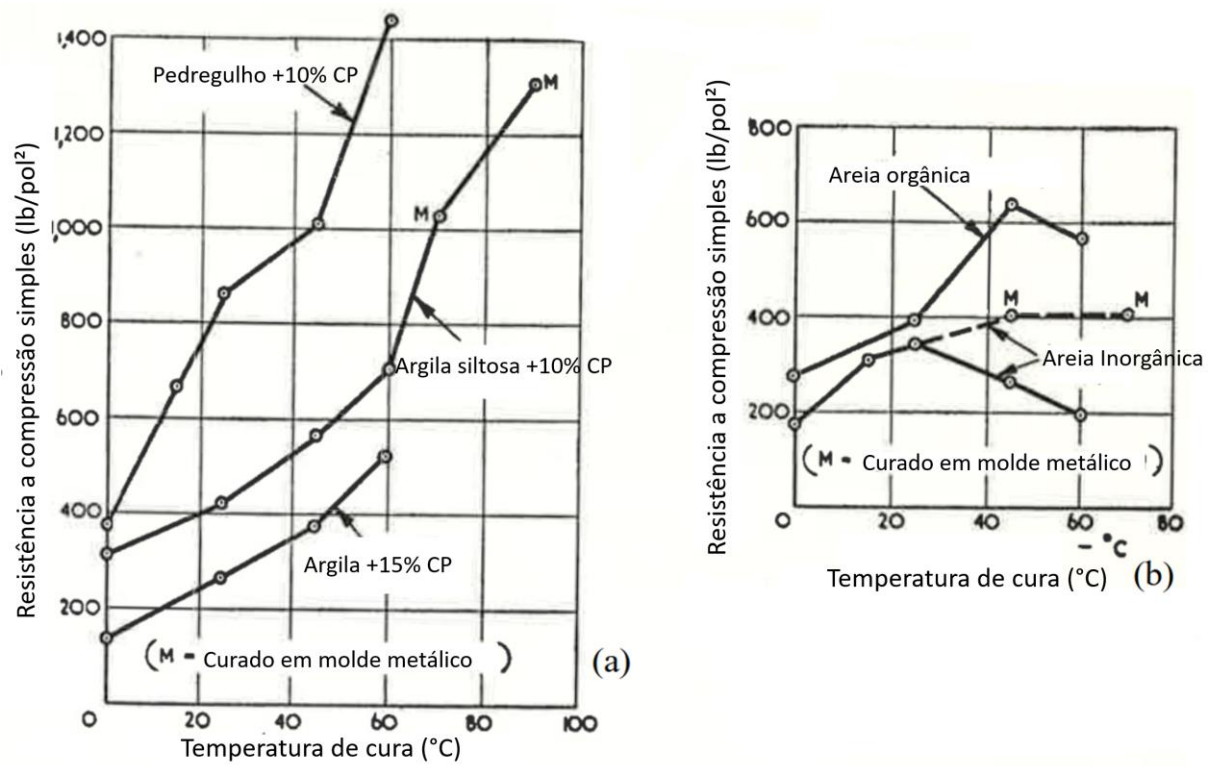
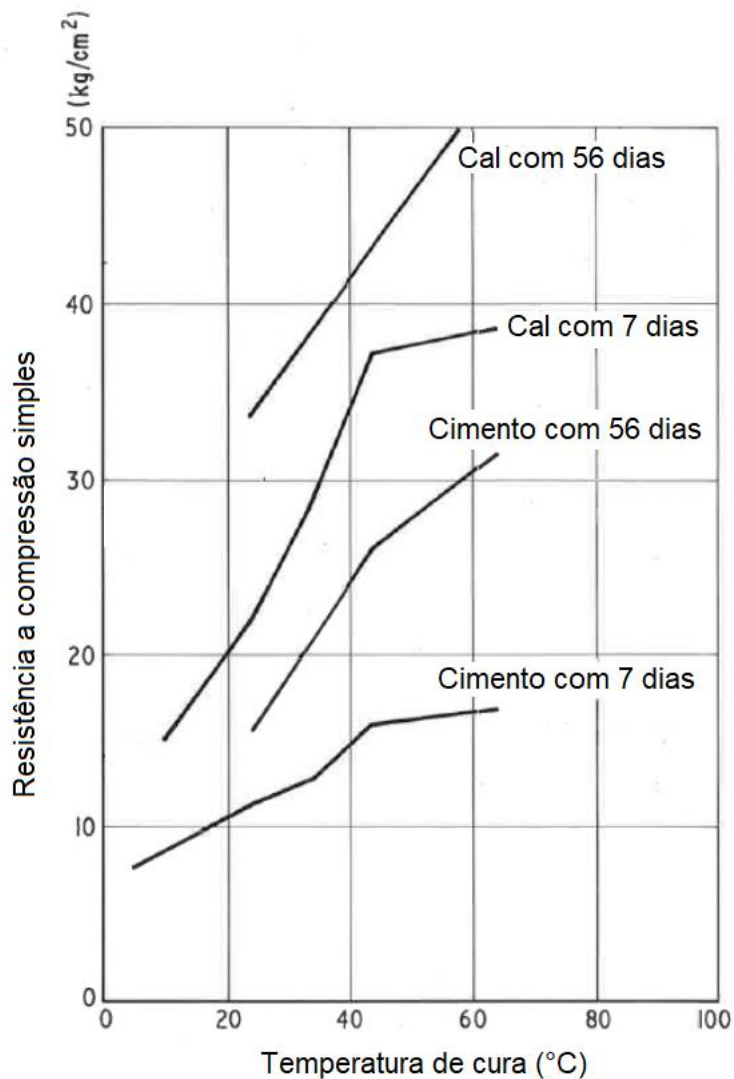


Figura 2-10 Influência da temperatura de cura na resistência à compressão simples de solos cimentados. Argilas, pedregulho (a) e areia orgânica e inorgânica (b).

Adaptado de Clare e Pollard (1954)



2

Figura 2-11 Efeitos de temperatura de cura de argila na resistência de compressão simples.

Adaptado de Ingles e Metcalf (1972)

O comportamento mecânico de solos pode ser descrito em função aos parâmetros governantes da resistência cisalhante, coesão, dilatância e atrito (SAXENA e LASTRICO, 1978). Porquanto, Lambe e Whitman (1969) descrevem que a deformação de um solo maciço é controlada principalmente pelas interações individuais das partículas, especialmente o deslizamento. Neste quesito, é pertinente realçar a influência da cimentação artificial, uma vez que, ela cria uma coesão ou amplifica a coesão entre grãos, visto que há pequenas deformações

responsáveis predominantemente pelo comportamento do solo reforçado, enquanto há grandes deformações o comportamento é predominante pelo atrito.

Conforme Coop e Atkinson (1993), o comportamento de solo identificou em suas pesquisas que os cimentados podem ter um comportamento dúctil ou frágil, a depender do teor de cimentação e tensão confinante. Neste âmbito, a Figura 2-12 demonstra como o mesmo solo em diferentes confinantes terá comportamentos distintos, cujas baixas tensões confinantes (trajetória 1) são esperadas em um comportamento frágil, enquanto há tensões maiores, espera-se comportamento dúctil (trajetória 3), respectivamente devido ao comportamento advindo da cimentação e do atrito predominantemente.

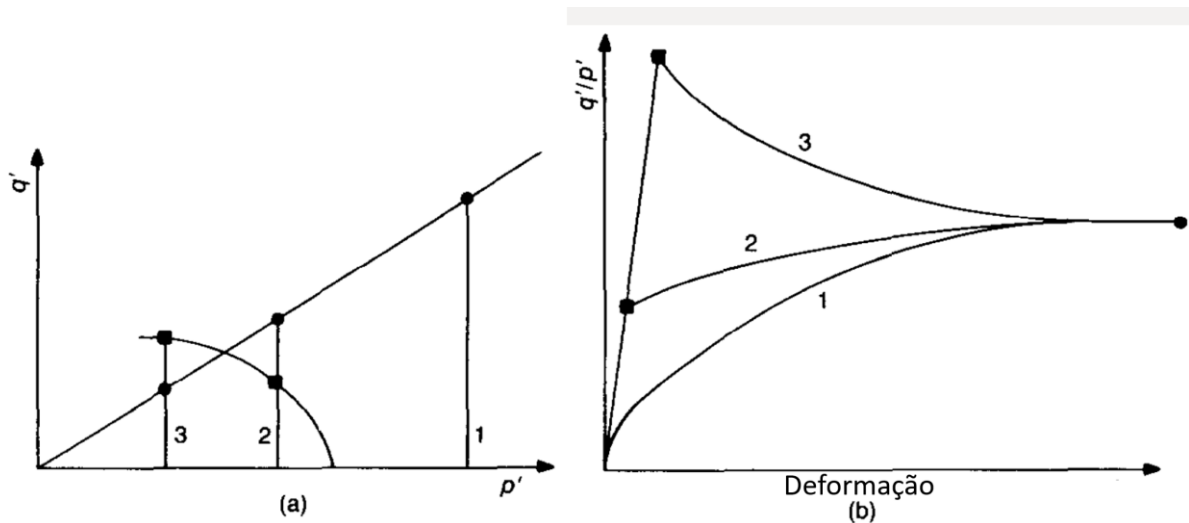


Figura 2-12 Resposta tensão média e desviadora (a) e desviadora normalizada versus deformação (b) de solo cimentado.

Adaptado de Coop e Atkinson (1993)

Em ensaios de triaxiais que possuem deformação controlada, a tendência esperada é que o material progrida até atingir a Linha do Estado Crítico – momento em que a taxa de incremento na tensão média efetiva e a tensão desviadora efetiva se estabilizam independente do incremento de deformação. Importante ressaltar que o foco deste trabalho não almeja atingir este estado, pois os ensaios triaxiais terão tensão controlada, enquanto ensaios de compressão simples não terão. Um exemplo de comportamento de solo estruturado natural se evidencia na

Figura 2-13, assim também é observado que até atingir a tensão de escoamento, menos de 1% de deformação axial fora reportada.

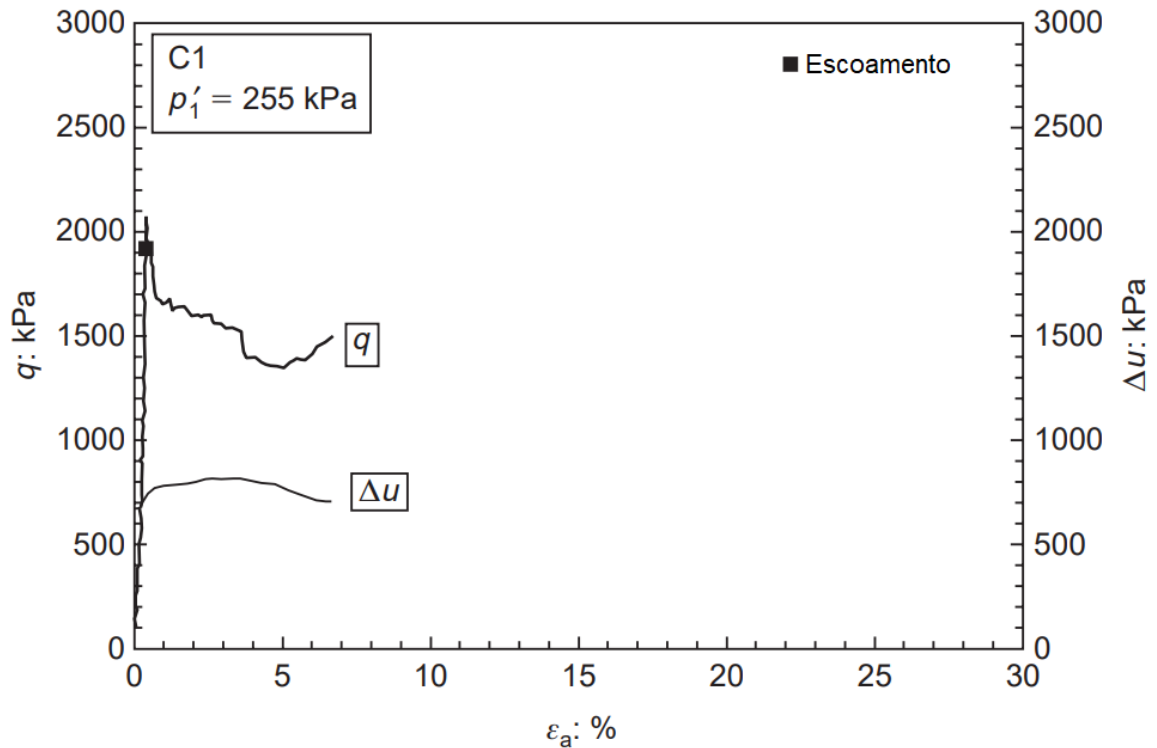


Figura 2-13 Deformação axial versus tensão desviadora de calcarenito.

Adaptado de Cuccovillo e Coop (1990)

2.2 CARREGAMENTO MULTIAXIAL

Em virtude da complexidade de interpretar resultados em espaços com três dimensões, é passível de identificar várias maneiras de planificar o espaço. Uma das maneiras mais utilizadas para tratar casos multiaxiais é de se trabalhar no plano octaédrico, que consiste em um plano ortogonal ao eixo com vetor unitário $\sqrt{3}/3, \sqrt{3}/3, \sqrt{3}/3$. O termo plano octaédrico deriva de ser o plano de uma das faces de um octaedro isométrico, quando ele possui as arestas coincidentes com os eixos cartesianos, referenciado na Figura 2-14. Sendo σ_{oct} a média das

outras três tensões normais, ou seja, um terço do primeiro invariante de tensões (I_1) (SALENÇON, 2001).

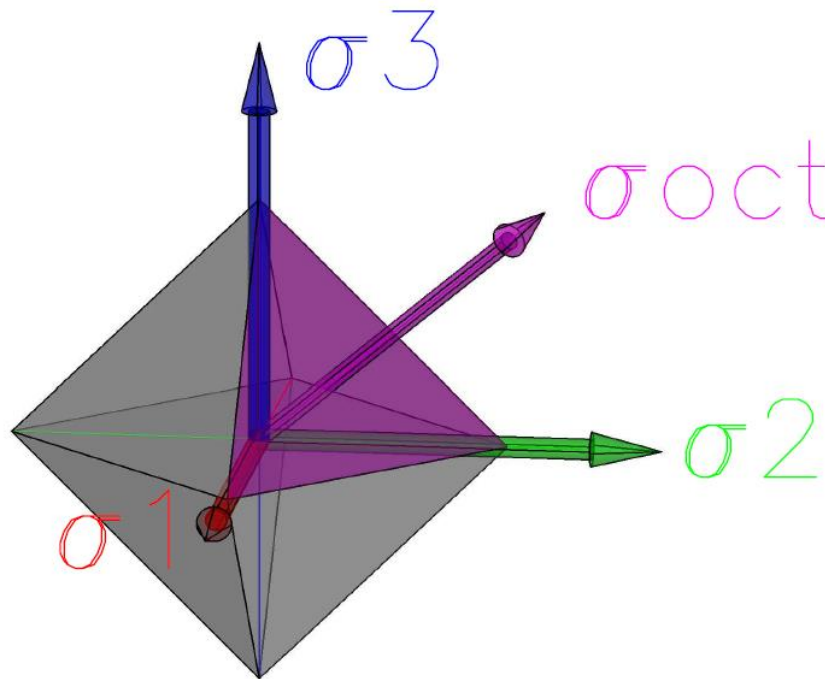


Figura 2-14 Plano Octaédrico das Tensões.

Para avaliar o montante total de cisalhamento que um material está sujeito, é conveniente tratar de seu montante também no plano octaédrico. Este montante é conhecido por τ_{oct} que pode ser tomado pelo valor médio das tensões cisalhantes vetoriais exemplificados na Eq. 5 e Eq. 6

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3} J_2} \quad \text{Eq. 6}$$

Para melhor esclarecer esse argumento, ao observar que onde apresenta σ_1 é a tensão principal maior, σ_2 se refere à tensão principal intermediária e σ_3 tensão principal menor. E J_2 é o segundo invariante do tensor desviador das tensões que pode ser tomado na Eq. 7

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_2 - \sigma_3) + (\sigma_3 - \sigma_1)]$$

Eq. 7

Por outro lado, quando utilizadas as duas tensões octaédricas normal e cisalhante, mostra-se uma maneira simples de tratar o tensor de tensões e suas seis variáveis independentes.

Tendo em vista que, ao seguir qualquer progressão de tensão normal em um triaxial cúbico, convém manter o primeiro invariante de tensões constante e progredir dentro do plano octaédrico em diferentes trajetórias. Desta maneira, é conveniente trabalhar em um sistema de coordenadas cilíndricas, sendo que, a coordenada z é a tensão confinante, e θ a direção da trajetória e o raio compreende a distância deste ponto no plano desviador até a origem (cisalhamento nulo). Este ângulo foi batizado em homenagem ao cientista Walter Lode, sendo conhecido então por ângulo de Lode (θ), a direção do carregamento em relação ao eixo que intercepta σ_3 (DALAS e CASAÑEDA, 2012).

Este sistema de coordenadas é conveniente nos casos em que se trabalha com materiais isotrópicos, todavia, gera empecilhos quando utilizado em materiais anisotrópicos. Ao passo que o ângulo de Lode é medido em relação ao eixo de menor tensão σ_3 e a trajetória de tensão, não sendo possível visualizar a tensão em casos que há diferenças trópicas no material, além da limitação inerente da variável de até 60° para cossenos positivos.

Sendo assim, pode-se constatar que para materiais que apresentam algum tipo de anisotropia, torna-se mais conveniente trabalhar em relação a algum eixo significativo em relação a sua geometria. Nesta instância, é utilizado como referência o eixo de compactação, seguindo a mesma definição utilizada em Yamada e Ishihara (1983), porquanto trocar-se-á o nome da variável que representa este ângulo para não confundir com o ângulo de Lode, neste trabalho o ângulo entre a direção do carregamento e ao eixo onde a tensão aplicada é paralela à compactação, sendo aqui nominado por ρ . Na Figura 2-15 é ilustrado este ângulo, seu valor respectivo pode ser calculado pela Eq. 8.

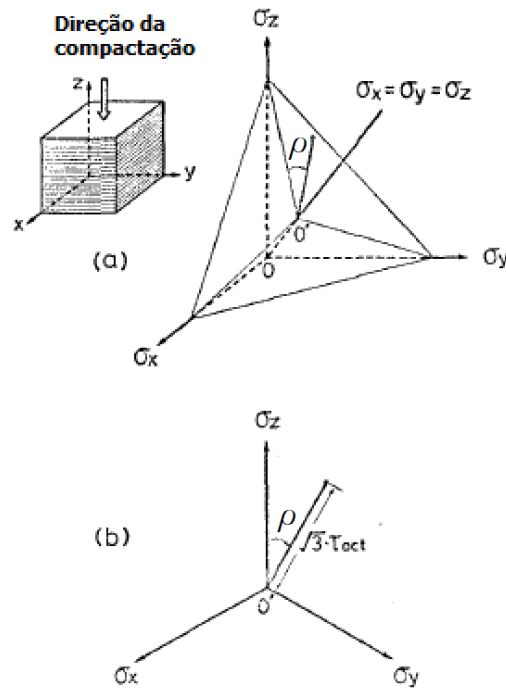


Figura 2-15 Direção dos carregamentos, projeção isométrica (a) e plano octaédrico (b).

Adaptado de Yamada e Ishihara (1983)

$$\tan \rho = \frac{\sqrt{3}(\sigma_y - \sigma_x)}{2\sigma_z - \sigma_y - \sigma_x} \quad \text{Eq. 8}$$

Sobretudo, outra maneira de se avaliar a progressão de tensões é pelo parâmetro b que tem seu equacionamento visto nas Eq. 9 que Lade define em suas pesquisas como sendo o primeiro quadrante, Eq. 10 como segundo e Eq. 11 como terceiro. Este parâmetro é prático para distinguir os carregamentos a partir do eixo de simetria do material (eixo de compactação ou deposição). Em cada um destes quadrantes os valores do ângulo de Lode variam entre 0 e 60°, e têm uma praticidade na aplicação (ABELEV e LADE, 2003), sendo representados na Figura 2-16.

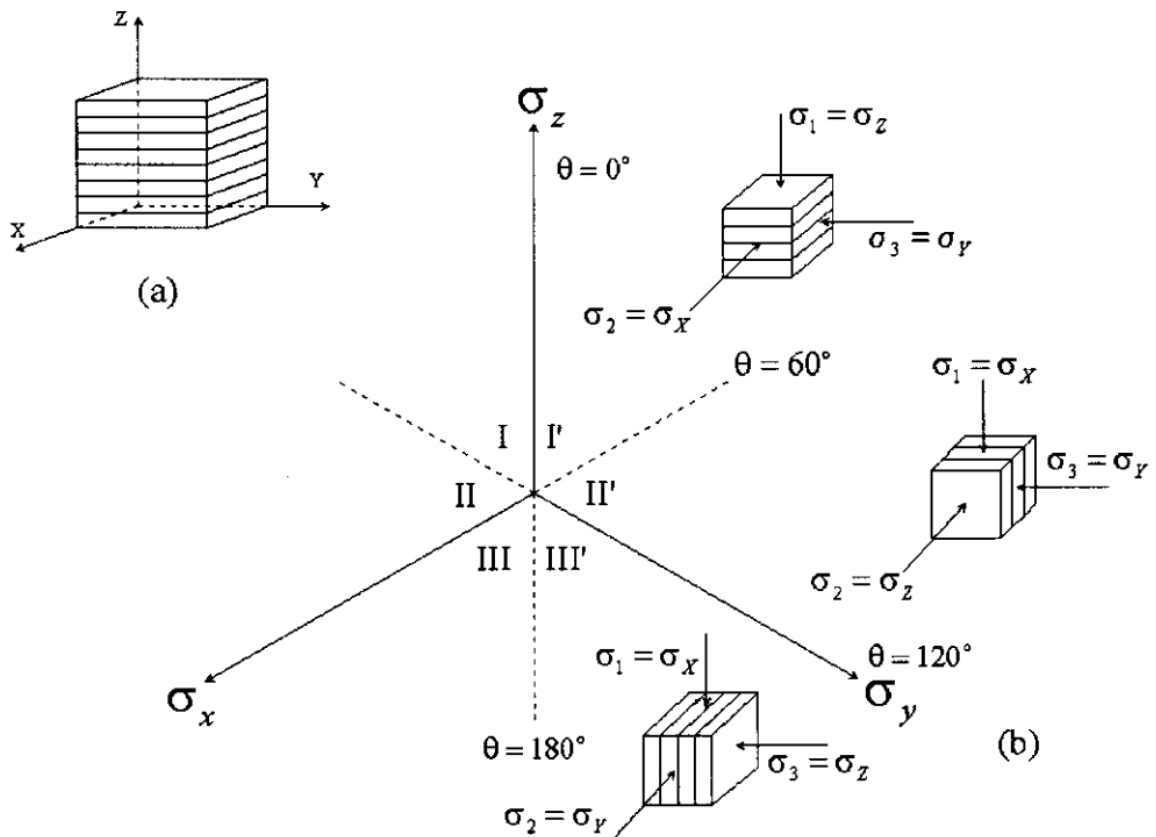


Figura 2-16 Orientação da amostra em relação aos eixos cartesianos (a) e plano octaédrico (b).

Abeleve e Lade (2003)

Importante destacar que esta variável b tem seu valor limitantes entre 0 e 1, sendo uma boa descritora do tipo de carregamento, o que permite comparar por outros tipos de ensaios de laboratório, como triaxial cilíndrico e *simple shear*. Nos casos em que a tensões intermediárias são menores se igualam para gerar valores de b iguais a zero, sendo um carregamento comparável a uma compressão triaxial convencional. Ao passa que o valor de b é igual a 0,5, o carregamento é similar a um *simple shear*. Por fim, os casos em que valor de b é igual a 1 são casos similares a extensão triaxial convencional.

$$b = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{\sigma_z - \sigma_x} \quad 0 \leq \rho \leq 60^\circ \quad \text{Eq. 9}$$

$$b = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{\sigma_y - \sigma_x} \quad 60^\circ \leq \rho \leq 120^\circ \quad \text{Eq. 10}$$

$$b = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{\sigma_y - \sigma_z} \quad 120^\circ \leq \rho \leq 180^\circ \quad \text{Eq. 11}$$

Na Tabela 2-1 pode ser visto um comparativo entre as diferentes formas de analisar carregamentos em triaxiais cúbicos, com os diferentes ρ , ângulo de Lode, b e ensaios equivalentes, entre compressão triaxial, extensão triaxial e *simple shear*, respectivamente sob as siglas CT, ET e SS.

Tabela 2-1 Equivalência de carregamentos

ρ (°)	Lode (°)	b	Ensaio Equivalente
0	0	0	CT
30	30	0,5	SS
60	60	1	ET
90	30	0,5	SS
120	0	0	CT
150	30	0,5	SS
180	60	1	ET

Outra ferramenta útil na interpretação dos resultados de triaxiais cúbicos é a plotagem planificada das tensões principais. Uma maneira de fazer esta planificação é por meio das variáveis q_x e q_z , dado que elas são diretamente influenciadas pelas tensões desviadoras e ainda

o eixo de q_z fica diretamente projetado em cima do eixo de σ_z . As equações para estas variáveis são identificadas na Eq. 12 e Eq. 13.

$$q_x = \frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{\sqrt{2}} \quad \text{Eq. 12}$$

$$q_z = \frac{2\sigma_z - \sigma_y - \sigma_x}{\sqrt{6}} \quad \text{Eq. 13}$$

Outra abordagem costumeira de avaliar a evolução do cisalhamento é em termos de q e ε_q que podem ser vistas pelas Eq. 14 e Eq. 15.

$$q = \sqrt{\frac{(\sigma'_y - \sigma'_z)^2 + (\sigma'_z - \sigma'_x)^2 + (\sigma'_x - \sigma'_y)^2}{2}} \quad \text{Eq. 14}$$

$$\varepsilon_q = \frac{1}{3} \sqrt{2 \left[(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 \right]} \quad \text{Eq. 15}$$

2.3 COMPORTAMENTO TRÓPICO DE SOLOS

Nesta sessão, são arranjados os trabalhos que relatam anisotropia de solos, em contraponto aos trabalhos cujo material é presumido ou encontrado como isotrópico. A fim de fomentar as discussões, faz-se pertinente citar trabalhos que divergem na condutividade hidráulica em areias, o que permite observar que há uma distribuição preferencial dos vazios na matriz de solo, observação que corroborar com os resultados observados nas seções posteriores (ASSOULINE e OR, 2006; BAGARELLO *et al*, 2009).

Ochiai e Lade (1983) desenvolveram estudos que foi analisada a distribuição de grãos de areia uniforme de Cambria, sendo assim, os autores congelaram fatias do solo e então fizeram

imagens de microscopia óptica. Seus resultados demonstraram que a matriz deste solo apresentava uma isotropia transversa, sendo o eixo de simetria o eixo vertical, muito bem elucidado na Figura 2-17, na qual é possível identificar a planta com uma seção em horizontal na planta pontilhada e a vista em corte vertical em linhas contínuas. As representações circulares exprimem a distribuição uniforme, enquanto que, nas figuras oblongas, constituem a distribuição preferencial.

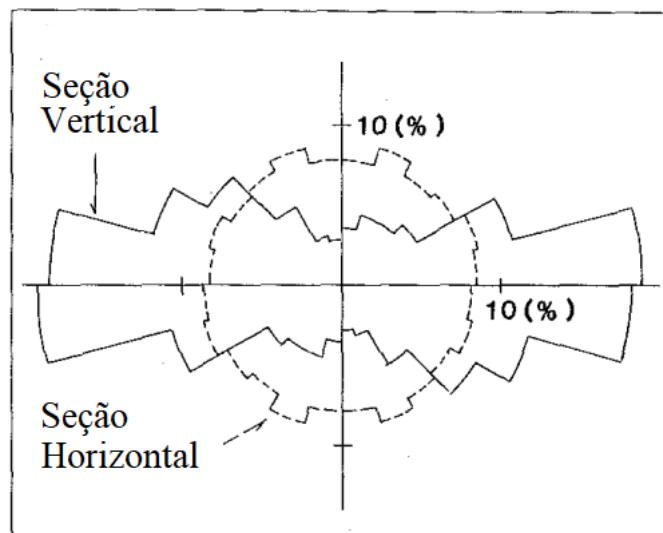


Figura 2-17 Distribuição de grãos em areia compactada.

Adaptado de Ochiai e Lade (1983)

2.3.1 Anisotropia em relação a rigidez

Pode-se afirmar que, um dos ensaios mais utilizados para avaliar o comportamento trópico de solos consiste em *Bender Elements*, que utiliza placas piezoelétricas para serem dispostas em faces opostas de amostras de solos. Na sequência, efetua-se a medida da velocidade de propagação de onda entre essas placas. Com base na massa específica do solo e a velocidade de propagação, possibilita-se aferir o módulo elástico deste solo (BORTOLOTO 2017, SADEK 2006). Nesse ínterim, importante destacar alguns ensaios em triaxiais cúbicos que igualmente demonstraram comportamento similares, tais como: Abelev e Lade (2003) referendado na Figura 2-18, cuja a premissa de estudo foi a areia da praia de Santa Monica. O destaque da pesquisa aponta para a similaridade quando ensaiado caolim (argila siltosa)

(ANANTANASAKUL *et al* 2012). Outrossim, Bestuzhava e Advuloev (2020), ao realizar o experimento em pedregulhos, encontraram também anisotropia, que chega a ordem de 1,5 entre módulo vertical comparado ao horizontal, observável na Figura 2-19.

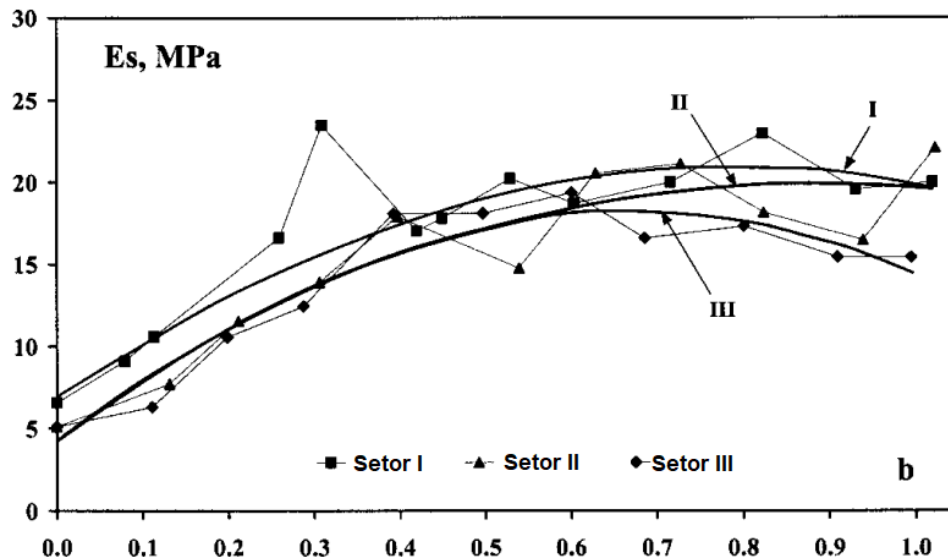


Figura 2-18 Módulo de elasticidade a 50% da deformação para a falha em ensaios cúbicos da areia da praia de Santa Mônica.

Adaptado de Abelev e Lade (2003)

Para endossar ainda mais nossa pesquisa, é de suma importância apresentar os ensaios que, em Cai (2010), foram executados em *hollow cylinder* e, conseqüentemente, foi detectado uma diferença em relação à rigidez de areia, em virtude que as amostras que tiveram a tensão principal paralela à deposição de material possuíam o maior módulo. Por outro lado, em Corte (2020) não foi observado uma diferença significativa da rigidez de amostras de areia cimentada quando sujeitas a ciclos de carga e descarga.

Em Cambou e Lanier (1988) foi investigada a anisotropia induzida por pré-carregamento anisotrópico em areia, seus resultados podem ser vistos na Figura 2-20. Com isso, é fundamental evidenciar que neste experimento foi apresentada uma significativa diferença na deformabilidade do material nas direções, devido à pré-carga.

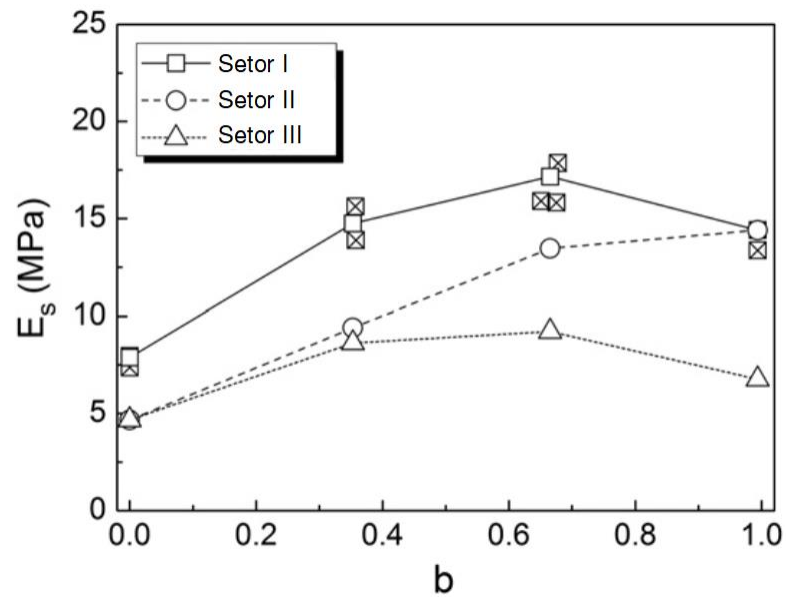


Figura 2-19 Módulo de elasticidade a 50% da deformação para a falha em ensaios cúbicos de caulim.

Adaptado de Anantanasakul *et al.* (2012)

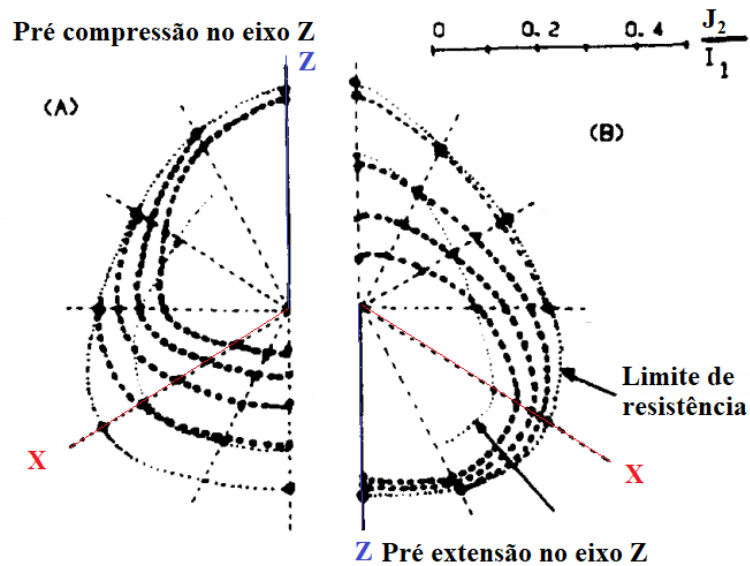


Figura 2-20 Influência de carregamento anisotrópico prévio, com pré-compressão (A) e pré-extensão (b) no eixo Z (vertical).

Adaptado de Cambou (1988)

Já Chenari (2014) compilou uma tabela com as relações entre os módulos elásticos de diversos materiais, e estes resultados podem ser observados na Tabela 2-2.

Em seu trabalho recente, Liu *et al.* (2022) compila as diferenças em módulos de rigidez verticais e horizontais de vários materiais granulares distintos com diferentes areias, esferas de vidro, pedregulho e até compara com materiais com geometria agulhar, como arroz selvagem. Seus achados e o compilado variam de valores que indicam total anisotropia, como praticamente isotrópicos e, ainda, com isotropia transversa, em graus de relações entre módulo cisalhante vertical sob horizontal entre 2,31 para areia de Toyoura para 0,82 para esferoides de vidro.

Tabela 2-2 Razões de anisotropia de diferentes materiais

Pesquisadores	$K=\sigma_3/\sigma_1$	G_{HH}/G_{VH}	E_H/E_V	Tipo de material*
Jamiolkowski et al. (1995)	0,55	1,21 e 1,88	-	Panigaglia e Argila de Pisa(N)
Belloti et al. (1996)	0,5	0,96	0,82	Areia de Ticino(R)
	1,0	1,20	1,21	
	1,5	1,26	1,55	
	2,0	1,45	1,9	
Jovicic e Coop (1998)	1	1,9 e 1,6	-	Caolim (R) and Argila de Londres (N)
Pennington et al. (1997)	0,45	1,22 e -	- - - -	R e N Argila de Gault
	1,0	1,45 e 1,8		
	1,5	1,55 e 2,1		
	2,0	1,65 e 2,3		
Kuвано (1999)	0,45	0,85; 1,1 e 0,75	0,5; 0,6 e 0,48	Areia do Rio Ham, Areia de Dunkerque e Esferas de Vidro
	1,0	1,1; 1,3 e 1,05	0,85; 0,98 e 0,84	
	2,0	1,38; 1,65 e 1,4	1,23; 1,42 e 1,3	

*R/N=Reconstituída/Natural

Adaptado de Chenari (2014)

2.3.2 Anisotropia em relação a resistências

Neste ponto da pesquisa, é importante apresentar os primeiros trabalhos que investigaram a anisotropia. Tais produções foram realizadas por Arthur e Menzies (1972). Os autores dispuseram areia Leighton Buzzard em uma célula cúbica com tensão controlada e moldaram vários corpos de prova com disposições inclinadas, fazendo com que os planos de disposição tivessem defasagem com o eixo de carregamento na hora que a amostra fosse colocada na célula. Para melhor ilustrar os resultados de seus ensaios, cita-se a Figura 2-21 na qual é pertinente observar que já demonstravam uma variação na resistência entre os carregamentos a 0 e a 90° na ordem de 10%.

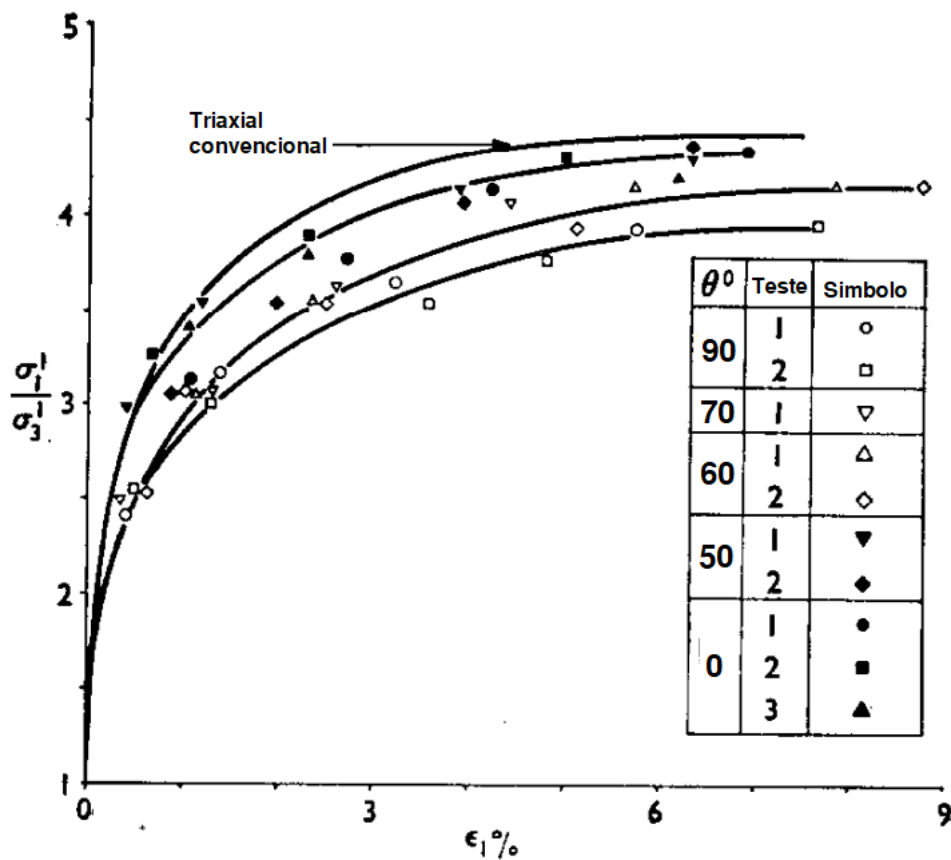


Figura 2-21 Tensão deformação de areia Leighton Buzzard em diferentes ângulos de disposição com a vertical.

Adaptado de Arthur e Menzies (1972)

Precipuamente neste aspecto, os trabalhos de Lade e seus contribuidores visam demonstrar a realidade anisotrópica de areias. Em Abelev e Lade (2003), foi ensaiada a areia da praia de Santa Mônica e foi notada uma anisotropia, exemplificada na Figura 2-22. É notório observar que no segundo setor, em especial o de 60 a 120°, há um decréscimo na ordem de 6° no ângulo de atrito. Por outro lado, em Rodrigues e Lade (2013) fora ensaiada uma areia fina de Nevada e nestes ensaios pouca anisotropia foi notada, em destaque na Figura 2-23.

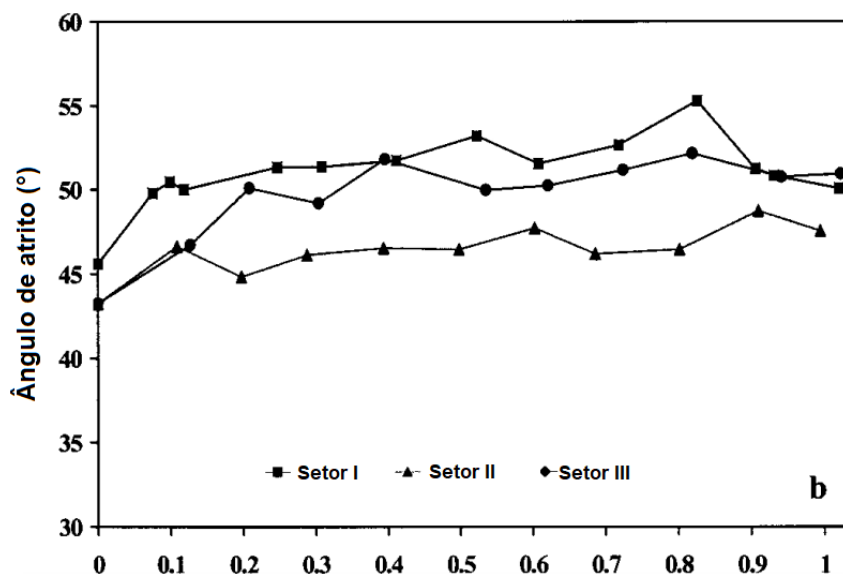


Figura 2-22 Variação do ângulo de atrito de pico em areia da praia de Santa Mônica.

Adaptado de Abelev e Lade (2003)

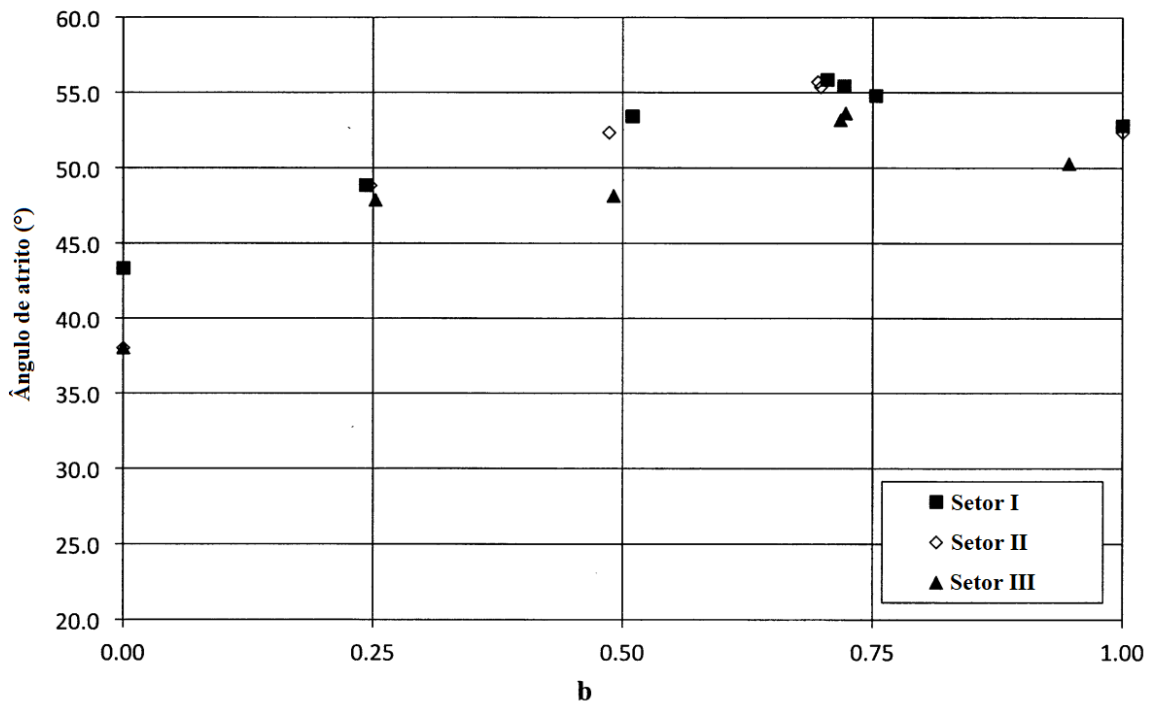


Figura 2-23 Variação da resistência na areia de Nevada

Adaptado de Rodriguez e Lade (2013)

A Figura 2-24 demonstra os resultados obtidos para a mesma metodologia aplicada a caolim industrial (ANANTANASAKUL *et al.*, 2012). Resultados similares também podem ser observados em argila da baía de São Francisco (KIRKGARD e LADE, 1993).

Ensaaios em *hollow cylinder* podem revelar comportamentos anisotrópicos para uma infinidade de ângulos de carregamento principal. Neste âmbito, é apresentado um compilado de quatro tipos de solos diferentes, tais como: uma areia, um silte, uma areia com argila incluída e um artificial solo misto, o qual pode ser confirmado na Figura 2-25. Em especial, é notável a grande diferença de ângulo de atrito para tanto o silte quanto a areia em 14° e 8° , e para os ângulos em relação a deposição de 75° e 90° respectivamente. Outrossim, é notável que o índice de anisotropia em solos com maior distribuição granulométrica é menor quando comparado com distribuições uniformes.

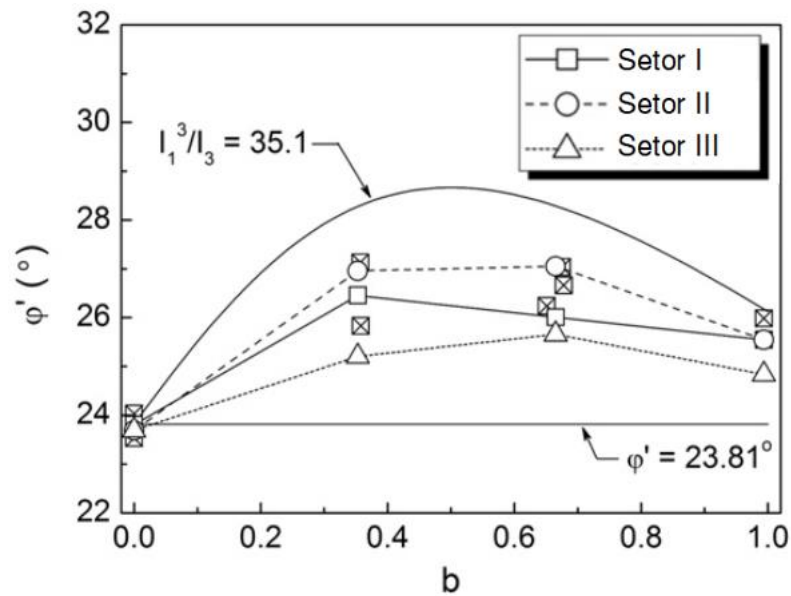


Figura 2-24 Variação do ângulo de atrito em função para caolim

Adaptado de Anantanasakul *et al.* (2012)

Salienta-se ainda que, em argilas ao serem consolidadas anisotropicamente e isotropicamente observa-se que haverá diferença em sua resistência não drenada, podendo chegar 50%. Este fenômeno também é muito observado em argilas em estado natural e sobre adensadas, na Figura 2-26, exemplificam-se os resultados de *hollow cylinder* aplicados na argila de Londres (NAKASE e KAMEI, 1983; MAYNE, 1985; NISHIMURA, 2007).

Por outro lado, Cai (2010), ao utilizar *hollow cylinder*, ensaiou uma variedade de areias em ângulos de carregamento principal com a direção da disposição do material. Nestes experimentos foi encontrada uma convergência, em que a resistência do solo decresce progressivamente até atingir o vale em 75°. Do mesmo modo, também foi feita a mesma observação em uma areia densa que apresentou resultado similar a Li e Yu (2009), visto na Figura 2-27. Além do mais, a mesma metodologia foi empregada no trabalho de Corte (2020), porém fora utilizada areia artificialmente cimentada, seu trabalho acompanha os resultados de Cai (2010), a autora ainda demonstra uma tendência que aumentando a cimentação e/ou índice de vazios há um decréscimo na anisotropia, como ilustra a Figura 2-28.

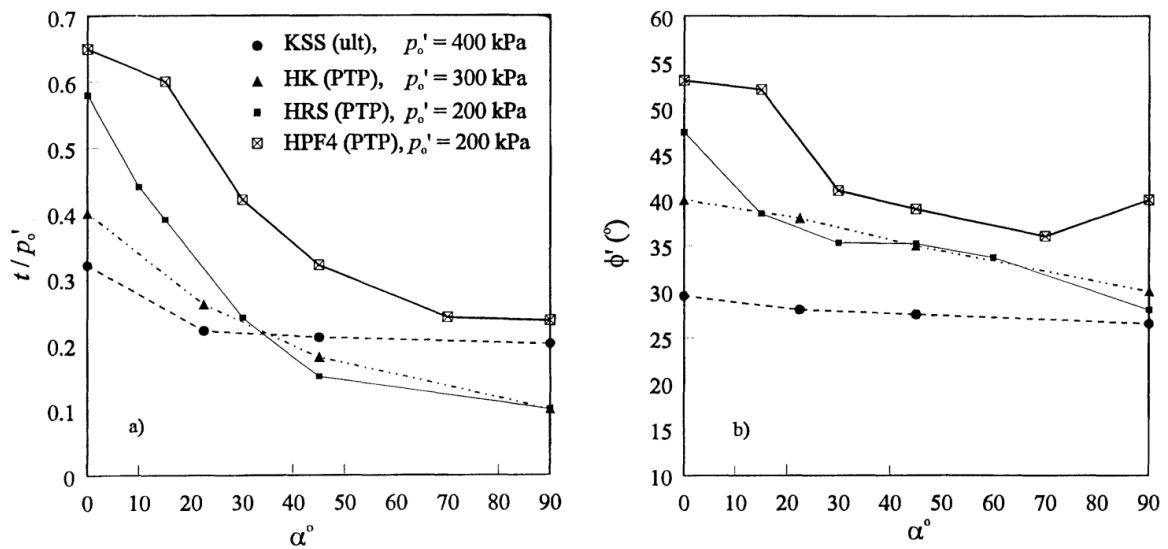


Figura 2-25 Anisotropia inicial na resistência em mistura (KSS, 50% caolim, 25% silte e 25% areia), areia do rio Ham (HRS), HRS com 10% de caolim (HK), silte artificial (HPPF4)

Zdravkovic e Potts em Kolymbas (2000)

No trabalho recente de Liu *et al.* (2021), foram compilados vários ensaios de *hollow cylinder*, além de incluir solo residual de granito, e os parâmetros de resistência, ilustrado na Figura 2-29 em função de M e na Figura 2-30 em relação a resistência não drenada. Salienta-se ainda que, todos os solos que fizeram parte dos ensaios neste trabalho apresentaram algum grau de anisotropia, sendo que, a menor anisotropia é observada na argila siltosa, como descrita no trabalho de Zdravkovic e Jardine (2000). Ainda, vale acrescentar as análises de Razeghi e Romiani que, em seu trabalho, ensaiaram uma areia uniforme de Firoozkuh em *hollow cylinder* com carregamentos isotrópicos, bem como, com dois ciclos de pré-carregamento anisotrópico, o que nos permite observar os resultados na Figura 2-31.

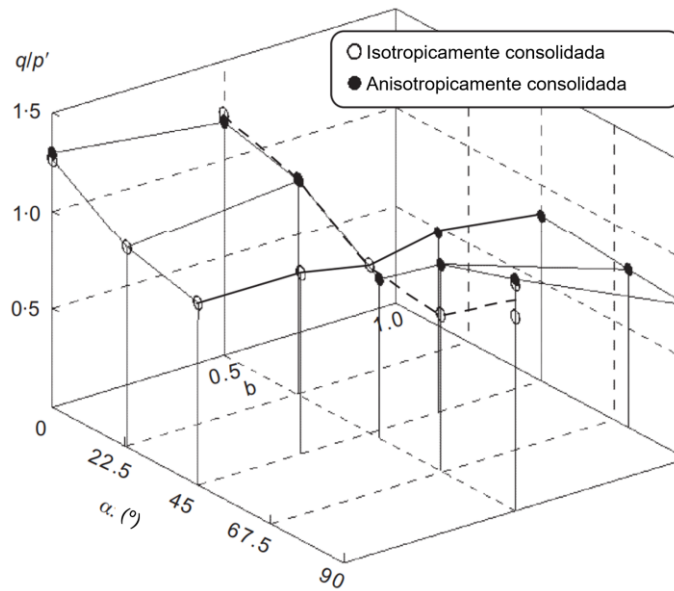


Figura 2-26 Variação da resistência da argila de Londres a 10,5m de profundidade.

Adaptado de Nishimura *et al* (2007)

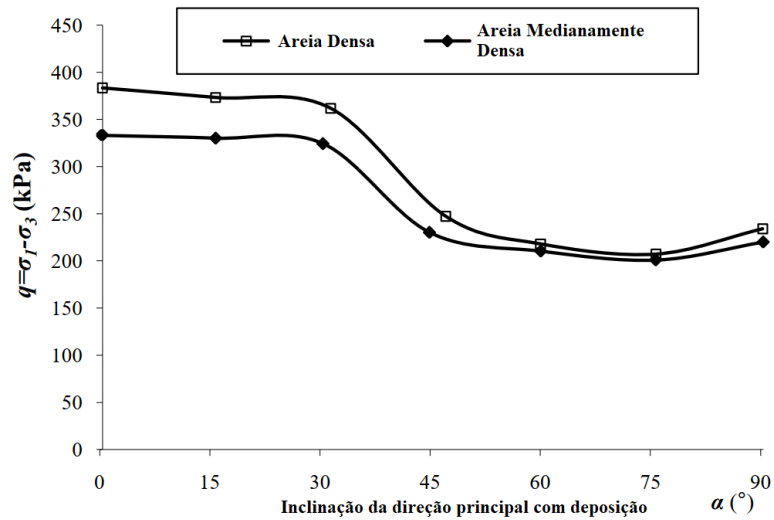


Figura 2-27 Variação da resistência de areia densa em função do ângulo de tensão principal com a deposição.

Adaptado de Cai (2010)

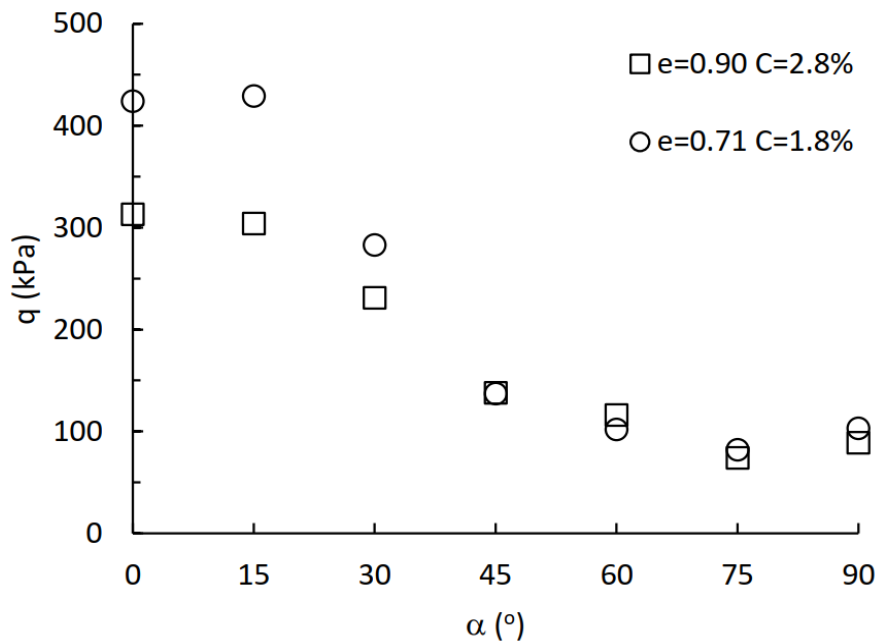


Figura 2-28 Variação da resistência de areia cimentada artificialmente.

Corte (2020)

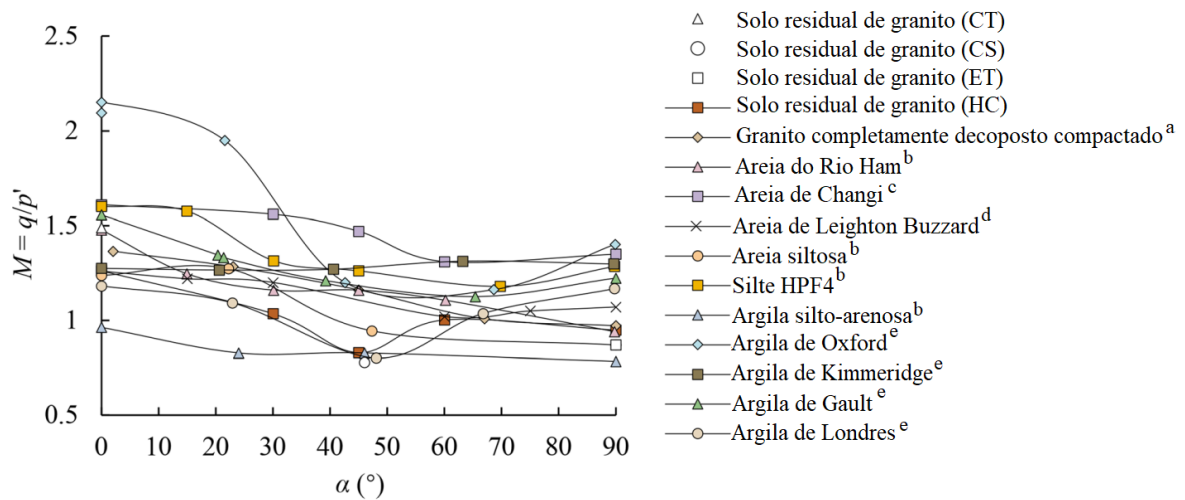


Figura 2-29 Resultados em *hollow cylinder* de doze tipos diferentes de solos em parâmetro M . a-Kumruzzaman e Yin (2010), b-Zdravkovic' e Jardine (2000), c-Chu (2002) *apud* Liu *et al.* (2021), d-Yang *et al.* (2015); e-Brouse *et al.* (2017).

Adaptado de Liu *et al.* (2021)

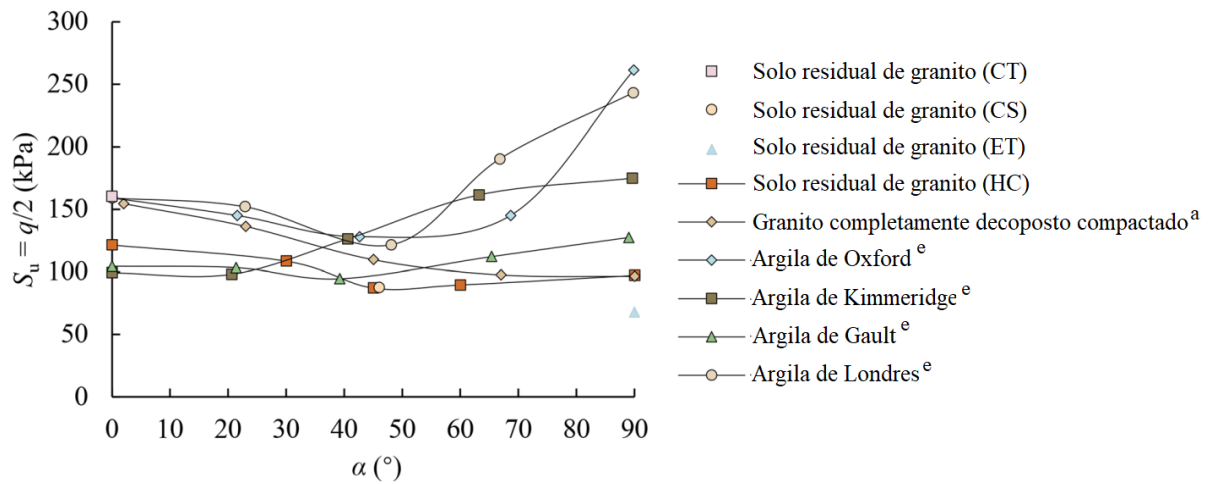


Figura 2-30 Resultados em *hollow cylinder* de seis solos diferentes de resistência não drenada. Kumruzzaman e Yin (2010). a-Kumruzzaman e Yin (2010), e-Brouse *et al.* (2017).

Adaptado de Liu *et al.* (2021)

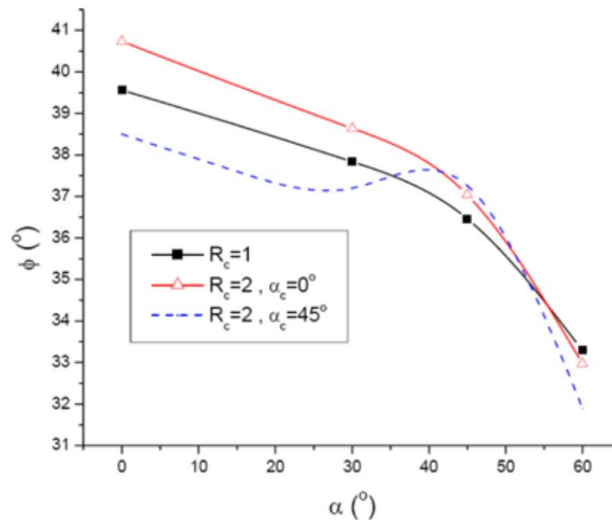


Figura 2-31 Variação do ângulo de atrito com diferentes relações de pré-carregamentos (R_c) e ângulos de pré-carregamentos (α_c).

Razeghi e Romiani (2015)

Além disso, é importante apontar sobre a avaliação da influência da densidade relativa da areia. Esta análise pode ser vista no trabalho de Yang *et al.* (2015) no qual foi ensaiada a areia de Leighton Buzzard em duas densidades distintas, igualmente com esferas de vidros com densidade relativa ainda superior, demonstrando poucas diferenças relativas a anisotropia, sendo que, o mais relevante a geometria do grão do que a densidade para determinar a influência sob ângulos de carregamento distintos, o que confirma a Figura 2-32.

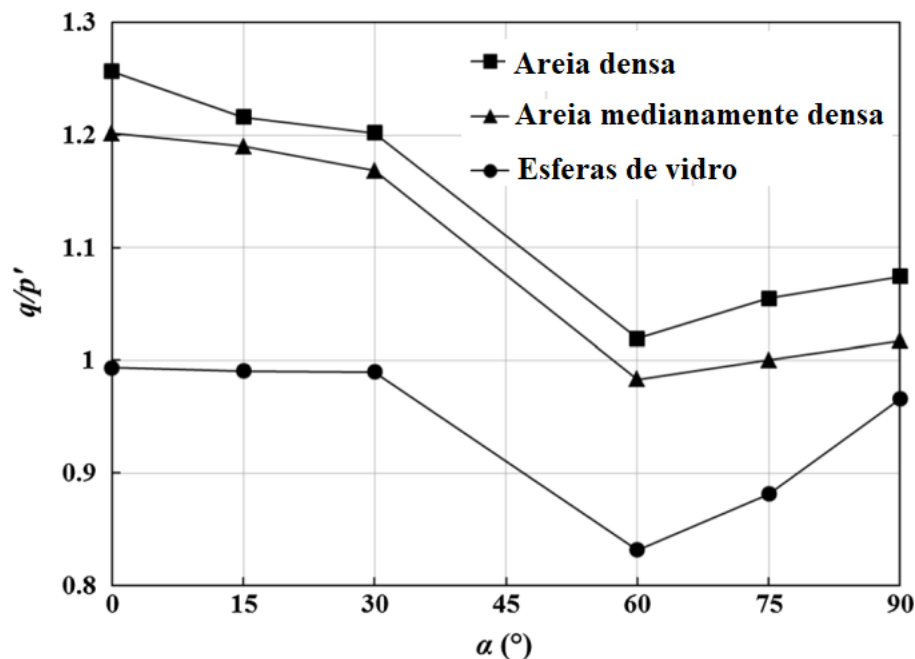


Figura 2-32 Variação da resistência em função de densidade e formato de grão.

Adaptado de Yang *et al.* (2015)

Por conseguinte, em Silvani (2017), a areia reforçada com cal e cinza volante demonstrou um comportamento isotrópico, o qual não demonstra muita diferença diante os ensaios triaxiais cúbicos como pode ser visto na Figura 2-33 que são analisados ensaios realizados com o mesmo parâmetro b .

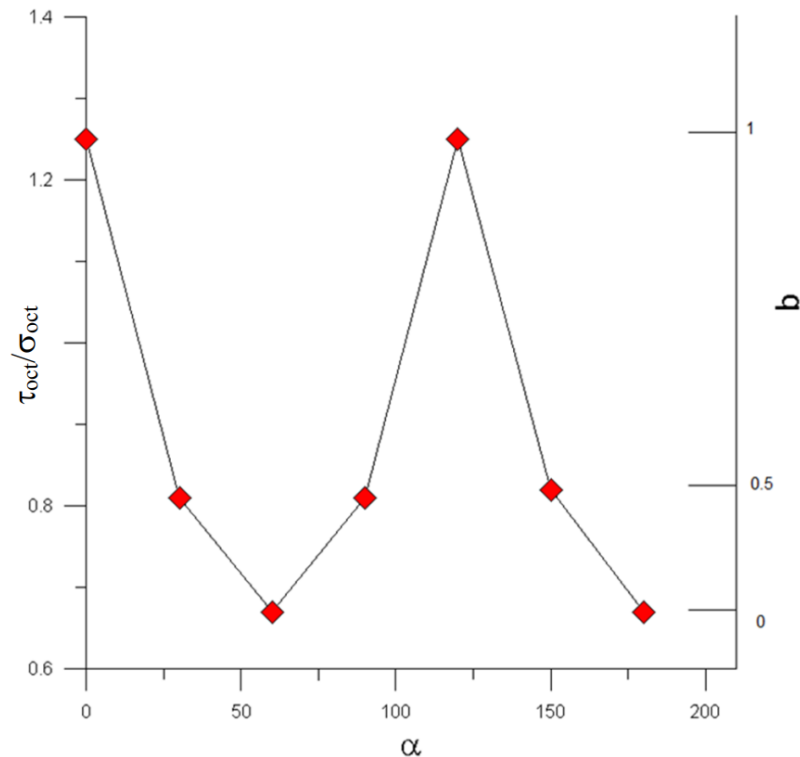


Figura 2-33 Variação da resistência conforme diferentes ângulos de aplicação de carga de areia-cal-cinza volante.

Silvani (2017)

2.3.3 Anisotropia em aplicações numéricas

Para fundamentar e exemplificar as implicações de se aplicar modelos isotrópicos em materiais anisotrópicos, é preciso se atentar ao capítulo escrito por Zdravkovic e Potts em Kolymbas (2000) cujo texto aponta que duas fundações diretas são simuladas, utilizando tanto um modelo para material isotrópico quanto anisotrópico, estes com diferentes carregamentos verticais e horizontais, ilustrado na Figura 2-34. Os resultados destas simulações estão dispostos na Figura 2-35 e na Figura 2-36, que demonstram uma diferença na última carga chegando a superestimar a resistência em 30% nos casos de sapata circular, o que levaria a projetos menos seguros. Por conseguinte, os autores igualmente analisaram as fundações em *bucket* (fundações de sucção) e chegaram a conclusões similares às já descritas. Esta mesma metodologia foi repetida para

aterros, resultando em uma altura útil de 4,4m contra 4,9m entre modelo anisotrópico e isotrópico respectivamente, novamente levando a projetos detrimetosos à segurança.

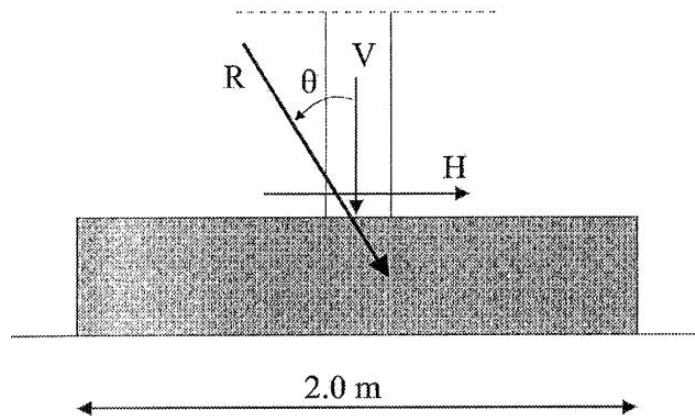


Figura 2-34 Geometria de carregamento modelado.

Zdravkovic e Potts em Kolymbas (2000)

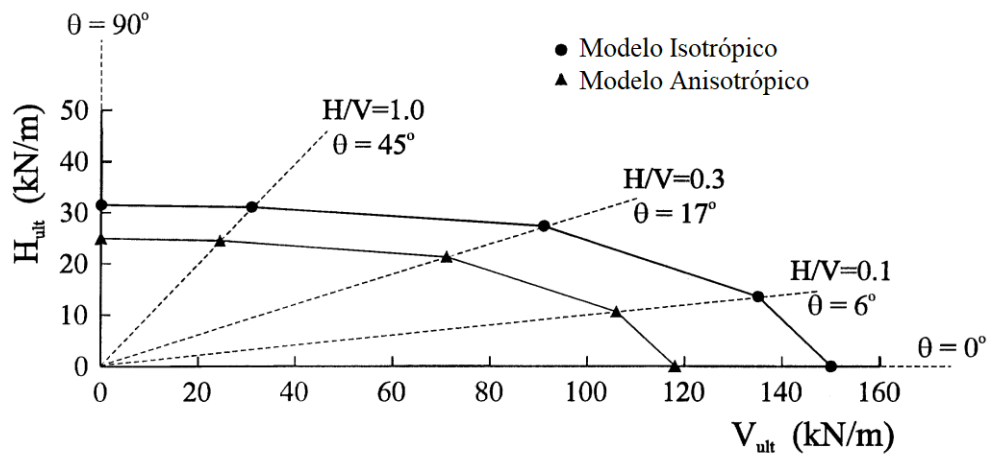


Figura 2-35 Projeção de resistência última de fundação em sapata corrida.

Zdravkovic e Potts em Kolymbas (2000)

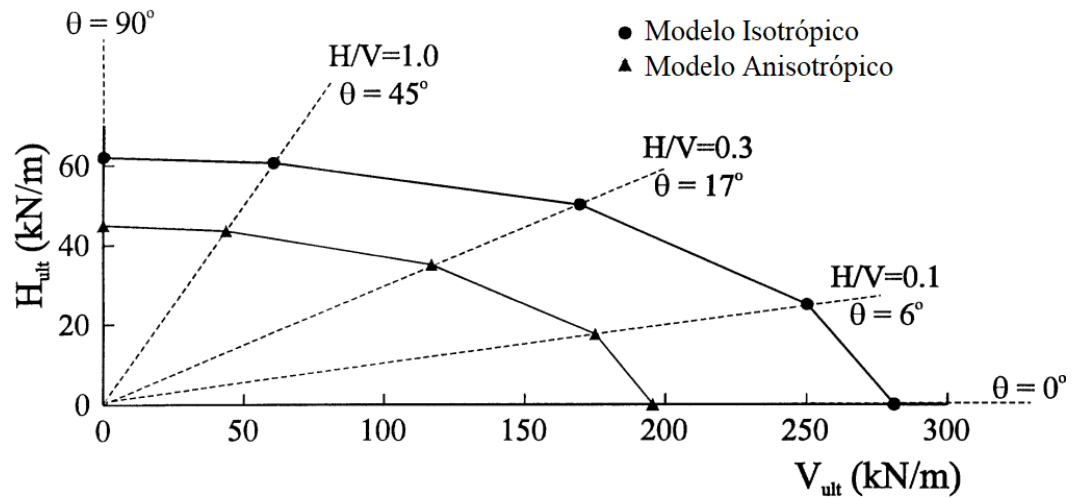


Figura 2-36 Projeção de resistência última de fundação em sapata circular.

Zdravkovic e Potts em Kolymbas (2000)

Franziuz *et al.* (2005) realizaram uma modelagem em elementos de uma escavação de túnel em Londres utilizando modelos isotrópicos e anisotrópicos, em seus resultados os autores puderam comparar os recalques na superfície com os valores obtidos de campo. Nestes modelos também foram utilizados dois valores para K_0 para o solo. Já os modelos anisotrópicos apresentaram desvios menores do que os valores encontrados em campo, fato esse visto na Figura 2-37.

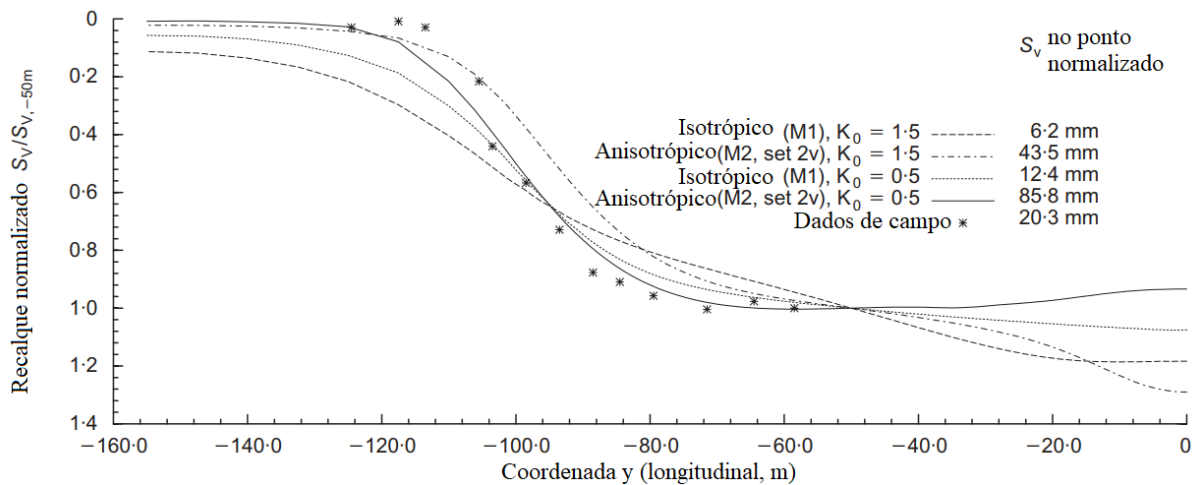


Figura 2-37 Comparação numérica de recalque de escavação com modelos isotrópicos e anisotrópicos.

Adaptado de Franzius *et al.* (2009)

2.4 EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS

Devido à natureza particulada dos solos, muito de seu comportamento é indissociável das tensões aplicadas ao maciço. Assim sendo, para estudar esta propriedade, é necessário o desenvolvimento de aparatos que possuam a capacidade de aplicar diferentes tensões nestes. Para investigar este comportamento, foram desenvolvidos diversos equipamentos como cisalhamento direto, cisalhamento simples e triaxiais. Nesta sessão serão descritos os diferentes tipos aparelhos triaxiais.

2.4.1 Triaxiais cilíndricos ou triaxiais convencionais

Para estudar o comportamento de solos sob diferentes conjuntos de tensões, em especial a influência da maior e menor tensão, foram desenvolvidos os triaxiais clássicos, entre eles o descrito em Bishop e Wisley (1975). Neste aparato, a amostra ensaiada possui um formato cilíndrico, e as tensões são aplicadas ao corpo de prova por um sistema hidráulico, em toda a superfície periférica da amostra, com a possibilidade de aplicar-se uma tensão interna ao corpo de prova e outra na membrana externa ao conjunto. Após atingido o valor desejado de confinamento, a amostra é então cisalhada pela aplicação de uma carga em seu eixo

longitudinal, gerando, assim, uma variação na maior tensão σ_1 . Um esquema dos pontos principais de um triaxial convencional pode ser visto na Figura 2-38.

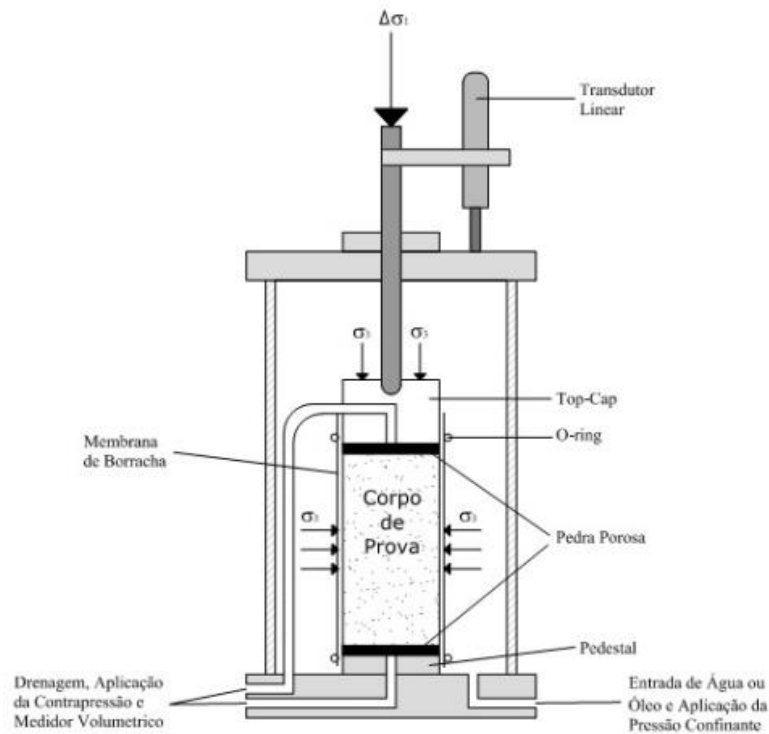


Figura 2-38 Triaxial convencional

Marques (2016)

Devido ao sistema de aplicação de carga, não há a possibilidade de aplicar um valor de tensão intermediária σ_2 diferente da menor tensão σ_3 . Neste equipamento, a fonte de pressão aplicada na contrapressão confinante pode ser tanto a partir de um compressor de ar quanto de um sistema de motor e embolo que comprime diretamente o fluido. Em sistema com ar comprimido, o sistema tende a ter um custo orçamentário menor, porém há um limite da pressão que pode ser utilizada para confinar a amostra, limitada pela potência do compressor. Em sistema em que motores e êmbolos comprimem diretamente o fluido, o limite de pressões apresenta restrições, o que representa a potência deste motor. Um exemplo de um aparato aplicado pressões vindas diretamente de compressor de ar são exemplificadas nos estudos de

Dalla Rosa (2009), enquanto no outro a aplicação advém de um sistema de motor que aplicado diretamente a pressão sob o fluido, segundo, Marques (2016).

Em contrapartida a aplicação da tensão desviadora pode advir de motores que comprimem o eixo longitudinal ou ainda de fluido pressurizados, tal como uma prensa de compressão simples e ar comprimido. Mediante o exposto, este tipo de equipamento permite um curso de ensaio somente limitado pela altura pistão, não sendo incomum aplicações de 50% de deformação aos corpos de prova. Neste equipamento, é permitido o ensaio no estado crítico de materiais.

2.4.2 Triaxiais cúbicos de paredes rígidas

Uma das maneiras de se estudar a tensão intermediária em amostras de solo cúbicas foi desenvolvida por Hambly (1969), o qual fez uso de placas rígidas que são movidas contra a amostra de solo, sendo monitorado o valor da carga aplicada durante o ensaio. Quando usado, referido aparelho é controlada a deformação do material, e obtém-se a resposta da tensão necessária para gerar esta deformação. Na Figura 2-39 temos um exemplo bem evidente deste processo por meio do desenho conceitual, pode-se observar o funcionamento de um triaxial em deformações controladas. Uma vantagem deste equipamento é a possibilidade de observar o comportamento do material pós pico. Sua maior crítica é perante a impossibilidade de garantir distribuição de tensão igualmente na face, bem como, que o potencial influência do atrito entre as placas.

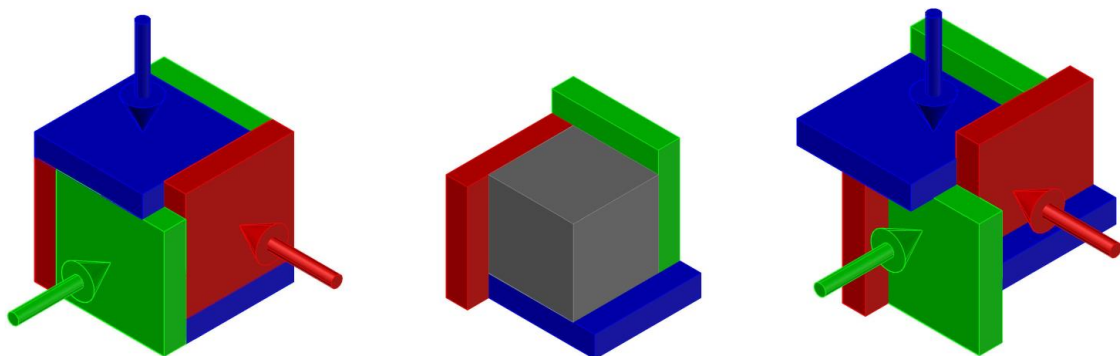


Figura 2-39 Triaxial cúbico de paredes rígidas.

Adaptado de Williams (2001)

2.4.3 Triaxiais cúbicos de paredes flexíveis

No uso do equipamento, com Triaxiais cúbicos de paredes flexíveis, foram desenvolvidos por Ko e Scott (1967), e o princípio do funcionamento se baseia possuir uma célula rígida, colocando-se membranas flexíveis, as quais são submetidas às pressões advindas de ar comprimido, aplicando-se às amostras cúbicas.

Em Sadek (2006), encontra-se uma versão do equipamento, apresentado na Figura 2-40, que foi desenvolvido a partir do descrito em Reddy (1990). Dentre as principais partes, uma delas é a célula rígida, que recebe a amostra em seu núcleo, também é possível destacar os *cushions*, as membranas flexíveis de aplicação de pressão e, por fim, as paredes que fazem a vedação e fixação entre *cushions* e a fonte de ar comprimido. Com este aparato, as pressões são impostas e a resposta obtida é medida através de LVDTs dispostos nas faces flexíveis. Devido à aplicação de pressão a avaliação do comportamento pós pico é dificultosa.

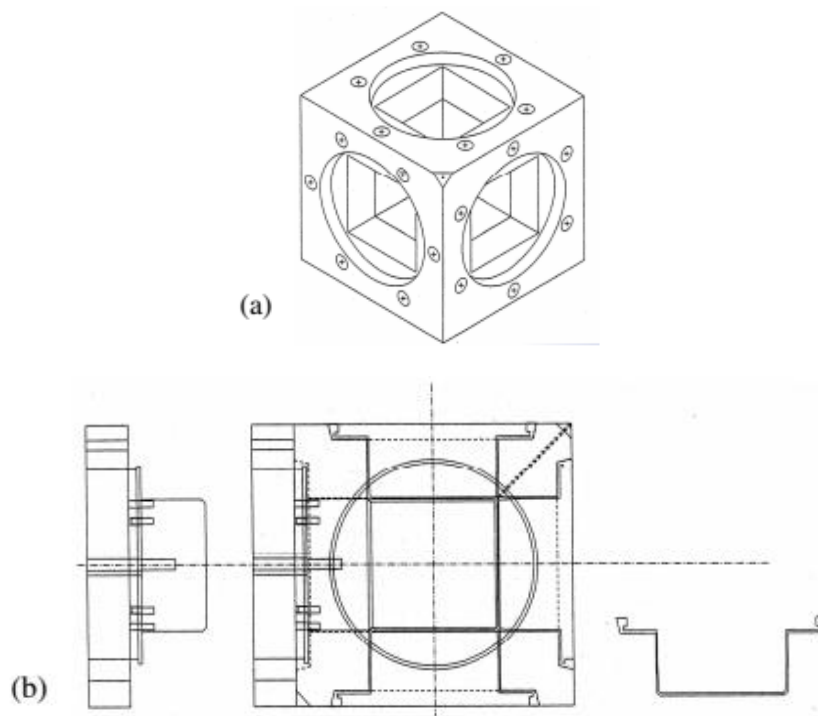


Figura 2-40 Triaxial cúbico de paredes flexíveis. Vista isométrica (a) e vista em corte (b).

Sadek (2006)

Em virtude de que todas as faces do equipamento possuem características flexíveis, em alguns casos, especialmente para materiais com rigidez elevadas, é observado casos de translação durante o ensaio. Para que isso não aconteça, uma solução encontrada foi a substituição de algumas das faces flexíveis por faces rígidas, a razão pela qual impede a translação do corpo de prova, impondo condições de contorno de translação nulas nas faces rígidas (SILVANI, 2017).

2.4.4 Triaxiais cúbicos de paredes mistas

Já no uso da metodologia de Triaxiais cúbicos de paredes mistas, observa-se que há uma combinação de paredes rígidas e flexíveis, sendo um dos primeiros desenvolvidos por Lade (1973) *apud* Sadek (2006). Michelis (1988) criou um equipamento com princípio similar aos triaxiais cilíndricos convencionais, embora este fora utilizado um pistão ligado a célula de carga em um dos seus eixos, porém usando paredes flexíveis por almofadas de pressão nos eixos perpendiculares conforme elucidada a Figura 2-41.

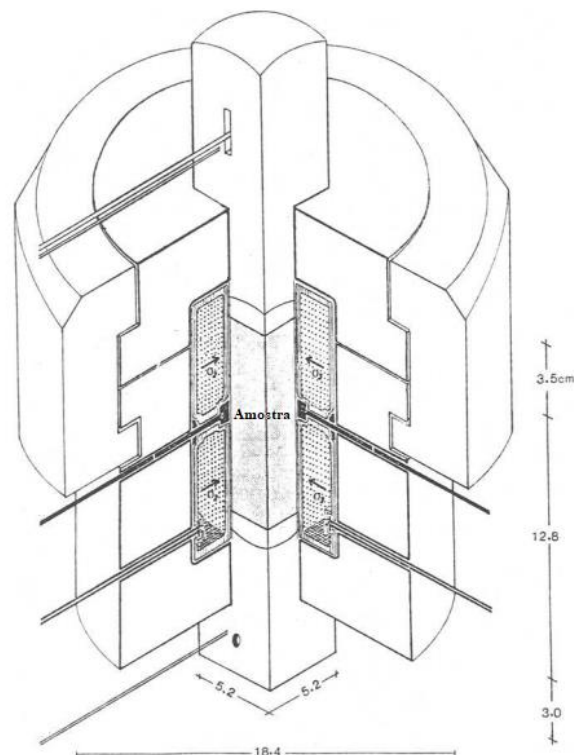


Figura 2-41 Triaxial de paredes mistas.

Adaptado de Michelis (1988)

Na bibliografia há críticas sobre o aparato acima citado, devido à falta de simetria perante a aplicação das condições de contorno, sendo que, os aparelhos que possuem paredes flexíveis tendem a não ter deformações iguais, enquanto os que possuem paredes rígidas não apresentam tensões homogêneas, sendo mais propensas às rupturas acontecerem nas paredes flexíveis contra as paredes rígidas (AIREY e WOOD, 1988).

2.5 SUPERFÍCIES DE FALHA EM CARREGAMENTOS MULTIAXIAIS

Tratando-se de modelos para a descrição do comportamento de materiais sob o regime multiaxial, foram propostos vários estudos na literatura descritos nos itens seguintes.

2.5.1 Mohr-Coulomb

Este modelo se baseia na resistência devido ao mecanismo de atrito interno e coesão entre as partículas, podendo ser descrito em função do ângulo de atrito interno (ϕ) e intercepto coesivo ou coesão. (c). Sua superfície de falha (F) pode ser descrita pela Eq. 16:

$$F = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} \sin \phi - c \cos \phi = 0$$

Eq. 16

A representação no plano octaédrico é apresentada como um hexágono com três ângulos agudos que interceptam os eixos das tensões principais e três ângulos obtusos intercalando os agudos. Uma representação do ângulo de atrito e o critério de falha descrito por Mohr-Coulomb no plano octaédrico pode ser visto na Figura 2-42.

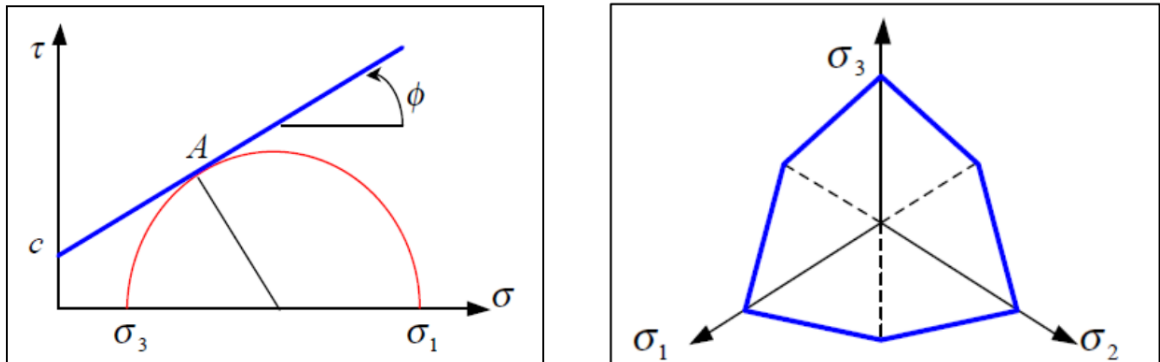


Figura 2-42 Critérios de escoamento de Morh-Coulomb no plano tensão normal-cisalhante (esquerda) e octaédrico (direita).

Silvani (2017)

2.5.2 William-Warnke

O modelo em questão foi inicialmente desenvolvido pensando nas propriedades mecânicas do concreto, ponderando a diferença entre a resistência de tração e compressão simples. Ele também utiliza como terceiro parâmetro a resistência de compressão biaxial, e apresenta um contorno elíptico no plano octaédrico que esta superfície é delimitada pelos dois raios r_1 e r_2 , além do parâmetro que representa o ganho de resistência em função da tensão média z . Seu desenvolvimento se baseou em cima do modelo de Bresler-Pister e foi apresentado inicialmente em William e Warnke (1974). Para exemplificar a representação desta superfície, cita-se a Figura 2-43.

No entanto, para encontrar os valores dos dois raios descritivos da superfície, é necessário correlacionar estes com os três parâmetros de resistência da tração direta (f_t), compressão simples (f_{cu}) e compressão biaxial (f_{cb}), correlacionados com suas razões entre tração direta (α_z) e compressão simples, bem como compressão biaxial e compressão simples (α_u), como ilustrado nas equações Eq. 17 e Eq. 18:

$$\alpha_z = \frac{f_t}{f_{cu}} \quad \text{Eq. 17}$$

$$\alpha_u = \frac{f_{cb}}{f_{cu}} \quad \text{Eq. 18}$$

Estes parâmetros se correlacionam nas Eq. 19, Eq. 20 e Eq. 21

$$z = \frac{\alpha_u \alpha_z}{\alpha_u - \alpha_z} \quad \text{Eq. 19}$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{6}{5} \frac{\alpha_u \alpha_z}{2\alpha_u + \alpha_z}} \quad \text{Eq. 20}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{6}{5} \frac{\alpha_u \alpha_z}{3\alpha_u \alpha_z + \alpha_u - \alpha_z}} \quad \text{Eq. 21}$$

Com estes parâmetros, a superfície da elipse pode ser descrita em função das suas coordenadas polares pelos parâmetros r e θ nas Eq. 22 e Eq. 23:

$$r(\theta) = \frac{2r_2(r_2^2 - r_1^2)\cos\theta + r_2(2r_1 - r_2)[4(r_2^2 - r_1^2)\cos^2\theta + 5r_1^2 - 4r_1r_2]^{1/2}}{4(r_2^2 - r_1^2)\cos^2\theta + (r_2 - 2r_1)^2} \quad \text{Eq. 22}$$

$$\cos\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 - 2\sigma_3}{\sqrt{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}} \quad \text{Eq. 23}$$

Por fim, estes parâmetros se relacionam com a Eq. 24 descrevendo a superfície de ruptura.

$$f(\sigma) = f(\theta, p, \tau_{oct}) = \frac{1}{z} \frac{p}{f_{cu}} + \frac{1}{r(\theta)} \sqrt{\frac{3}{5}} \frac{\tau_{oct}}{f_{cu}} - 1 \quad \text{Eq. 24}$$

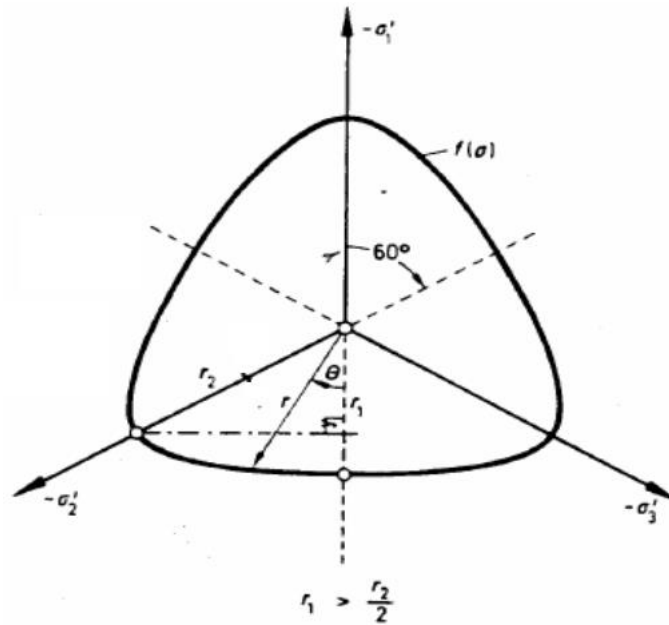


Figura 2-43 Contorno de superfície William-Warnke no plano octaédrico.

Willam e Warnke (1974)

2.5.3 Lade

Em Lade (1977), é descrito um modelo que inicialmente prevê a superfície de ruptura para solos sem coesão, este modelo é posteriormente proposto para abranger solos, rochas e concreto (LADE e KIM, 1995). Neste modelo, os parâmetros que delimitam a superfície de ruptura destes materiais seriam provenientes da relação entre o terceiro e o primeiro invariante de tensão, respectivamente I_3 e I_1 . Estes são nas Eq. 25 e Eq. 26.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

Eq. 25

$$I_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$$

Eq. 26

Para estimar o valor do módulo que governa a superfície de ruptura, o terceiro invariante de tensões pode ser estimado levando em consideração ensaios triaxiais prévios plotando os valores descritos por $(I_1^3 / I_3 - 27)$ versus (p_a / I_1) em escala log x log sendo p_a a pressão atmosférica. A Figura 2-44 demonstra como encontra estes valores, sendo m o valor do módulo da inclinação da reta enquanto η_1 é o valor da ordenada no intercepto com 1, que equivale a origem dos eixos cartesianos.

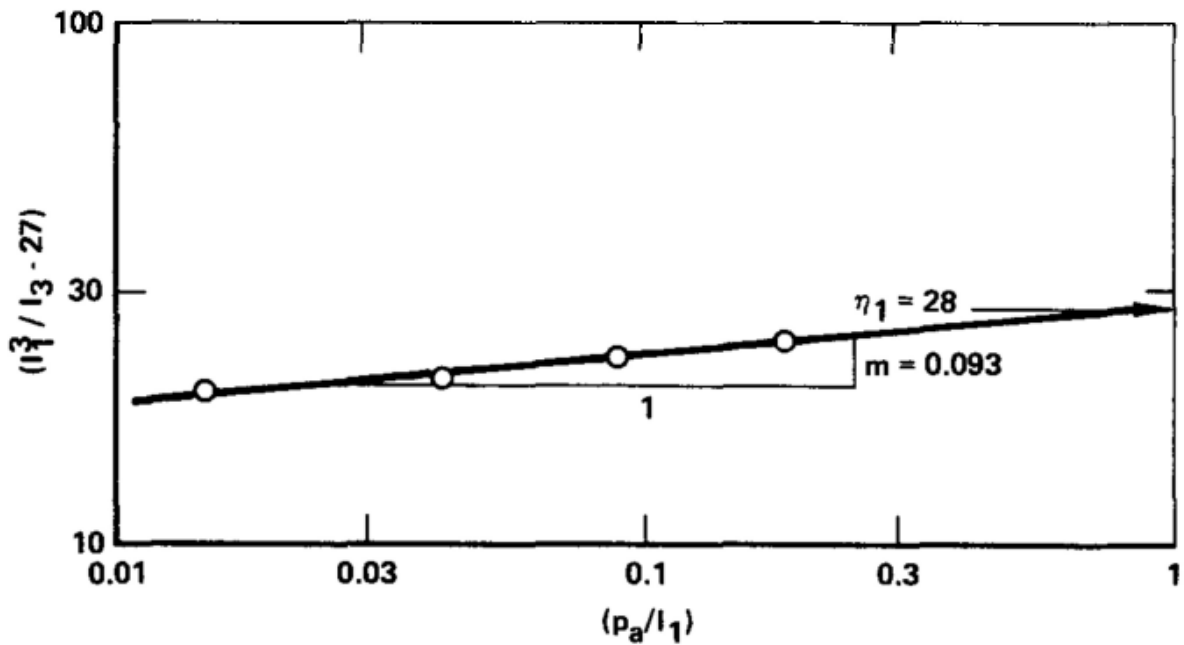


Figura 2-44 Obtenção dos parâmetros m e η_1 a partir da areia do rio Sacramento.

Fonte: Lade (1977)

Consequentemente, o valor da superfície de ruptura pode ser descrito pela Eq. 27.

$$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right) \left(\frac{I_1}{p_a}\right)^m - \eta_1 = 0$$

Eq. 27

A utilização de tal modelo é gerado em superfícies de ruptura que, ao ser interceptado, o plano octaédrico gera contornos, conforme aponta a Figura 2-45.

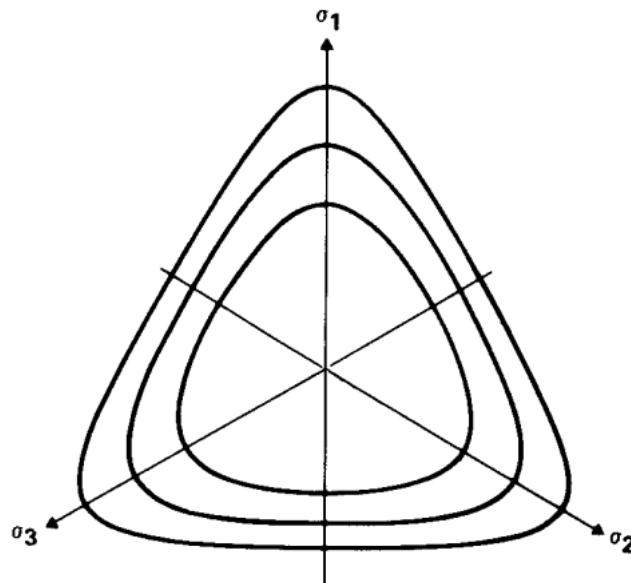


Figura 2-45 Intersecção da superfície de ruptura no plano octaédrico segundo modelo de Lade.

Adaptado de Lade (1977)

3 SUBSÍDIOS NECESSÁRIOS AO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Com o propósito de se obter êxito na realização desta pesquisa, foi imprescindível o desenvolvimento de uma série de equipamentos eletromecânicos para a execução e acompanhamento dos ensaios. Neste estudo, o autor desenvolveu um leitor de células de carga, um sistema de aquisição, um sistema de atuação e por fim, um triaxial cúbico por si.

3.1 LEITOR DE CÉLULAS DE CARGA

O aparato de leitura de células de carga é constituído em seus três componentes principais um Arduino Uno, um conversor analógico digital e amplificador HX 711, um display LCD, um relé e uma série de *light emitting diode* (LED). O esquema do circuito, bem como, o código utilizado pode ser visto no anexo A, enquanto na Figura 3-1 pode ver o equipamento em operação.

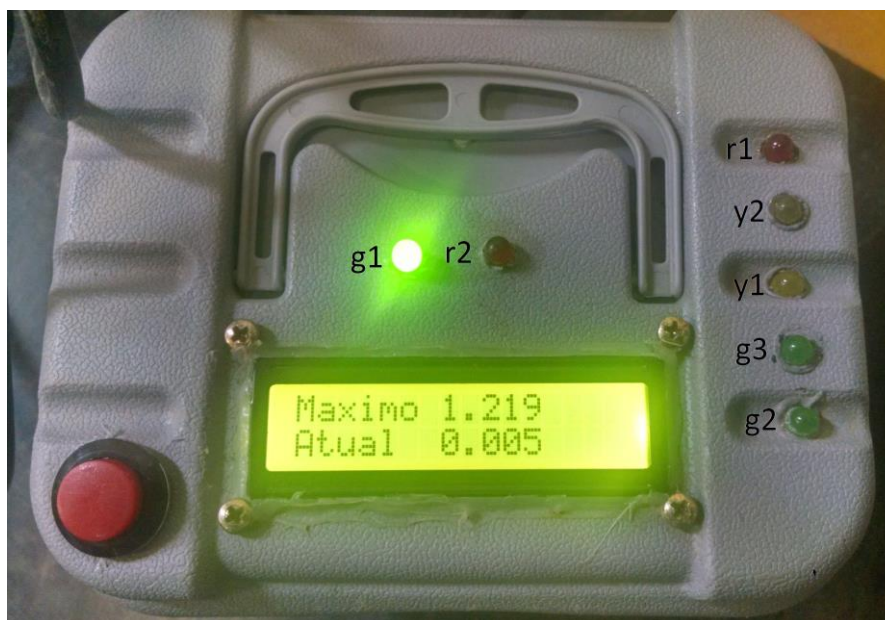


Figura 3-1 Leitor de célula de carga.

O circuito integrado HX 711 é largamente utilizado em sistemas de automação para se obter um sinal com alta precisão e com uma amplificação significativa. Seus atributos incluem um amplificador com ganho de até 128x e um conversor analógico digital (ADC) que gera até 24bits de posições. Devido ao pequeno sinal gerado por células de cargas, na faixa de 2mV/V, é necessário que esse sinal seja amplificado para conseguir um valor significativo, por isso a amplificação de 128x se faz necessária. A segunda necessidade é de gerar um sinal digital para melhor interpretação dos dados, e um valor de 24 bits, demonstrou-se suficiente, tendo em vista a possibilidade de gerar mais de 16 milhões de posições. Na Figura 3-2, pode-se ver um HX711 sem os pinos soldados para ter noção de escala.

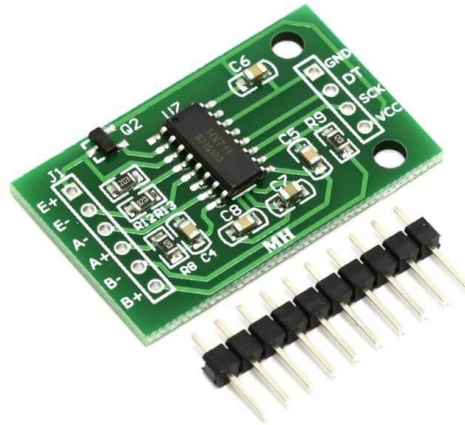


Figura 3-2 Amplificador e conversor analógico digital HX 711.

Para o usuário conseguir interpretar os resultados gerados pelo sistema, é essencial um sistema de *display*. Em virtude disto, optou-se pelo uso de tanto um digital quanto um de sistema de LEDs. O sistema informa para o usuário inicialmente se está ligado pelo LED g1, enquanto o restante dos leds vão progressivamente ligando conforme a carga esperada da célula de carga vai sendo superada. Respectivamente, os LEDs g2, y1, y2, r1 e r2 acendem quando as cargas são 5, 30, 50, 80, 100 e 130% da carga da célula, e ainda quando a última é ativada, o LED g1 desliga, o relé desarma cortando o circuito e desligando a prensa. Assim, por motivos de segurança, a utilização do sistema prensa e leitor de célula de carga só funciona quando ambos estiverem ligados, impedindo costumes incorretos do usuário que pode levar a danos nas células de carga e/ou prensa.

O display LCD apresenta para o usuário o percentual da carga que está sendo utilizado no sistema, bem como a carga máxima atingida, e eventualmente mensagens de aviso. É relevante destacar que os valores percentuais de carga são constantemente evidenciados, qualquer célula de carga pode ser utilizada, necessitando somente fazer-se a calibração. Caso o usuário desejar, o valor máximo pode ser zerado, em casos em que seja feito outro ensaio, o comando seria apertar o botão do sistema e segurando-o, para evitar eventuais *miss click*.

O Arduino Uno tem por função fazer a comunicação entre o HX 711 e gerar os sinais para serem usados nos LEDs e LCD, e ainda ativar/desativar o relé. Sendo o Arduino um microcontrolador, seu código poderá ser modificado a fim de ajustar as necessidades do usuário. Para a aplicação desejada, o autor teve que criar um código, o qual pode ser visualizado no Apêndice 1. Na Figura 3-3, vê-se o sistema elétrico do aparato, sendo possível identificar os três componentes principais, o Arduino na esquerda, o HX711 acima e o relé ao fundo.

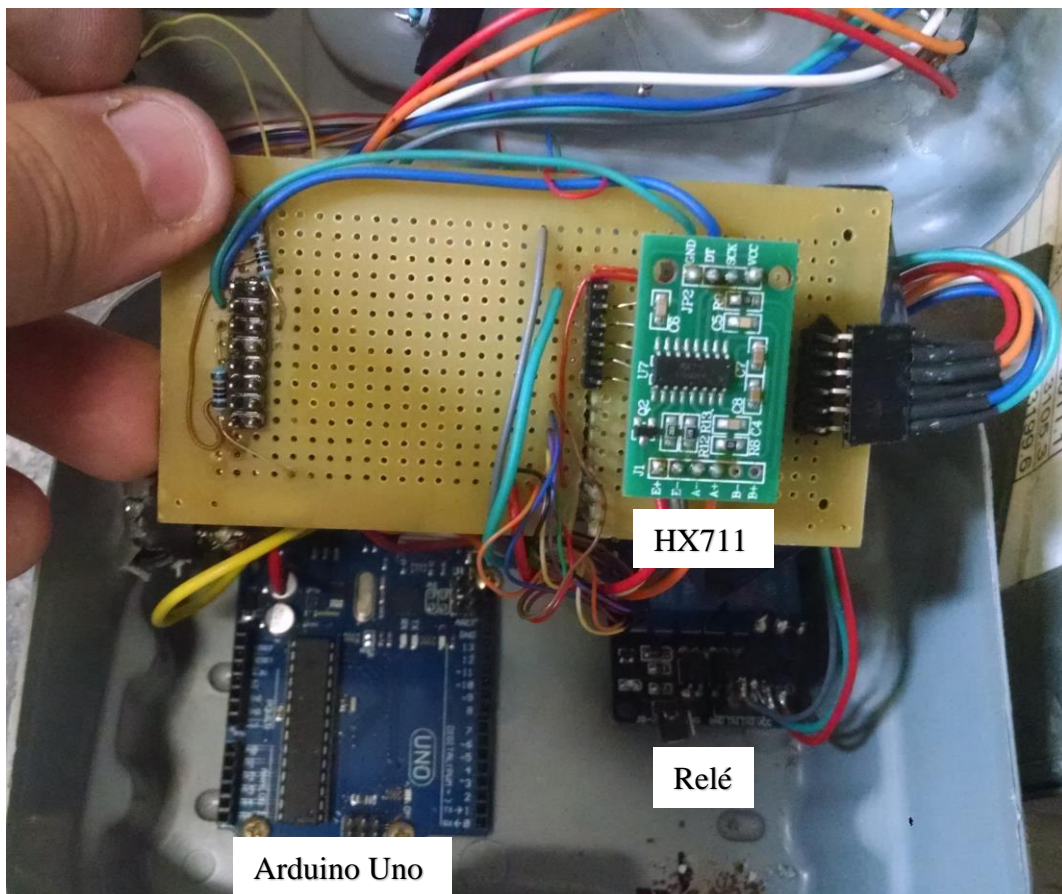


Figura 3-3 Interior do leitor de célula de carga.

Se for desejado utilizar o sistema para aquisição simultânea do valor da célula de carga e algum LVDT para se ter a curva tensão-deformação, pouca modificação é necessária, sendo somente uma pequena mudança no código, uma ligação para alguma das portas analógicas do Arduino e a ligação com cabo USB para algum computador ou utilizar um sistema de gravação via memória SD.

3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Como há a necessidade de ler inúmeros transdutores, tanto para a posição quanto a pressão, o que visa a atuação em equipamento triaxial cúbico, o autor desenvolveu um sistema de aquisição baseado em Arduino Nano e ADS 1115. Na Figura 3-4 ilustra-se o sistema de aquisição concluído.



Figura 3-4 Exterior do sistema de aquisição.

O intuito principal desse sistema de aquisição é ser utilizado com LVDTs e/ou Transdutores de Pressão, sendo assim, o sistema não precisa de amplificação de sinal, uma vez que os transdutores já utilizam uma faixa de 0 até voltagem de alimentação (VCC). Foi preferido o Arduino Nano sobre o Uno simplesmente porque o primeiro é economicamente mais acessível e compacto, sendo assim, indicado para sistemas finais, enquanto o Uno é mais indicado para prototipagem visto que a forma de realizar as ligações é facilitada. Tanto o Arduino Nano

quanto o Uno possuem canais analógicos para leituras de diferença de potencial, porém somente com 10 bits de resolução tendo o primeiro 8 e o segundo 10 deste tipo de canal.

Havendo a necessidade de aumentar a quantidade de canais, pode-se utilizar ADC extras, neste trabalho optou-se por utilizar o ADS 1115 que possui resolução de 16 bits, podendo trabalhar de duas formas, utilizando potenciais relativos ou utilizando uma referência comum. Utilizando potenciais relativos, cada ADS 1115 pode tomar somente dois valores, tendo em vista que são utilizados dois pinos para fazer a leitura, já utilizando uma referência comum cada um dos ADCs pode ler até quatro sinal diferente. Apesar do ADS 1115 gerar até 16 bits de resolução, nesta aplicação só foi utilizado 15 bits, visto que não é possível gerar diferenças de potenciais negativos responsável pelo bit faltante. O ADC utiliza sistema de SDA/SCL para endereçamento, sendo seu endereço definido pelo pino ADDR que, dependendo de como este é ligado, possibilita 4 endereços distintos. Assim, cada Arduino suporta até 4 destes, totalizando até 16 canais. Para o sistema inicial, 12 canais já seriam suficientes sendo 3 para transdutores de pressão e outros 9 para transdutores de posição. Decidiu-se por utilizar 3 ADS 1115 para os 12 canais. Entretanto, já prevendo aplicações no futuro, o circuito já está pronto para a adição de mais um. Na Figura 3-5, pode-se observar o ADC sem os pinos soldados para ter-se noção da escala.

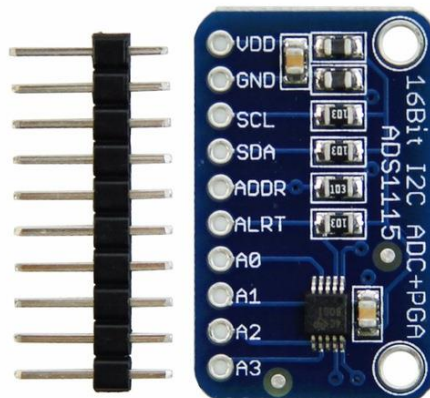
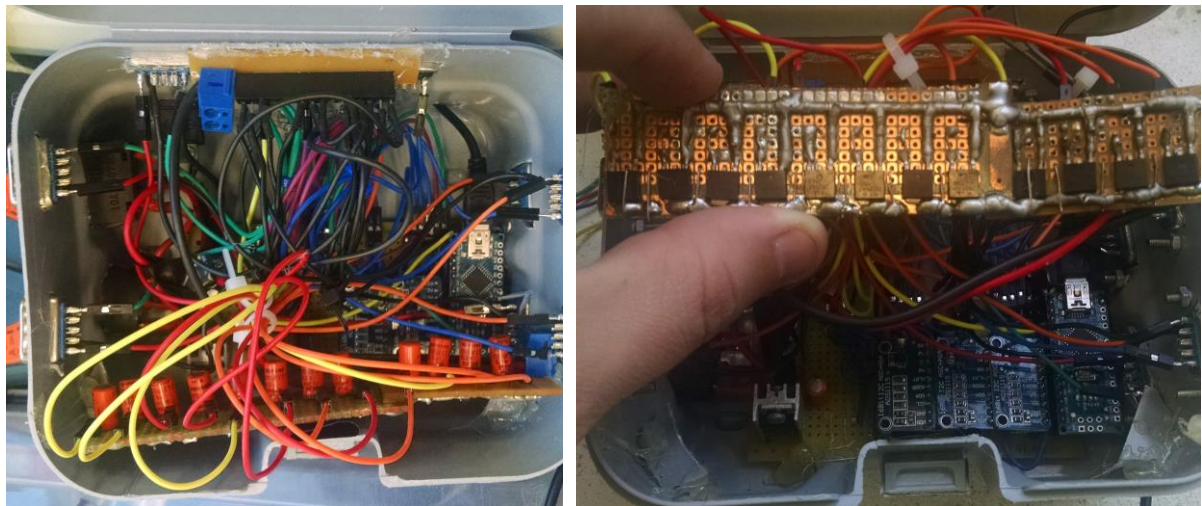


Figura 3-5 Conversor analógico digital ADS 1115.

Almejando aumentar a qualidade do sinal gerado, utilizou-se reguladores de tensão e capacitores, melhorando, assim, o fornecimento de diferença de potencial para os diferentes transdutores. Sendo assim, o aparato utiliza corrente contínua de 12 volts externa e alimenta cada um dos transdutores com 5 volts, logo, um sistema mais robusto nas eventuais flutuações de tensão. O esquema elétrico pode ser visto no Apêndice 2, enquanto na Figura 3-6 é observado os componentes elétricos, em *a* é observado a parte superior e em *b* a parte inferior.



(a)

(b)

Figura 3-6 Interior do sistema de aquisição (a) superior, (b) inferior

Para facilitar o *debugging*, foram instalados dois LEDs no sistema – um verde e outro amarelo. Quando o sistema está alimentado via USB o LED verde se ligará, caso o LED amarelo esteja aceso continuamente, o sistema não está sendo alimentado via fonte externa. Quando o sistema está ok e em *stand by* o LED amarelo se apagará, e por fim quando o sistema estiver ativo, comunicando via USB, o LED amarelo ficará piscando. Esta pequena solução é necessária pois caso haja falta de energia no sistema não é evidente à primeira vista onde se encontra o problema, uma vez que pela porta USB os Arduinos são alimentados, enquanto há também uma alimentação externa para os LVTDs, transdutores de pressão e ADS.

Decorrente da necessidade de total automatização do sistema, foi necessário criar um protocolo de comunicação entre o Arduino com o sistema do LabVIEW, cujo protocolo consiste em um

primeiro momento o Arduino mandar o nome do dispositivo e, quando necessário, informar os valores das leituras via comunicação Serial USB. O restante do código criado consiste em uma questão de encontrar qual é a porta e dispositivo correto de cada um dos pinos no hardware, e então enviar uma mensagem via comunicação Serial para o LabVIEW com todas as leituras. O código do Arduino pode ser visto no Apêndice 2, o restante do código do LabVIEW será descrito na sessão referente ao Triaxial Cúbico, bem como na sessão específica sobre a comunicação entre os hardwares.

3.3 SISTEMA DOS ATUADORES

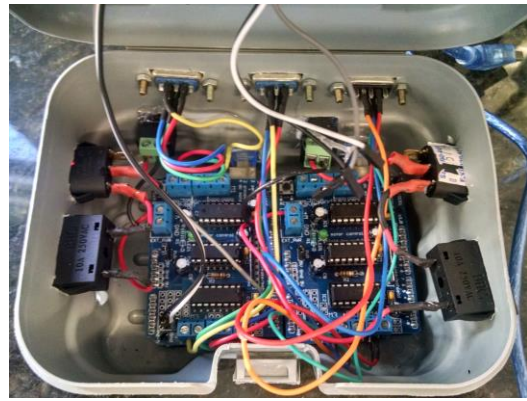
A fim de diminuir a influência de um controlador humano em ensaios e deixar os resultados mais replicáveis, foi desenvolvido um sistema automatizado para a aplicação das pressões nas amostras do triaxial cúbico. O princípio de funcionamento é controlar via servos motores acoplados ao sistema de engrenagem que, por fim, controlam válvulas de precisão manuais. Estes motores são compostos por uma série de bobinas dispostas ao redor de um eixo, quando aplicado uma corrente elétrica nestas bobinas, é criado um campo magnético forçando este eixo a girar, que dependendo de quais bobinas são ativadas, e a direção da corrente, controla-se a direção do giro. Para fazer estas alterações de corrente nas bobinas automaticamente é necessário o uso de um *driver* que, dependendo de um controlador externo, opera-se o motor fazendo-o girar na direção e quantidade desejada. Por conseguinte, é necessário um microcontrolador para informar a este *driver* qual é a direção e o passo desejado.

Este sistema de atuação tem como componentes: motor de passo NEMA 17, driver L293D e Arduino Uno. Como há a possibilidade de comprar *shield* com *driver* L293D já pronto para facilmente encaixar com o Arduino Uno, optou-se por eles devido ao baixo custo e praticidade. Como cada *shield* controla até dois motores de passo simultaneamente, fez-se necessário a utilização de dois conjuntos de Arduino e *shield* para controlar 3 válvulas. O *shield* oferece duas formas de alimentação, uma gerada pela alimentação do Arduino e outra externa. A alimentação gerada pelo Arduino não é suficiente para os NEMA, tendo em vista que alimentação do Arduino será via USB, que gera somente no máximo 1 Ampere(A) e 5 Volts (V). Assim, optou-se por alimentar os motores com fonte externa, configurada para 12V. Na

Figura 3-7 é exibido o sistema completo. Para facilitar o *troubleshooting* fora instalado dois pares de LEDs, verdes e amarelos, sendo que o verde acende quando o respectivo Arduino está ligado e alimentado, enquanto o amarelo sinaliza sempre que há comunicação com o LABView.



(a)



(b)

Figura 3-7 Sistema de atuação (a) vista exterior, (b) vista interior.

Para fazer a comunicação entre os Arduinos e o LabVIEW, precisou-se criar um protocolo, após o *handshake*, os Arduinos ficam esperando os comandos serem enviados pelo LabVIEW. Estes comandos consistem em informar somente a direção, a velocidade e o tamanho do passo que cada motor deve operar. Devido à comunicação ser serial e feita pela mesma porta, não há como o mesmo Arduino comandar dois motores ao mesmo tempo. Assim, optou-se por fazer pequenos incrementos, não tendo uma grande disparidade entre os comandos desejados. O Arduino que controla as válvulas X e Y foi batizado de *Moradin* enquanto o controlador da Z de *Talos*. Isto se faz necessário para que não seja enviado o comando errado entre os Arduinos, possibilidade alta, uma vez que o operador deve atentar em escolher a porta de comunicação correta durante a etapa de configuração. Estes casos serão mais bem descritos no capítulo que descreve o código do LabVIEW. O código de ambos os Arduinos dos atuadores podem ser vistos no Apêndice.

3.4 CÉLULA CÚBICA

Além dos dispositivos descritos anteriormente, precisou-se do núcleo do equipamento, a parte responsável por acomodar a amostra e possibilitar a transmissão de pressão, bem como a aquisição das translações. O desenvolvimento da célula foi baseado no modelo presente no trabalho de Sadek (2006), utilizando as mesmas dimensões para amostras cúbicas de 100 mm de aresta. O material utilizado foi o Alumínio, que é diferente do Aço Inoxidável utilizado em Sadek (2006), apresentando uma menor massa específica, um módulo de Young de 1/3 o do Aço, porém, e principalmente, com um custo menor para uma durabilidade similar. A Figura 3-8 demonstra a renderização da célula cúbica. No anexo da página 190, encontram-se todos os projetos dela. Também foi adotado no sistema para garantir a drenagem da amostra furos em duas arestas opostas.

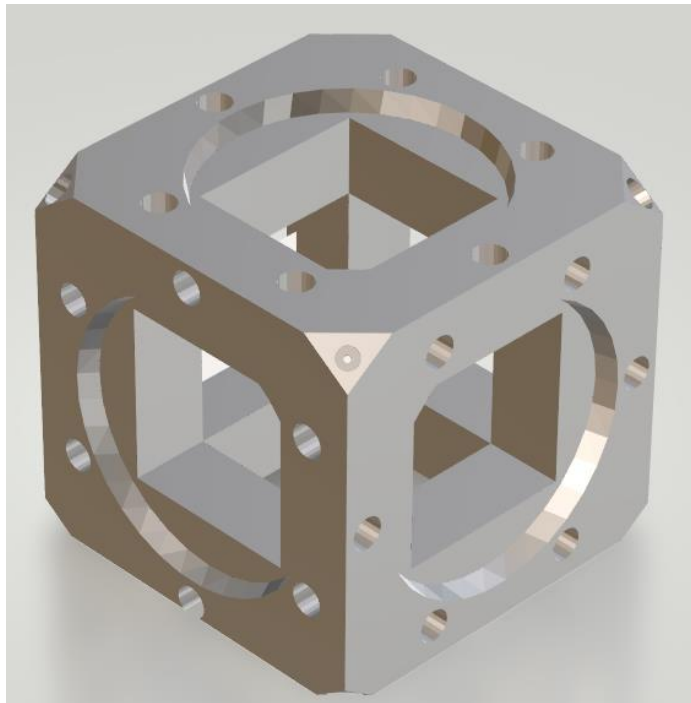


Figura 3-8 Célula cúbica.

Silvani (2017) demonstrou que solos cimentados podem transladar dentro da célula impossibilitando a sua ruptura em casos em que as seis faces são flexíveis, devido a isto, optou-se em utilizar somente três faces flexíveis e outras três restantes rígidas. Desta maneira, pelo

fato de se impor a condição de contorno das faces rígidas, a possibilidade de translação da amostra é impedida, evitando problemas durante a execução e interpretação de ensaios. As faces rígidas foram utilizadas similares do trabalho de Sadek (2006), como pode ser visto na Figura 3-9.

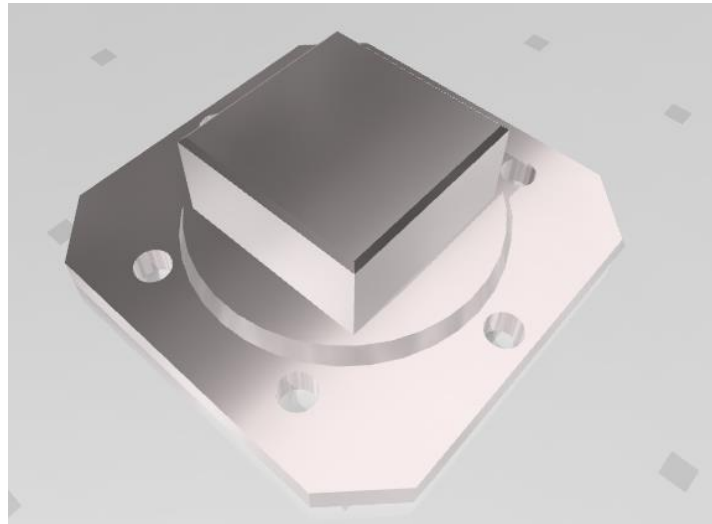


Figura 3-9 Tampa de face rígida.

Devido às dimensões dos LVDTs, que possui curso de 50mm (podendo ser visto na Figura 3-10), resolveu-se nas faces flexíveis do aparato executar uma câmara cilíndrica por face, para alojar a todos e manter a pressão dentro do *cushion* (vide Figura 3-11). Nestas faces ainda foram projetadas três furações, uma para aplicação da pressão, outra para a passagem do cabeamento e, por fim, mais uma para futura aplicação de vácuo, sendo que esta última, durante esta tese, foi utilizada para acoplar transdutor de pressão Ashcroft K1 que pode ser visto na Figura 3-12. Para garantir que não houvesse fuga de pressão devido à passagem dos cabos pela câmara pressurizada, todos os cabos foram passados por um conector de 1/2" polegadas e, então, a passagem foi preenchida de resina epóxi, esta solução pode ser vista na Figura 3-13. Fora passado um total de quinze fios, sendo que para a utilização atual somente será utilizado nove, sendo três para cada um dos três LVDTs, alimentação, terra e sinal. O restante dos fios está à disposição para trabalho futuros como a aplicação de atuadores e sensores piezoelétricos.



Figura 3-10 LVDT Lemaq LR 12-50

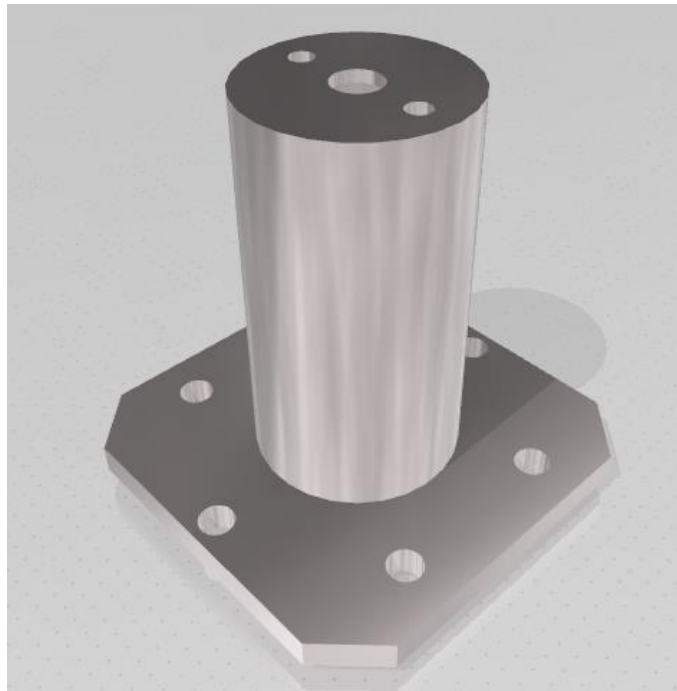


Figura 3-11 Tampa flexível.



Figura 3-12 Transdutor de pressão Ashcroft.



Figura 3-13 Interface entre a parte pressurizada da cartola e parte despressurizada.

Para alojar os LVDTs dentro da câmara pressurizada, um suporte fabricado em acrílica butadieno estireno (ABS) foi projetado via impressora 3D, o suporte que aloja os transdutores da face X pode ser visto na Figura 3-14. Na Figura 3-15 pode ser visto a solução adotada.

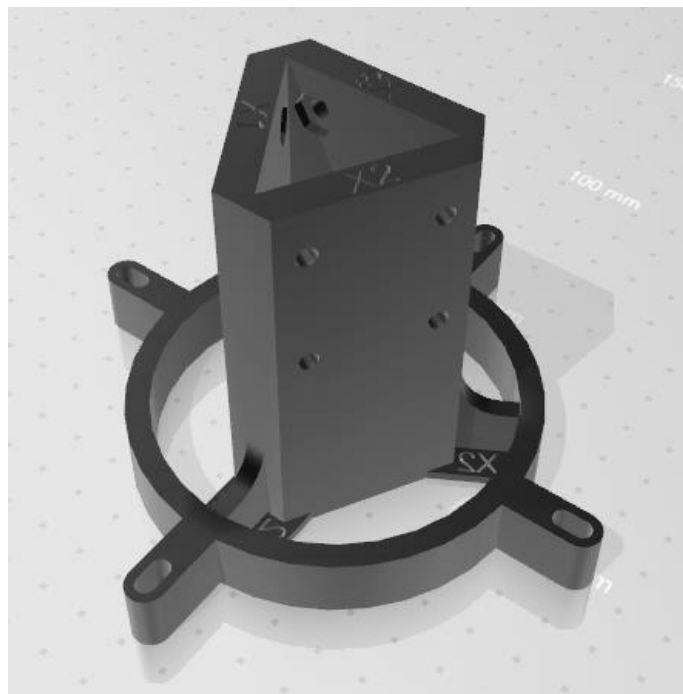


Figura 3-14 Suporte LVDTs.



Figura 3-15 Suporte com LVDTs (esquerda), tampa flexível (centro), conjunto montado (direita).

Para o controle das pressões na célula cúbica, uma válvula de precisão manual Norgren 11-018-110 foi utilizada, conforme é apresentada na Figura 3-16. A fim de automatizar o sistema, motores de passo NEMA 17 de 1,8 A, com 4,5 kg.cm de torque foram adquiridos (vide Figura 3-17). Projetou-se um sistema para acoplar ambos os dispositivos, tal sistema é composto de um conjunto de duas engrenagens e um suporte para encaixe na válvula. Para aumentar a sensibilidade do sistema e aumentar o torque do motor, engrenagens de diâmetros distintos em relação de 4:1 foram projetadas. Estas peças foram impressas novamente em ABS e podem ser vistas na Figura 3-18. A fixação da peça *a* é feita diretamente no eixo do motor, a engrenagem *b* é fixada por cola de silicone concentricamente com o aplicador manual da válvula de precisão, enquanto o suporte *c* é fixado graças à rosca e porca já presentes na própria válvula proporcional. O sistema montado pode ser visto na Figura 3-19.

O motor de passo utilizado em conjunto como *driver* – descrito na seção anterior – consegue exprimir 200 passos para uma revolução e, em conjunto com a redução das engrenagens,

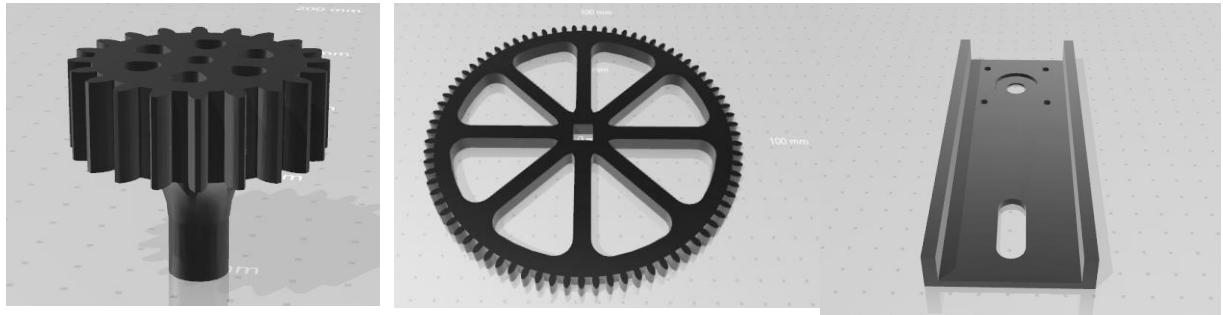
exigem um total de 800 passos para uma revolução da válvula. Devido a estes fatores, a precisão do sistema de atuação chega a aproximadamente 0,4 kPa, valor inalcançável de forma fiável manualmente, valor limitado à imprecisão decorrente dos transdutores de pressão utilizados (0,5 %).



Figura 3-16 Válvula de precisão.



Figura 3-17 Motor de passo.



(a)

(b)

(c)

Figura 3-18 Engrenagem motor de passo (a), engrenagem da válvula (b) e suporte motor de passo (c).

Para a pressão ser aplicada à amostra no núcleo da célula, é necessária uma interface entre a pressurização de ar e amostra. Neste âmbito, Sadek (2006) utilizou almofadas (*cushions*) fabricadas em silicone e com formas em metal, neste trabalho foi utilizado, novamente, Alumínio devido ao custo reduzido de trabalhabilidade. As formas das interfaces, bem como uma interface executada, podem ser vistas na Figura 3-20. Para o controle da espessura da face que interage com o corpo de prova foram previstos dois parafusos Allen sem cabeça para o ajuste. Diferente do modelo de Sadek (2006), foram utilizadas paredes laterais com maior espessura (1,5mm) para reduzir a quantidade de interfaces perdidas por ensaio.

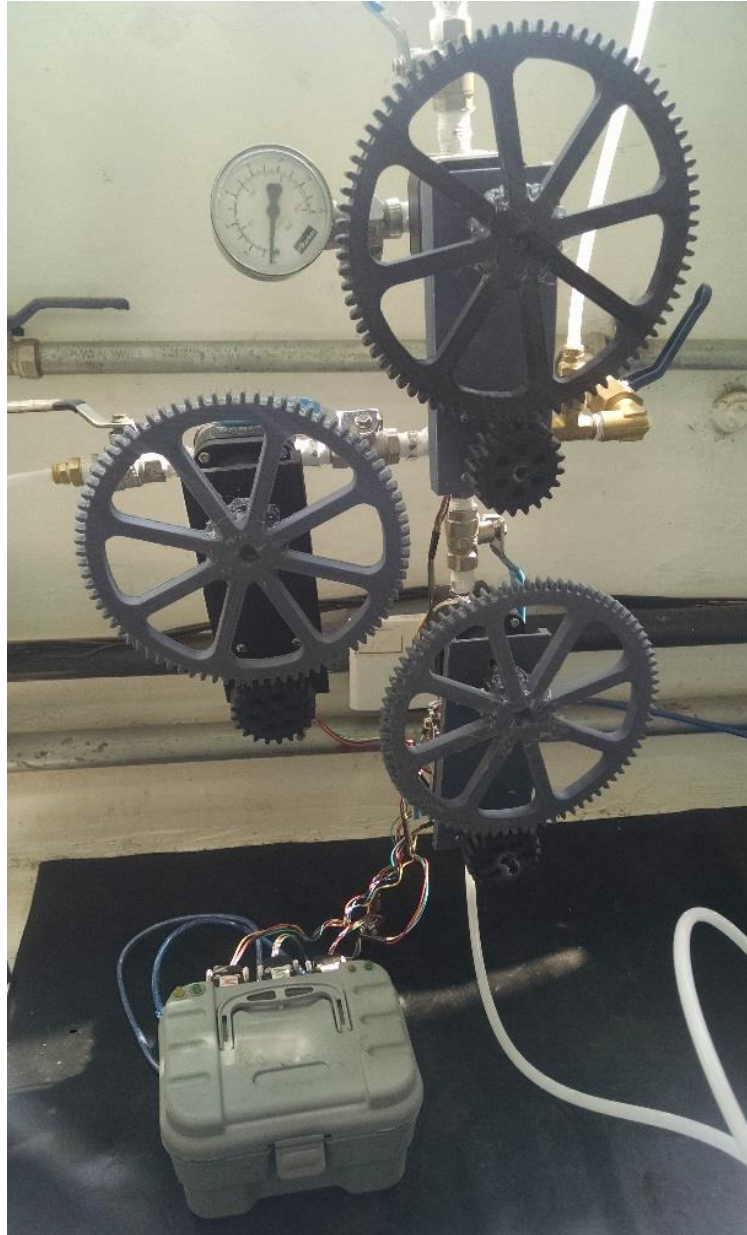


Figura 3-19 Sistema de controle de pressões.

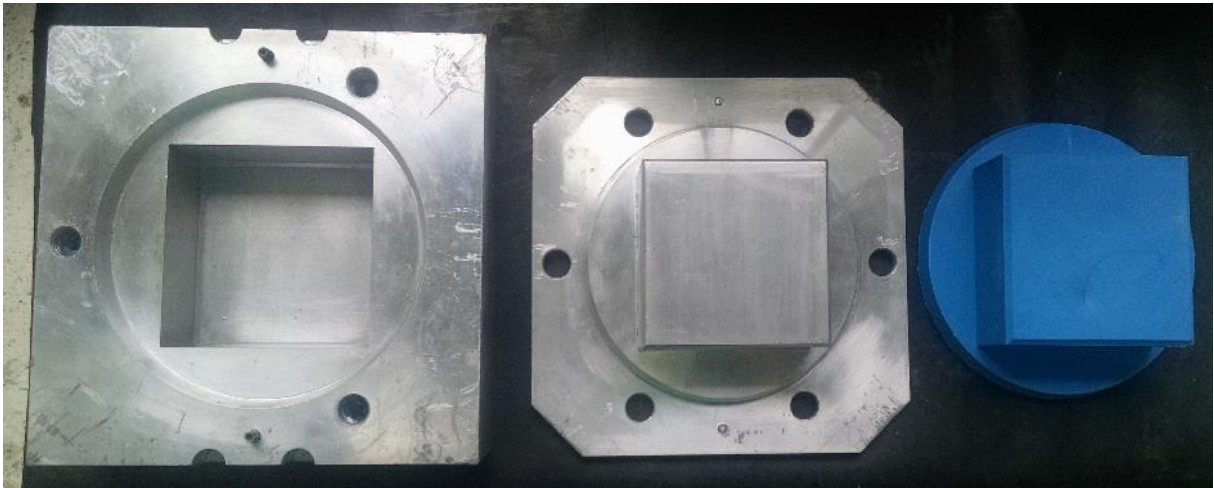


Figura 3-20 Formas inferior (esquerda), forma superior (centro) e interface pronta (direita).

O material para a execução *cushions* utilizado em Sadek (2006) fora um silicone semi-cristalino que possui tempo de moldagem de 30 minutos e cura de um dia. Para este trabalho utilizou-se outro tipo de silicone com custo monetário sete vezes inferior, também se trata do mesmo polímero, entretanto o catalizador é bastante diferente. O catalizador deste trabalho fornece somente 8 minutos de moldagem e cura de cinco dias, o conjunto utilizado foi o RX32 da Redelease. Devido a este baixo tempo de preparo, foi preciso aumentar a espessura dos *cushions*, dado que não é possível garantir que não sejam formadas bolhas; entretanto, após vários testes falhos, esta abordagem se mostrou eficaz.

Outra solução tomada para a fabricação dos *cushions* – diferente da tomada por Sadek (2006) – foi a impressão de um colar para conter o material que sobra e, principalmente, controlar tanto a espessura do *cushion* quanto a planicidade da amostra, tendo em vista novamente o pouco tempo de trabalho que se tem com o preparo do silicone. Assim, o processo inteiro consiste em:

- 1- Limpeza das formas, aplicação do desmoldante e separação de todas as ferramentas necessárias para a moldagem.
- 2- Pesagem do pré-polímero e catalizador como recomendado pelo fabricante.
- 3- Mistura do pré-polímero e catalizador vagorosamente por 2 min.
- 4- Despejo da mistura na forma e furação das bolhas visíveis com a própria colher de mistura.

- 5- Colocação da tampa e aperto dos parafusos até no máximo 4min após o início da mistura.
- 6- Cura por 1 dia e desmoldagem. Restante da cura por mais 4 dias para sua utilização.

A Figura 3-21 apresenta todos os insumos necessários para a fabricação de um *cushion*. Nela, estão apresentados – da esquerda para a direita – pré-polímero, catalizador, desmoldante e parafusos acima e, abaixo, a tampa, o molde e o *cushion* antes de ser cortado as sobras.

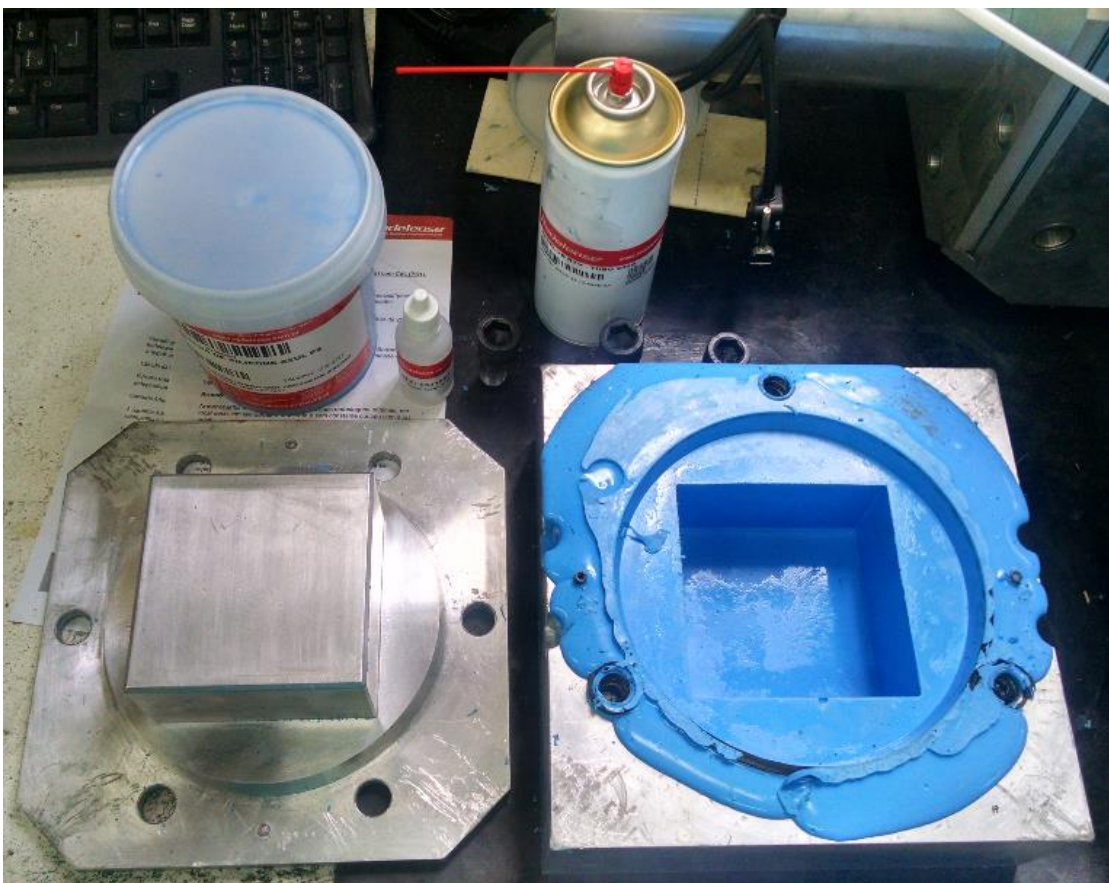


Figura 3-21 Moldagem *cushion*.

A composição total dos hardwares inclusos no equipamento do triaxial cúbico são: célula estrutural, três tampas rígidas, três tampas flexíveis, três suportes para LVDTs, nove LVDTs, três interfaces ar-solo, um molde para as interfaces, três transdutores de pressão, três conjuntos de atuação (engrenagens, suporte, motor e válvulas de precisão), um sistema de atuação e a

aquisição. Além dos componentes principais também foram feitos os cabamentos e conexões. Todos estes componentes podem ser vistos desconectados na Figura 3-22.

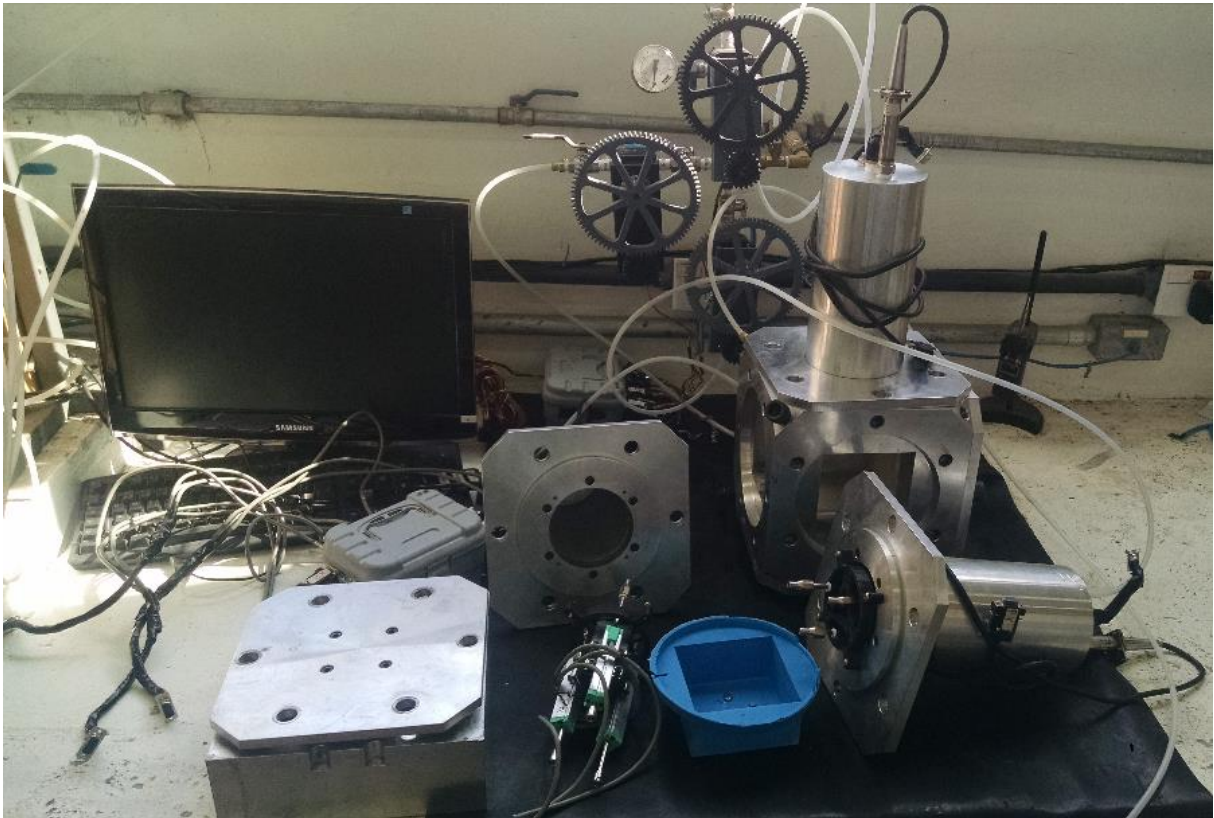


Figura 3-22 Componentes triaxial cúbico.

Por fim, para poder moldar amostras de areia solta e outros materiais que têm baixa coesão, foram projetadas tampas removíveis similares às rígidas, porém impressas em 3d. O processo de moldagem consiste em deixar todas as tampas rígidas, impressas e em alumínio, fixadas somente com a abertura vertical superior aberta. Assim, o corpo de prova pode ser moldado no átrio do equipamento e, com auxílio da umidade advinda da mistura, a amostra fica indeformada para que as tampas impressas possam ser removidas. A Figura 3-23 ilustra a tampa que foi impressa em três partes: uma parte maciça superior que terá contato direto com o corpo de prova e duas outras partes que se unem por parafusos para completar o corpo de apoio.

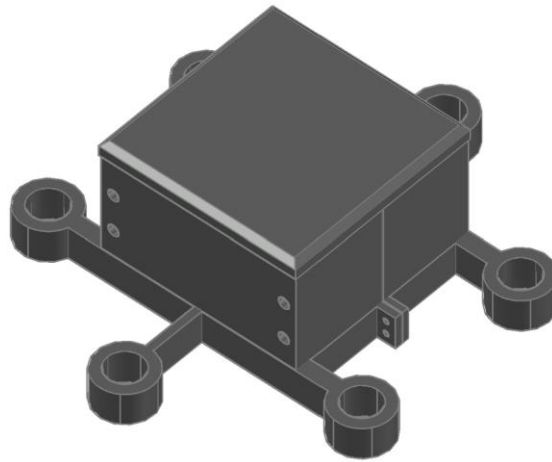


Figura 3-23 Tampa para montagem de amostra.

3.5 SOFTWARE DE CONTROLE E MONITORAMENTO

Para fazer a automatização e reduzir a inserção de erros na execução de ensaios decorrentes de fatores humanos, um software de controle e monitoramento para o aparato triaxial cúbico foi projetado. A linguagem escolhida foi a LabVIEW, que fornece ao usuário uma programação de alto nível de forma de blocos, em que sua representação é bem similar a um sistema elétrico, o que facilita sua escrita para usuários mesmo os que possuam pouca familiaridade com programação. Esta linguagem é proprietária da *National Instruments* e é bastante utilizada em aplicações laboratoriais, tendo em vista a facilidade que ela apresenta em se integrar com equipamentos, especialmente quando utilizado o hardware fornecido pela empresa. Neste software é feito tanto o painel frontal, que será exibido para o usuário, quanto a programação mais profunda em diagrama de blocos; estes dois componentes podem ser vistos na Figura 3-24.

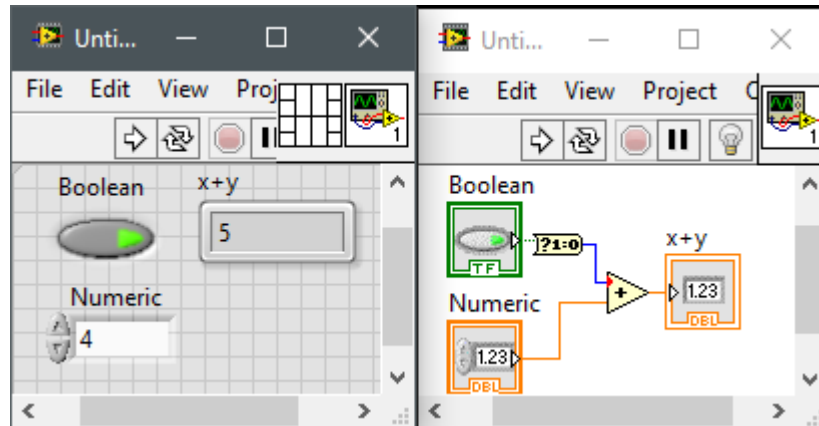


Figura 3-24 LabVIEW painel frontal (esquerda) e diagrama de blocos (direita).

Para facilitar a compreensão de seu código, o LabVIEW incentiva a utilização de Instrumentos Virtuais (VI) e sub Instrumentos Virtuais (subVI), tendo em vista que em programas completos a sua interpretação fica dificultada. Assim, os fabricantes recomendam agrupar partes do código em subVI para modular a compreensão do software.

3.5.1 Comunicação computador Arduino

O primeiro sistema elaborado fora para fazer a comunicação entre os hardwares. Como já falado na descrição do sistema de aquisição, a comunicação feita entre o software do computador e o Arduino fora feita via comunicação serial. Para que a comunicação serial seja feita por parte do LabVIEW é necessário utilizar o *add-on* VISA, que pode ser adquirido de forma gratuita pelo fabricante, enquanto no Arduino o suporte já é nativo. Neste tipo de comunicação as informações são repassadas *bit a bit*, em série, em uma taxa de comunicação (*baud rate*) que a princípio deve ser sincronizada entre os dois hardwares. Em uma analogia, seria tal qual dois dançarinos dançando ao som de uma mesma sinfonia e a cada batida do bumbo é feito um passo. Da mesma maneira que os dançarinos podem sair de ritmo, os hardwares podem ter erro de sincronia, que leva a manobras mal executadas, cujo primeiro se manifesta em uma colisão nos membros inferiores, enquanto para o segundo pode, limitadamente, comprometer um ensaio em sua totalidade.

Em hardwares, a “batida do bumbo” é conhecida como *clock*, e cada dispositivo tem uma maneira diferente de controlar a frequência de suas contagens. Devido às próprias variedades naturais em manufaturas dos dispositivos, há naturalmente uma tendência de haver uma dissonância na frequência do *clock*, cujo dispositivo programado para operar em 32 Mhz pode com facilidade estar trabalhando a 32,001 Mhz ou 31,999 Mhz. Devido aos diferentes dispositivos apresentarem fisicamente *clocks* distintos é de se esperar que haja erros de comunicação, tal qual à analogia dos dançarinos, é esperar que ambos dance em sincronia com os olhos e orelhas tapadas, somente contando o compasso naturalmente. Por estes, motivos sistemas que dependem somente do *baud rate* em comunicação serial serem muito propensos a erros, porém há maneiras de contornar esta susceptibilidade.

Nesta tese, foram utilizadas duas maneiras de garantir a sincronia dos sistemas. Para a comunicação com o sistema de aquisição, o sincronismo foi adquirido a partir da utilização do *clock* somente do computador, uma vez que, no Arduino a aquisição e comunicação só são realizadas no momento que a comunicação advinda do LabVIEW chega. Assim, durante toda operação o Arduino fica em *stand by* não sendo processado; no evento de receber uma mensagem do LabVIEW é, então, ativado fazendo as leituras e enviando-as para o computador. Voltando à analogia, os dois dançarinos estariam se movendo somente quando o condutor se mover, não dependendo do segundo ouvir a música, garantindo a sincronia deles.

Entre o computador e os Arduinos dos atuadores, o protocolo de comunicação foi diferenciado, pois há mais de um tipo de função executada por estes motores além de seu acionamento ser intermitente. Como os motores podem ser acionados para direções diferentes, há a necessidade de prever uma comunicação em que este tipo de situação seja possível. Assim, no código do Arduino foram previstas duas situações para Talos, cujo motor seria acionado dando passo para frente ou passo para trás, enquanto Moradin possui quatro situações possíveis, por possuir dois motores, duas direções dos passos. Foi possível notar que, após um tempo do sistema sendo utilizado, erros estavam sendo gerados durante a comunicação, oriundos possivelmente da falta de sincronia e/ou corrupção dos dados entre os sistemas, fazendo com que os atuadores ficassem parados, sendo necessária a reinicialização forçada da comunicação. Isso acontecia devido a um pequeno erro de um *bit* gerar um efeito cascata de erros, por exemplo a mensagem “1[enter]” após um erro seria interpretada “#[espaço]”, e todas as mensagens seguintes seriam

interpretadas da mesma maneira, assim, uma vez que o erro aconteça, somente a reinicialização total da comunicação restaurá-la-ia.

Como a completa remoção de erros de comunicação é impossível, um sistema que prevê estes erros foi programado e, automaticamente, os corrige. Isso foi obtido utilizando um protocolo de comunicação que espera um caractere de começo de mensagem e outro de final. Assim, quando acontecer erros na comunicação, mensagens que possuem erros serão ignoradas pelo Arduino e, após outra iteração do computador, a mensagem correta novamente é enviada até não ser mais necessária. Exemplificando, caso a mensagem esperada seja “<1,0>” e a comunicação recebida seja “abc<1,0>xyz”, os primeiros e últimos caracteres seriam ignorados e somente a mensagem correta seria processada. Novamente, utilizando a analogia, quando o condutor produzir algum movimento estranho, o conduzido vai ignorar aquele movimento e esperar pela próxima condução, em vez de ficar estático até iniciar a nova música.

Outra fonte de erro de comunicação seria a não detecção dos Arduinos pelo LabVIEW ou, ainda, potencialmente o reconhecimento errôneo de Arduino, visto que em sistemas Windows cada Arduino é reconhecido em uma porta de comunicação COM numerada diferentemente, sendo esta numeração facilmente trocada caso o usuário conecte o ele em porta USB diferente. Para que isto não aconteça fora criado um subVI que tem como função verificar se os Arduinos estão conectados nas portas corretas e presentes. Logo, quando a comunicação entre Arduino e LabVIEW é iniciada, popularmente conhecido como *handshake*, a primeira mensagem enviada por cada um dos três Arduinos é seu respectivo nome e, então, é avaliado se o Arduino esperado está na porta COM correta. Esta parte do código pode ser visto na Figura 3-25. Recordando a analogia, neste caso, os condutores ao apertar e cumprimentar, as conduzidas já respondem com o nome, sendo que cada um dos três esperam somente uma conduzida específica. Caso estejam com a conduzida errada, ou não encontram, sua conduzida ficam estáticos e não iniciam a dança.

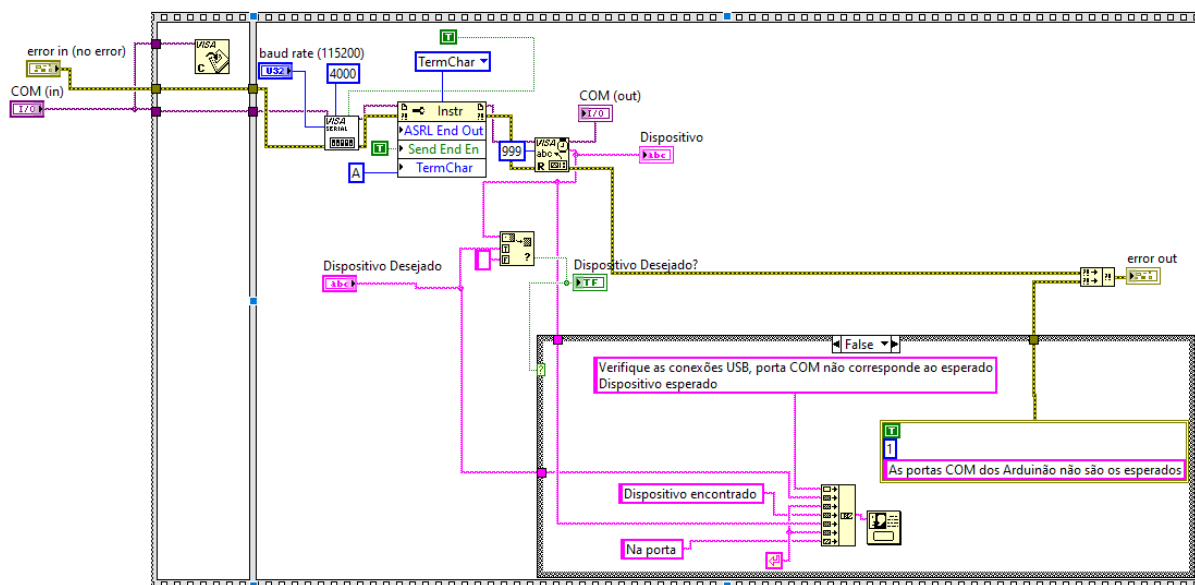


Figura 3-25 Iniciador de comunicação.

3.5.2 Sistema de leituras

Quando solicitados pelo LabVIEW, os Arduinos fazem as leituras por meio dos ADS 1115 e comunicam via porta serial os 15 *bits* de leitura de cada um dos doze canais. Estas leituras precisam ser calibradas e convertidas em valores de deslocamentos e pressões, respectivamente, por meio dos LVDTs e transdutores de pressão. Assim, foi desenvolvido uma subVI que obtém estas leituras brutas e as processam em canais separados e em valores numéricos, para que possam ser devidamente calibradas, onde parte do código pode ser visto na Figura 3-26.

Um pequeno programa foi feito para fazer as leituras separadamente e escrever o arquivo com os valores de calibração para utilizações futuras. No painel frontal, o usuário pode editar os valores tanto do coeficiente linear quanto escalar do transdutor, se o usuário preferir pode inserir os valores manualmente em uma lista em .xls para ser convertido no modo que o programa utiliza. Esta parte do software pode ser vista na Figura 3-27.

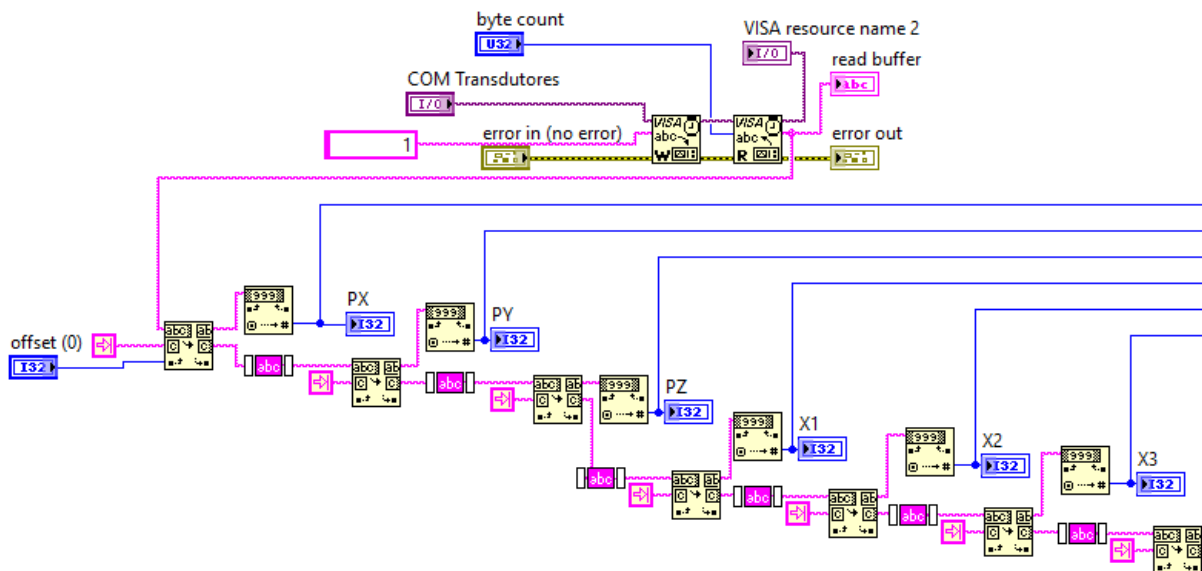


Figura 3-26 Aquisição leitura.

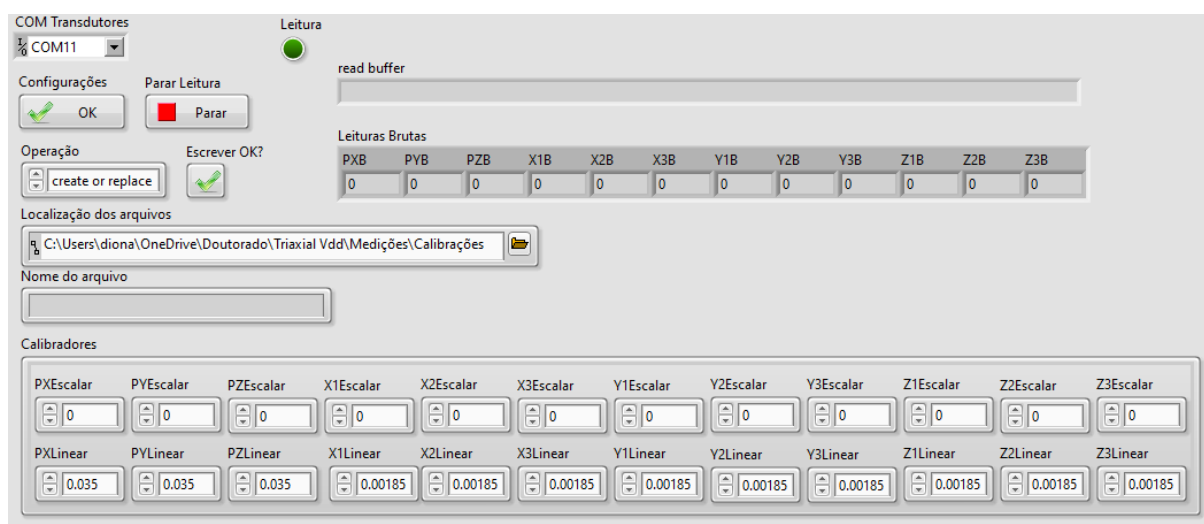


Figura 3-27 Leitor e criador da calibração.

Os LVDTs foram calibrados utilizando um micrômetro com ao menos vinte pontos, uma representação do esquema pode ser vista na Figura 3-28, sendo cada um dos LVDTs ligados nas respectivas portas no sistema de aquisição. Os resultados obtidos geram um R^2 de pelo menos 0,9999, mesmo utilizando LVDTs de valor de quase um terço do custo dos utilizados por outros equipamentos. Os transdutores de pressão foram calibrados utilizando outro leitor

de pressão com vinte pontos, neste caso, o R^2 garantido pelo fabricante de 0,995 foi obtido e foi possível notar que a quantidade de ruído, quando medida, fica em torno de 0,5 kPa.



Figura 3-28 Micrômetro com LVDT.

Com a calibração pronta, foi desenvolvido o subVI que transforma as leituras brutas advindas do Arduino em valores palpáveis ao usuário, o qual subVI pode ser visto na Figura 3-29.

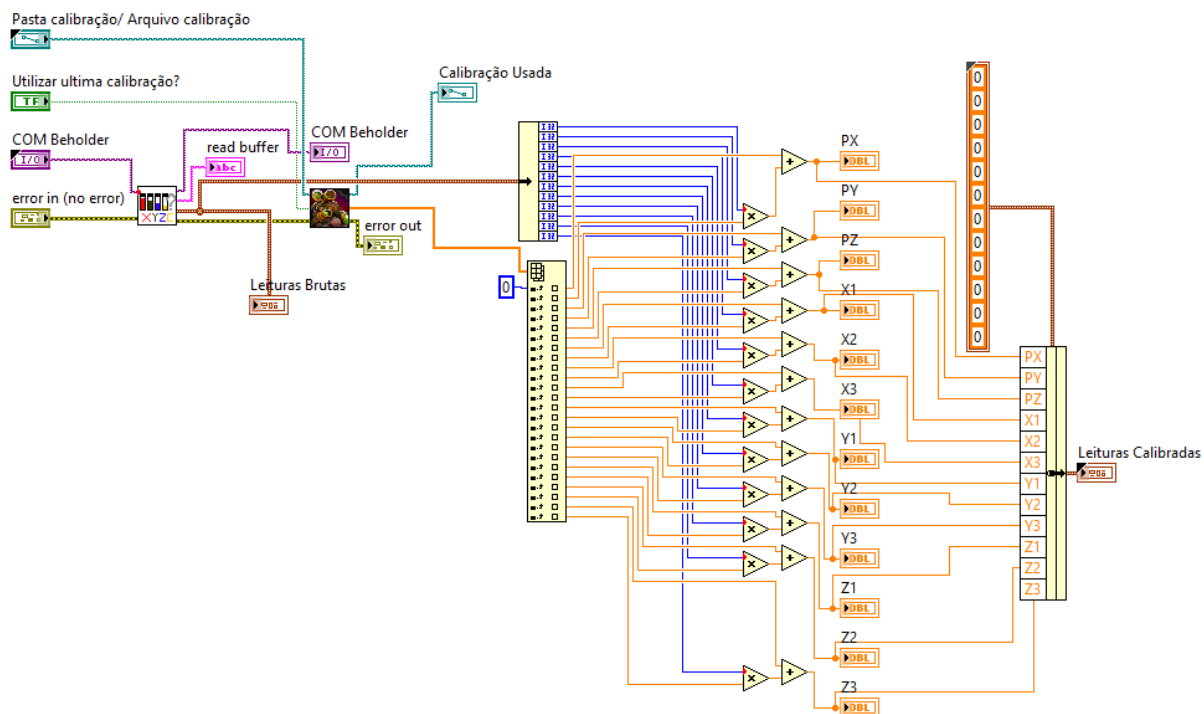


Figura 3-29 Calibrador.

3.5.3 Sistema de atuação

Tendo o sistema de leitura operante para fornecer o *feedback* aos atuadores, desenvolveu-se o software de controle. Seu princípio de atuação envolve enviar comandos para os Arduinos, instruindo-os para girar os motores em um sentido ou outro sentido, até chegar às pressões alvos, como pode ser visto na Figura 3-30. Depois de alguns testes preliminares, resolveu-se utilizar somente um micropasso por iteração e, após esta iteração, esperar meio segundo para o transdutor/válvula de precisão estabilizarem. Esta abordagem levou a uma maior precisão, chegando ao nível de ruído do transdutor de pressão citado no segmento anterior. As iterações só são interrompidas assim que o valor de pressão chega ao alvo com a tolerância escolhida pelo usuário, como pode ser visto na Figura 3-31.

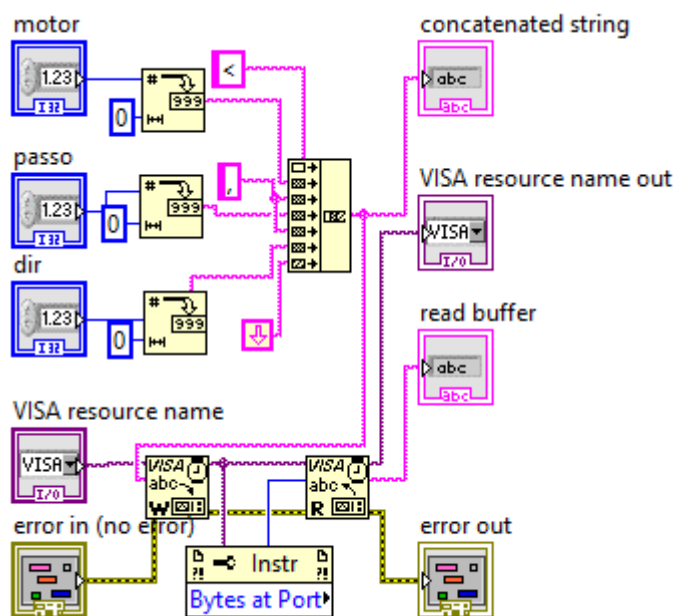


Figura 3-30 Controle motor básico.

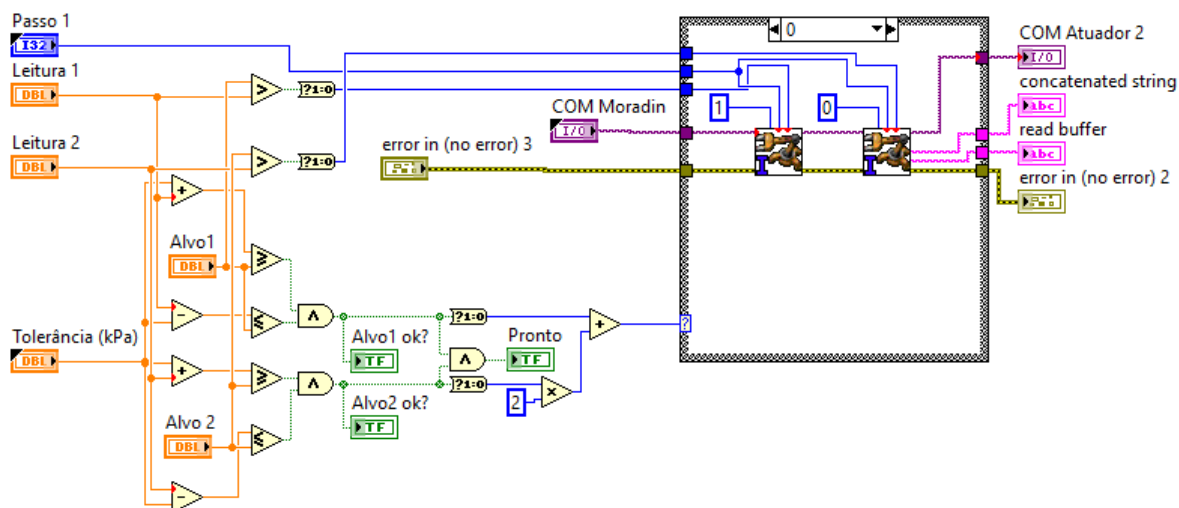


Figura 3-31 Controle motor avançado.

3.5.4 Sistema de principal

Com as funções mais fundamentais prontas, partiu-se a programar a parte mais superficial do software em que o usuário final terá contato. Esta etapa da programação é mais voltada para o usuário final, assim, escolheu-se utilizar somente um painel frontal para todas as aplicações envolvendo as etapas de um ensaio, envolvendo tanto a consolidação, o cisalhamento e potencialmente uma cura sob tensão.

Num primeiro momento, o usuário faz a configuração básica, que consiste em utilizar o último arquivo de calibração ou escolher o desejado pelo usuário, nomear o nome do arquivo dos dados e informar a localização desejada e por fim, caso necessário, informar as portas COM de cada um dos Arduinos. Nenhum destes parâmetros necessita ser informados, pois as configurações originais já impedem bastante as más utilizações do software, sendo o padrão utilizar a calibração mais recente e o nome do arquivo de dados estar vinculado com a data e minutagem do ensaio, impedindo eventuais sobreposições de nome de arquivos ou ainda a não utilização de uma calibração condizente. Esta parte do painel frontal pode ser vista na Figura 3-32.

Após a configuração inicial ser feita, o usuário escolhe qual rotina desejar, atualmente está funcional os módulos de consolidação, cisalhamento e retorno. A escolha da função é feita por

meio de abas e após aparecer as configurações finas para a operação. Na Figura 3-33 os módulos principais podem ser vistos.

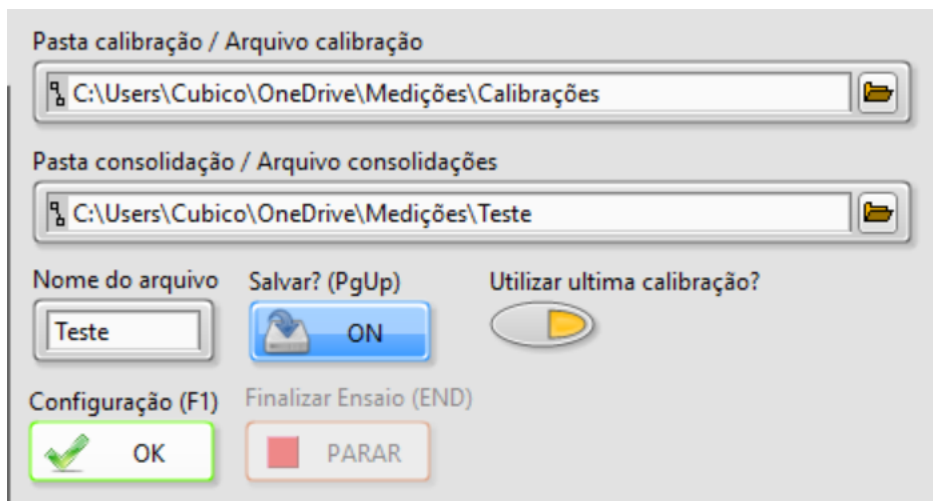


Figura 3-32 Painel frontal com configuração básica.

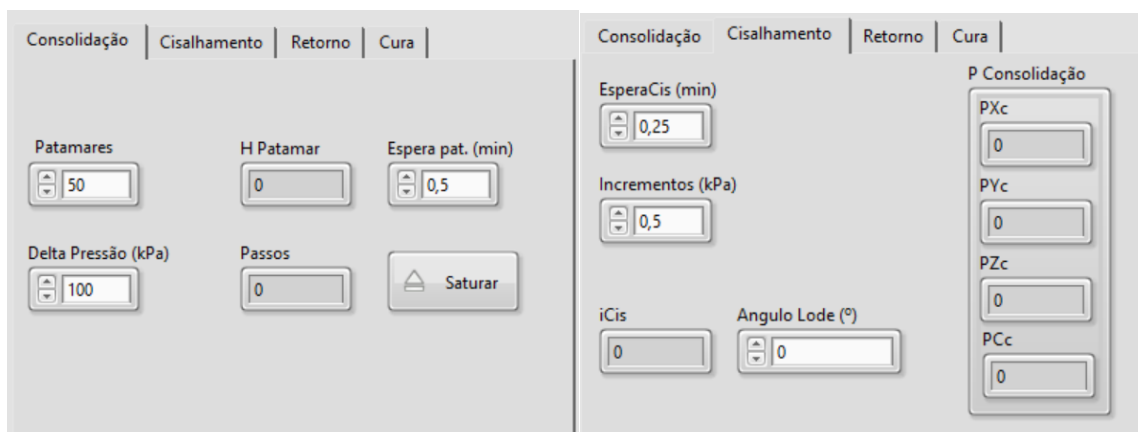


Figura 3-33 Escolha modo de operação consolidação (esquerda) e cisalhamento (direita).

3.5.4.1 Consolidação

Prosseguindo o desenvolvimento do sistema, partiu-se para a potencial primeira etapa do ensaio, a consolidação. Devido à operação dos motores de passo, esta consolidação tem de ser realizada em quantas, sendo o tamanho delas definidas pelo usuário no controlador Patamares, e a confinante alvo em seu respectivo controlador. Também, cabe ao usuário escolher o tempo

de espera entre os patamares por meio de um controlador para este fim. Após estas definições, o usuário executa a rotina para realização da consolidação, neste instante o software calcula o tamanho dos incrementos de pressão e saúda-os a ele. Todos estes controladores e indicadores estão apresentados na Figura 3-33.

Durante esta etapa, oferece-se ao operador as seguintes informações; pressões a serem acompanhadas para acompanhar o ensaio, tanto a atual, quanto a meta instantânea, bem como se está em etapa de espera. Estas informações podem ser vistas na Figura 3-34. Em todo o software manteve-se o padrão de utilizar RGB (*Red, Green and Blue*) para indicar os eixos cartesianos respectivamente X, Y e Z, facilitando a interpretação das informações apresentadas.

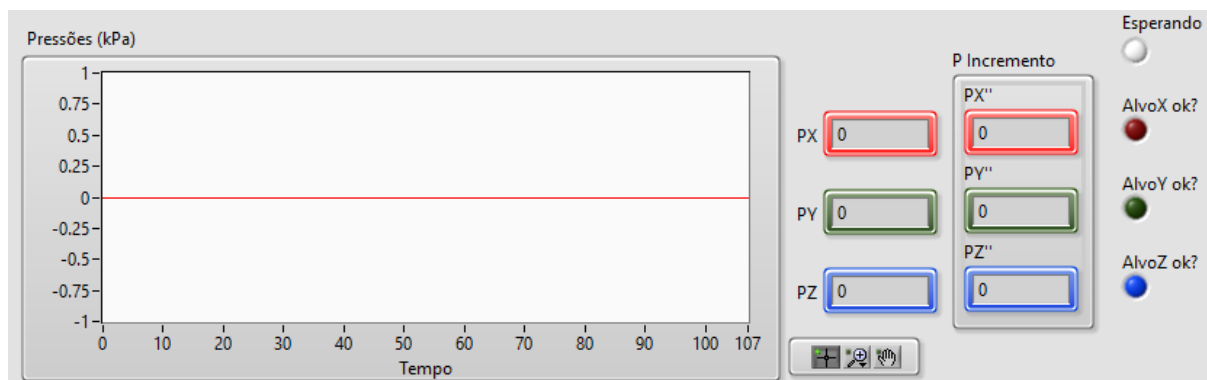


Figura 3-34 Painel acompanhamento de pressões.

3.5.4.2 Cisalhamento

Para o acompanhamento do cisalhamento, além dos dados demonstrados na Figura 3-34, uma forma de acompanhar o deslocamento dos LVDTs foi desenvolvida para acompanhar em tempo real o gráfico q_x e q_z , com as Eq. 12 e Eq. 13 descritas na seção 2.2, estas informações estão expostas na Figura 3-35 e Figura 3-36, respectivamente. Para ajudar o usuário a fazer uma melhor interpretação das informações apresentadas e, principalmente, saber a hora de interromper o cisalhamento, foi feito um módulo para controle visual dos LVDTs, neste módulo, ele pode controlar os valores individuais dos sensores apresentados no gráfico da Figura 3-35, este módulo está presente na Figura 3-37.

Ainda neste módulo, o software compara os valores entre os LVDTs em uma mesma face e, caso for apresentada uma discrepância entre eles, automaticamente é informada esta discrepância e, para o gráfico das médias, é excluído o valor divergente. Esta abordagem se faz necessária devido à possibilidade de haver descolamento entre LVDT e amostra. Ainda, caso tenha algum LVDT que esteja se comportando anormalmente, ele pode ser desativado pelo usuário. Salienta-se que este controle na apresentação dos resultados não será registrado para o arquivo de gravação do ensaio, sendo totalmente perdido após o fechamento do programa, a fim de facilitar a posterior interpretação dos resultados do ensaio de fato.

Devido à natureza dos ensaios de tensão controlada, o critério de falha do material será de fato o deslocamento dele, assim o operador terá de se manter atento durante o cisalhamento para notar quando algum incremento de pressão causar uma deformação exagerada. Para facilitar a interpretação do usuário, um gráfico tensão deformação é apresentado, deixando o comportamento de pico do material mais evidente. Atualmente, este controle é manual, mas a possibilidade de automatização do processo pode ser implementada utilizando uma rigidez relativa por exemplo, podendo, assim, aumentar a qualidade do ensaio realizado, retirando o erro humano na avaliação da falha e ainda possibilitando a reutilização das *cushions*, similar ao utilizado no trabalho de Mandeville e Penumadu (2004).

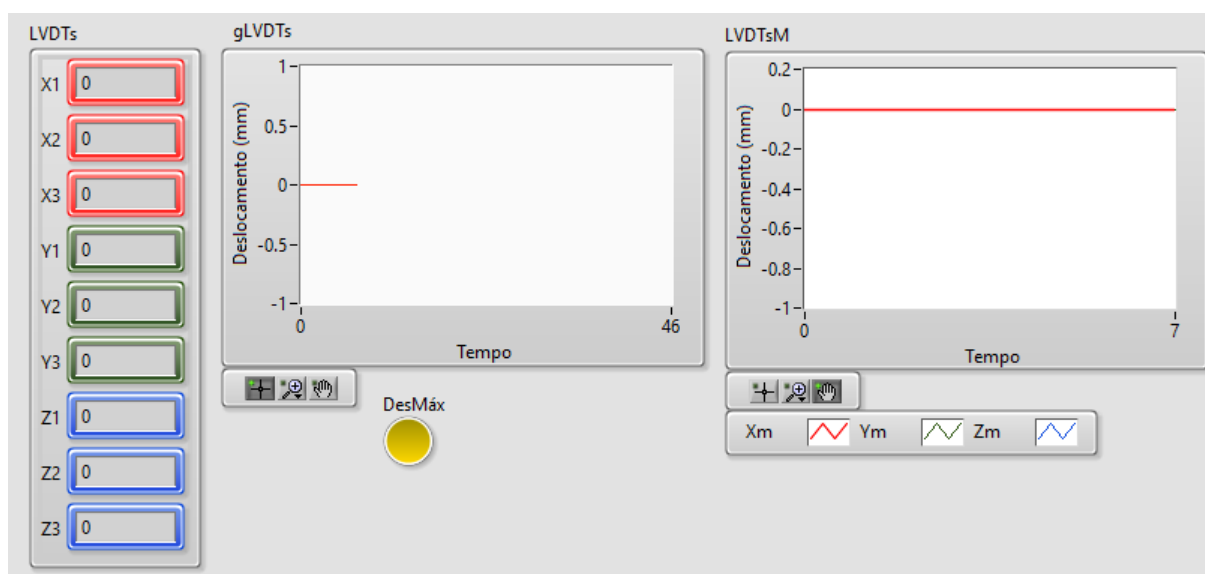


Figura 3-35 Display LVDTs.

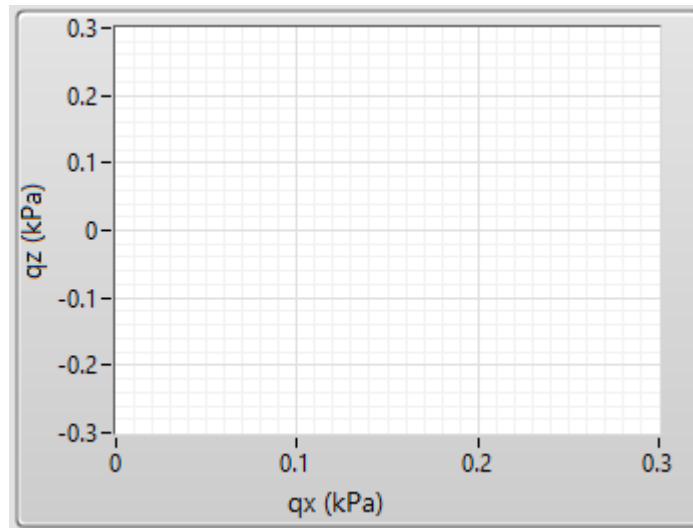


Figura 3-36 Qx e qz.

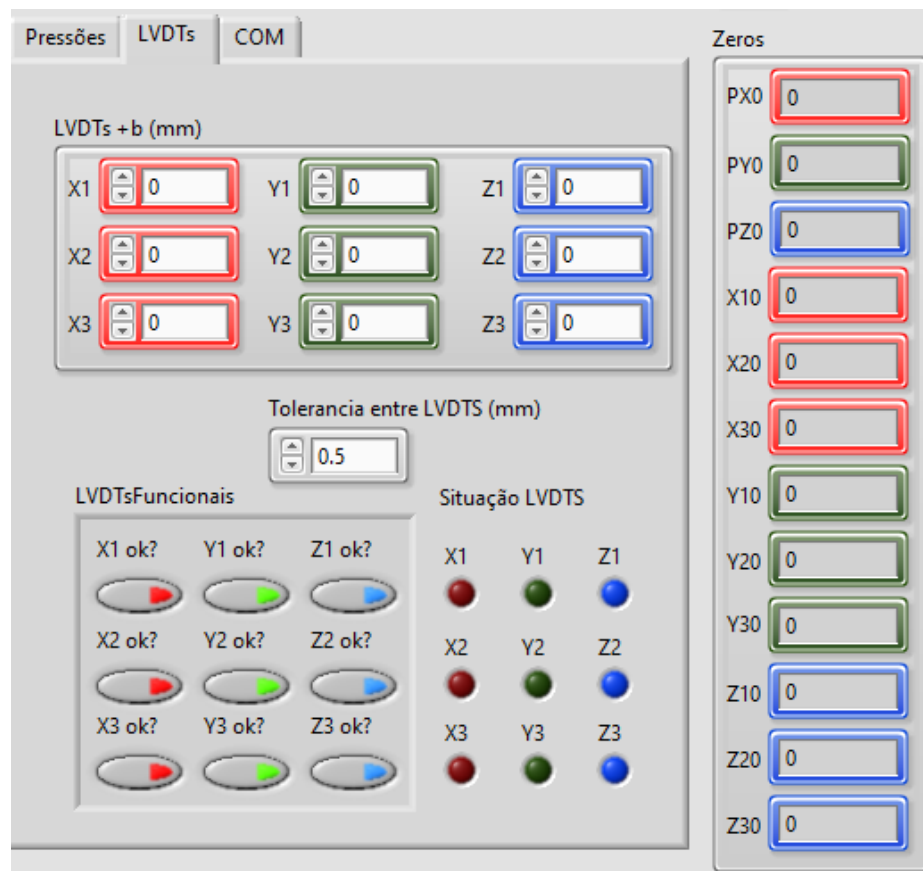


Figura 3-37 Controle LVDTs.

3.6 VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Para validar o equipamento, foram propostas três bateria de ensaios compostas por: uma bateria investigando uma areia fina e comparando com resultados na literatura; uma areia siltosa e comparada com amostra ensaiada em triaxial padrão e, por fim, amostras de areia fina cimentada comparadas também com ensaios triaxiais padrões.

3.6.1 Materiais e métodos.

A areia de Osório, que consiste em uma areia fina limpa uniforme e não contém matéria orgânica, sua curva granulométrica pode ser observada na Figura 3-38 (MARQUES, 2016). Seus grãos são arredondados e, com rugosidade moderada, apresentando um tamanho entre 100 a 150 μm como pode ser vista pela microscopia ótica no trabalho feito por Leon (2018) na Figura 3-39.

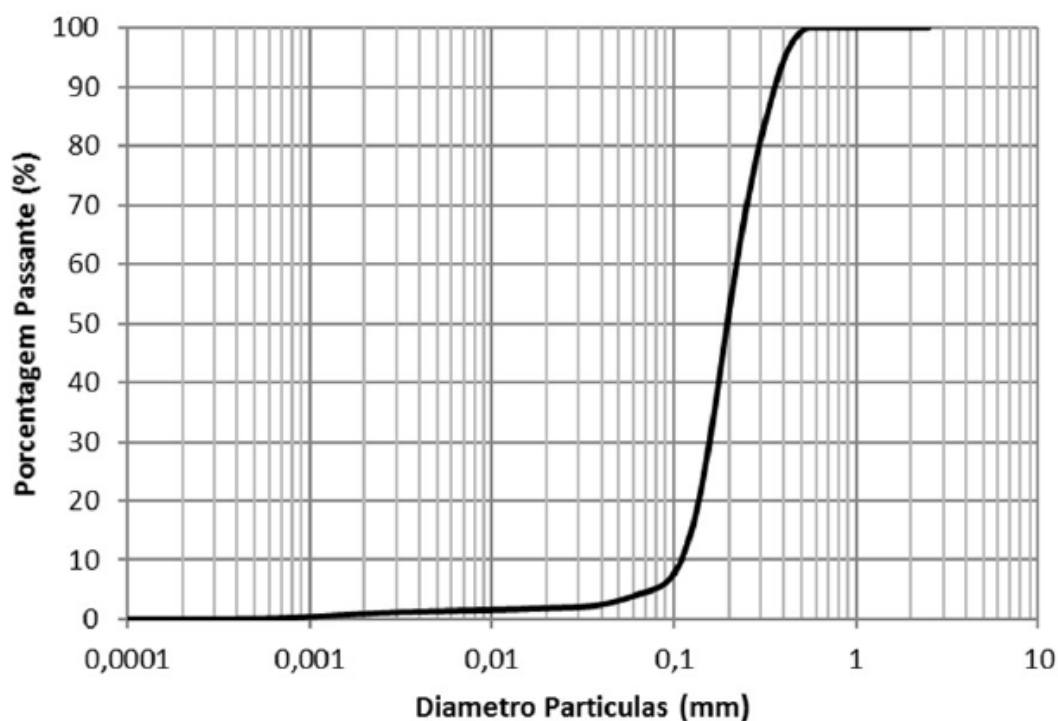


Figura 3-38 Curva granulométrica areia de Osório.

Marques (2016)

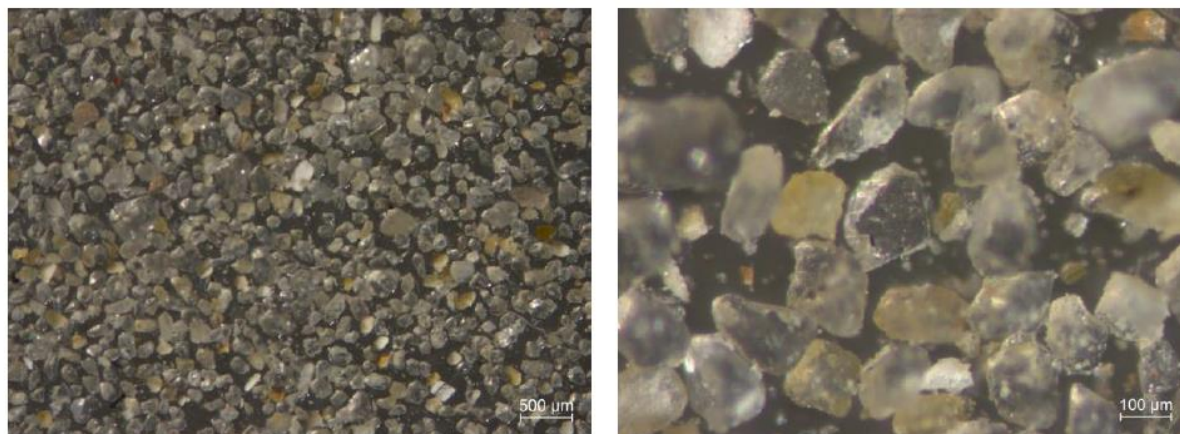


Figura 3-39 Microscopia óptica areia de Osório. Escala de 500 μm (esquerda) 100 μm (direita).

Leon (2018).

O segundo solo utilizado nos ensaios foi uma areia argilosa residual originária de arenito lixiviado, conhecida como areia de arenito Botucatu (BRS) classificada pela ASTM (2006) como *clayey sand*. As propriedades físicas da areia de Osório e da BRS podem ser vistas na Tabela 3-1.

Como agente cimentante, foi utilizado o cimento Portland CP V – ARI padronizado pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), que segundo a ABCP (2002) apresenta resistência aos 7 dias de cura equivalente ao CP III com 28 dias de cura. Desta maneira, é mais conveniente trabalhar com o CP V com 7 dias de cura e 3 dias de cura, sendo que o último pode fornecer resistência suficiente para fazer análises e facilitar a manipulação em laboratório. Também, optou-se em utilizar este mesmo procedimento para poder validar os resultados desta pesquisa com os trabalhos realizados anteriormente.

A água utilizada foi fornecida pelo sistema público de Porto Alegre, cujo processo de destilação foi recebido no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG).

Tabela 3-1 Propriedades físicas dos solos utilizados

Propriedade	Areia de Osório	Areia Residual de Arenito Botucatu (BRS)
Limite de liquidez (%)	-	23
Limite de plasticidade (%)	-	13
Índice de plasticidade (%)	Não plástico	10
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	26,3	26,4
Areia média (0,425 mm < diâmetro < 2,0 mm) (%)	10	6
Areia fina (0,075 mm < diâmetro < 0,425 mm) (%)	82	53
Silte (0,002 mm < diâmetro < 0,075 mm) (%)	6,5	36
Argila (diâmetro < 0,002 mm) (%)	1,5	5
Diâmetro médio das partículas	0,205	0,115
Mineral predominante	Quartzo	Quartzo
Classificação USCS	SP-SM (areia mal graduada com silte)	SC (areia argilosa)

Consoli *et al.* (2009).

Segundo Leon (2018), a massa específica do CP V -ARI utilizando o procedimento preconizado pela NBR 16605 (ABNT, 2017) é de 3,15 g/cm³.

As amostras feitas de areia de Osório não cimentada seguiam o seguinte processo com a areia previamente seca:

- 1- Limpeza do triaxial cúbico e aplicação de vaselina nas paredes que teriam contato com o corpo de prova, bem como onde seriam colocadas as tampas flexíveis.
- 2- Colocação das tampas impressas nas duas laterais horizontais abertas, restando somente a abertura superior exposta, face z, sendo as restantes fixadas com as tampas rígidas de alumínio.
- 3- Pesagem da areia e da água, prosseguindo com sua mistura até obter homogeneidade visual.
- 4- Retirada de cápsulas para avaliação da humidade.
- 5- Pesagem e compactação manual da primeira camada até os 33mm de altura.
- 6- Escarificação da camada com uma faca sem serra em um padrão de # com profundidade de aproximadamente 3mm.
- 7- Pesagem e compactação manual da segunda camada até os 66mm de altura.
- 8- Escarificação da camada com uma faca sem serra em um padrão de x com profundidade de aproximadamente 3mm.
- 9- Pesagem e compactação manual da camada final até os 100mm de altura.
- 10- Retirada das tampas laterais impressas e montagem das tampas flexíveis.
- 11- Aplicação de confinante de 30 kPa.
- 12- Percolação de pelo menos duas vezes o índice de vazios.
- 13- Consolidação e ruptura da amostra.

O processo de moldagem dos corpos de prova para a areia cimentada e para o BRS podem ser descritos em etapas, após cada areia estar devidamente seca:

- 1- Preparação do molde cúbico com desmoldante e montagem que pode ser visto na Figura 3-40.
- 2- Pesagem da areia e, possivelmente, do cimento e sua mistura até a homogeneidade.
- 3- Dosagem da água e mistura com os secos até atingir um material homogêneo.
- 4- Pesagem das camadas e retirada de três capsulas para a determinação da umidade.
- 5- Compactação da primeira camada até a marcação de 33mm.
- 6- Escarificação da primeira camada seguido um padrão de # com perfuração feita por faca sem serra com aproximadamente 3mm.
- 7- Compactação da segunda camada até marcação de 66mm.

- 8- Escarificação da segunda camada seguindo um padrão em x com perfuração feita por faca sem serra com aproximadamente 3mm.
- 9- Compactação da última camada até o corpo de prova ter aproximadamente 110mm.
- 10- Retirada da contenção superior e posterior compactação até a altura de 100mm.
- 11- Isolamento do corpo de prova com dois sacos de polietileno e devidamente amarrado para não se ter perda de umidade para o ambiente. Como pode ser visto na Figura 3-41
- 12- a. Após 1 dia de cura para as amostras cimentadas, retirada do corpo de prova dos sacos, pesagem e retirada de suas dimensões, e então colocadas em sacos de polietileno novamente.
 - b. Para as amostras de BRS, elas eram imediatamente pesadas e retiradas suas dimensões para serem ensacadas.
- 13- a. No sexto dia, a amostra foi imersa em água para sua inundação para as amostras cimentadas e, no sétimo, foram realizadas as rupturas. Silvani (2017) demonstrou a efetividade desse procedimento para saturação de materiais cimentados ensaiados em equipamento análogo.
 - b. Para as amostras de BRS, elas eram colocadas no triaxial cúbico no sexto dia para serem percoladas com no mínimo duas vezes o índice de vazio. No sétimo dia, elas eram rompidas.



Figura 3-40 Molde cúbico metálico.

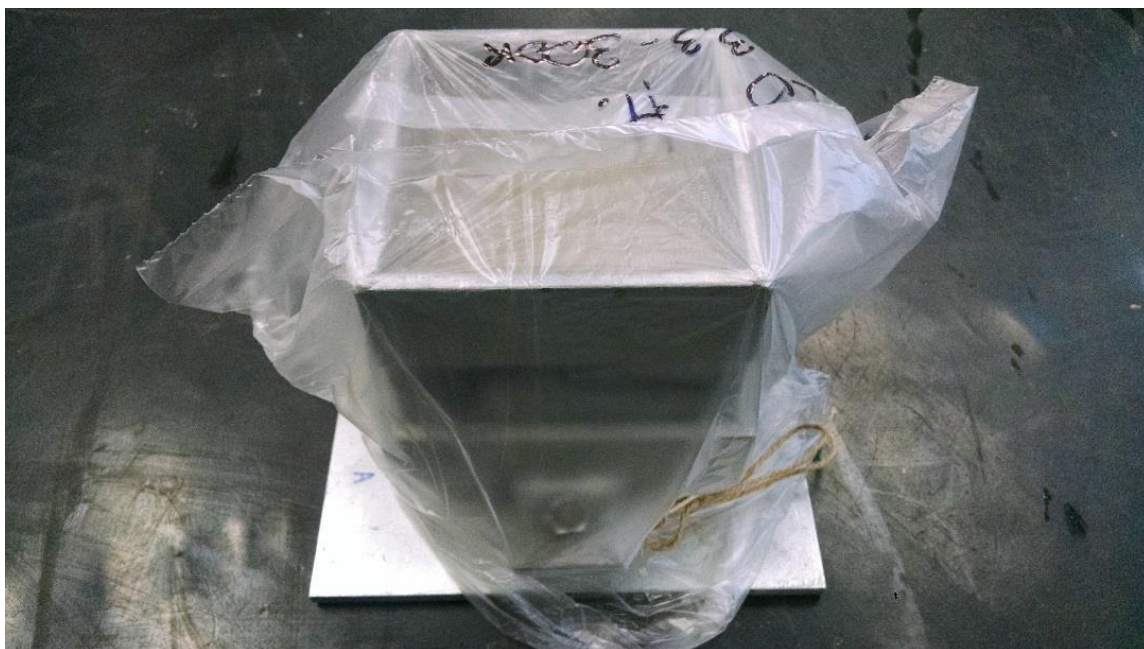


Figura 3-41 Amostra de areia cimentada para triaxial cúbico.

3.6.2 Resultados areia de Osório não cimentada

As amostras deste ensaio foram moldadas objetivando as mesmas propriedades descritas no trabalho de Consoli *et al.* (2009), peso aparente seca de 15 kN/m³ e teor de umidade 10%. A aceitação dos corpos de prova foi de uma variância menor de 0,5% no teor de umidade. O procedimento de ensaio consistiu em aplicar uma pressão confinante de 30 kPa e fazer a percolação até conseguir duas vezes o volume de vazios com uma percolação ascendente.

Após a percolação, foi aplicado o restante da pressão confinante até atingir-se 50, 75 e 100 kPa. O cisalhamento das amostras seguiu uma trajetória onde a tensão vertical fora acrescida a uma taxa de 2kPa/min enquanto as horizontais eram decrescidas em 1kPa/min, fazendo assim uma

trajetória onde a tensão média mantinha-se constante, sendo representada por um valor b de 0 e um ângulo de Lode de 0° . Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 3-42.

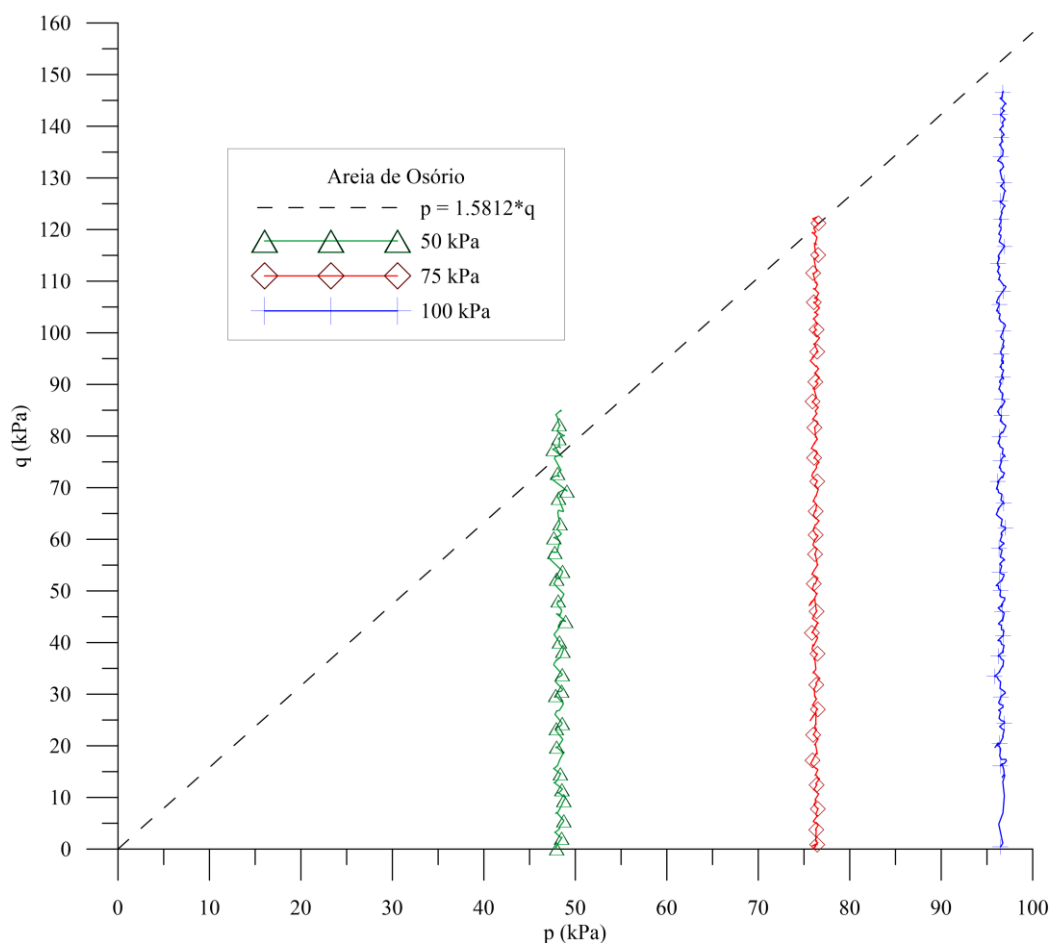


Figura 3-42 Resultados de validação em areia de Osório

Comparando o ângulo de atrito obtido de $38,4^\circ$ com os obtidos por Consoli *et al.* (2009) de 37° , nota-se uma diferença de $1,4^\circ$ que pode ser explicada pelos seguintes fatores, diferente tipo de carregamento, tensão controlada versus pressão controlada, diferente tipo de geometria, amostra cilíndrica contra cúbica, além da variação natural do material.

3.6.3 Resultados com areia de Osório cimentada

Nesta etapa foram feitas amostras com teor de cimento 3,3%, teor de umidade de 8,5% e peso específico aparente seco de 15 kN/m³, e utilizou-se um critério de aceitação de uma variação de 1mm para as dimensões e 0,5% de teor de umidade. Iniciou-se com a preparação das amostras básicas de comparação, cilíndricas com 200mm de altura e 100mm de diâmetro, sendo ensaiadas em um triaxial tradicional com tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa, e utilizou-se uma saturação de 300kPa com parâmetros B de Skempton superiores a 0,99 e a trajetória corresponde a um incremento na tensão vertical enquanto é reduzida a tensão confinante efetiva para manter-se constante a tensão média, com ângulo de Lode 0°.

Também foram feitas amostras cúbicas com arestas de 100mm, em diferentes tensões confinantes 50, 75, 100, 125, 150 kPa, totalizando nove amostras totais. O compilado dos resultados pode ser visto na Figura 3-43.

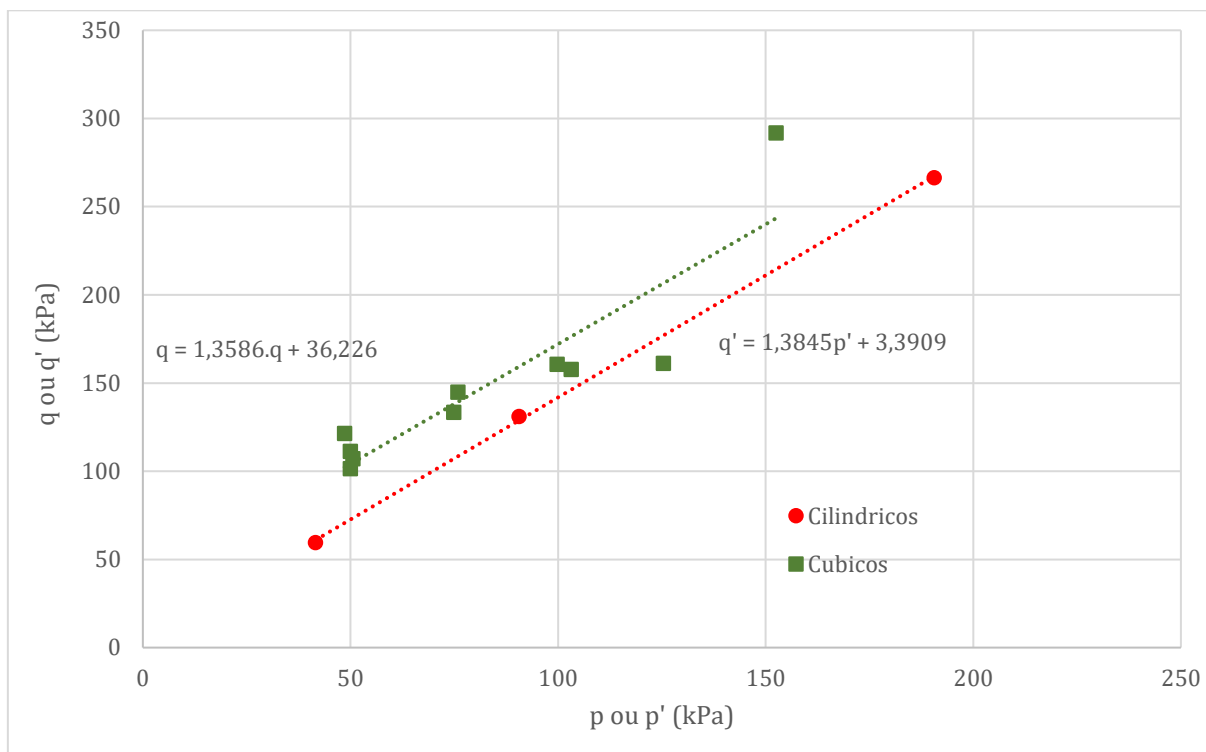


Figura 3-43 Resultado dos triaxiais de validação em areia de Osório cimentada.

Convergindo os resultados em ângulo de atrito e coesão, os valores correspondentes são respectivamente $33,6^\circ$ e $3,3$ kPa para os resultados obtidos do triaxial convencional e de $34,2^\circ$ e $8,4$ kPa para os obtidos no triaxial verdadeiro, estando o valor do ângulo de atrito dentro do esperado na bibliografia para as areias. Esta variação tanto no ângulo de atrito quando coesão pode ser explicada pela diferença na geometria das amostras, variação natural do material e a diferente condição de contorno entre os ensaios, validações similares também demonstram uma variação dos valores encontrados entre os ensaios como pode ser visto no trabalho de Li et al (2018). Avaliando os resultados, é notável uma maior convergência para os valores próximos a 100 kPa e uma maior divergência para valores mais altos de confinamento; neste sentido, será utilizada a tensão confinante de 100 kPa para os ensaios relativos à areia cimentada.

3.6.4 Resultados com BRS cimentada

Como última bateria de ensaios de validação, foi testada uma segunda areia cimentada, a areia residual de arenito Botucatu (BRS). As amostras foram moldadas com 15 kN/m³, $3,3\%$ de teor de cimento em massa e teor de umidade de $8,5\%$ num total de quatro amostras, duas cúbicas e duas cilíndricas. A aceitação de amostras foi de 1% de divergência nas dimensões e densidade, bem como $0,5\%$ no teor de umidade. As amostras foram curadas até o segundo dia quando elas foram colocadas para percolar. No terceiro dia as amostras foram rompidas em tensões confinantes de 100 e 150 kPa e cisalhadas mantendo-se a tensão média e incrementando-se a tensão vertical a uma taxa de 2 kN/min. Os resultados podem ser conferidos na Figura 3-44. Nota-se uma convergência dos resultados, sendo, cronologicamente, os últimos resultados obtidos para a validação, após várias iterações entre *cushions* e software.

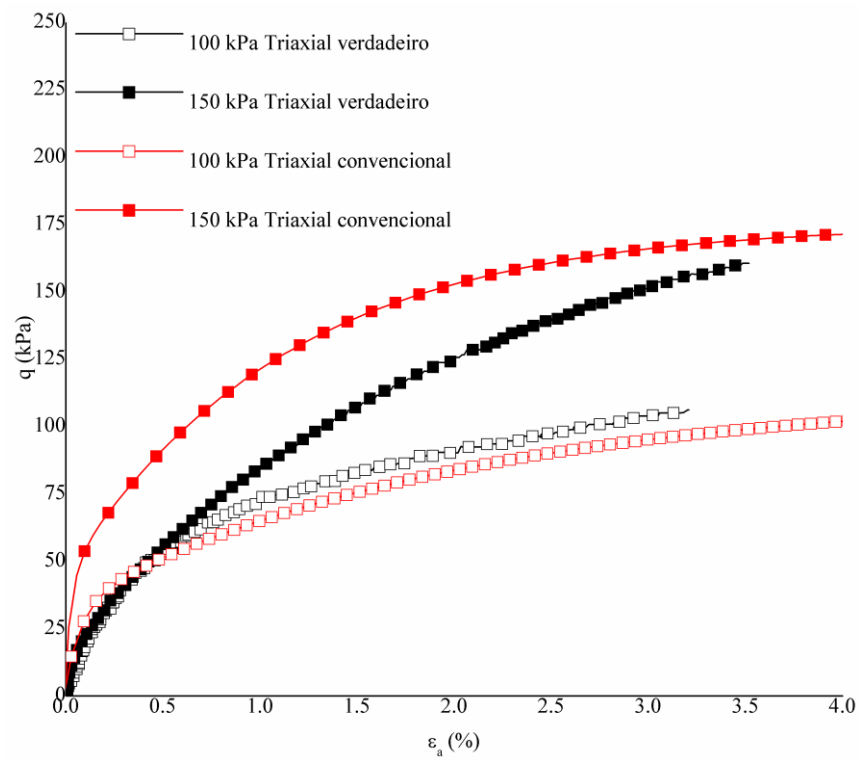


Figura 3-44 Ensaios de BRS cimentado em triaxiais.

4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

4.1 MATERIAIS E METODOLOGIA

Para avaliar a anisotropia de solos, foi proposta a realização de ensaios de compressão simples em amostras cúbicas de 5cm de aresta com diferentes misturas de areia reforçadas com cimento. Neste tipo de ensaio, podem ser simuladas situações de carregamento eixo paralelo e perpendicular à compactação. O material utilizado foi areia de Osório, juntamente com cimento Portland CP V – ARI.

Para obter êxito da proposta, desenvolveu-se inicialmente um molde para fazer as amostras. Seu projeto consiste: em uma parede de contenção, uma base móvel, extrusor e lâminas de apoio que podem ser vistos na ordem citada da esquerda para direita na Figura 4-1. O material usado para fazê-lo fora EPS e a fabricação fora feita em impressora 3d, sendo fabricada uma peça de cada exceto as lâminas, que foram impressas 24 unidades.

Sua operação consiste em, após aplicar desmoldante na contenção, acoplar a base no átrio dela, e acima da base a colocação de uma das lâminas. No extrusor, que também serve como compactador, são feitas, então, marcas para determinar a profundidade da compactação a ser realizada. Após a deposição e compactação da primeira camada de solo, ele é escarificado para então ser aplicada a camada seguinte e sua densificação. Nesta pesquisa foram realizadas duas camadas, devido às dimensões reduzidas do CP. Para a última camada é colocada uma segunda lâmina com a função de facilitar o processo de extrusão que se segue, retirando-se a base da contenção e invertendo-a para servir de calço de golpe para a extrusão, diminuindo a perda de material aderido as paredes da contenção. Os golpes na base eram cessados quando evidenciado que a base estava em contato com as lâminas, para que então a primeira fosse removida para finalizar a extrusão. Uma representação deste processo de moldagem pode ser encontrada na Figura 4-2, na qual a peça em azul é o CP, em verde a base móvel, ciano é a contenção, vermelho as lâminas e por fim o extrusor em cinza.

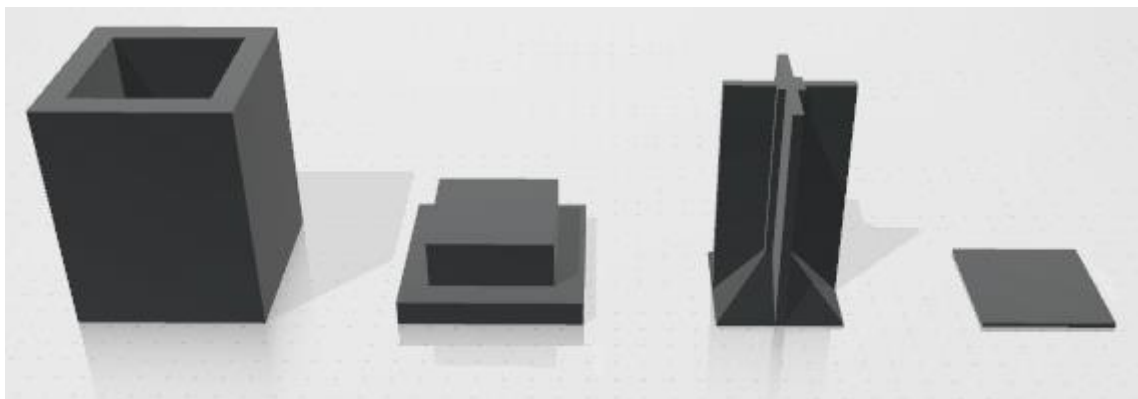


Figura 4-1 Molde para os cubos de 5cm de aresta. Da esquerda para a direita, paredes de contenção, base, extrusor/compactador e lâmina.

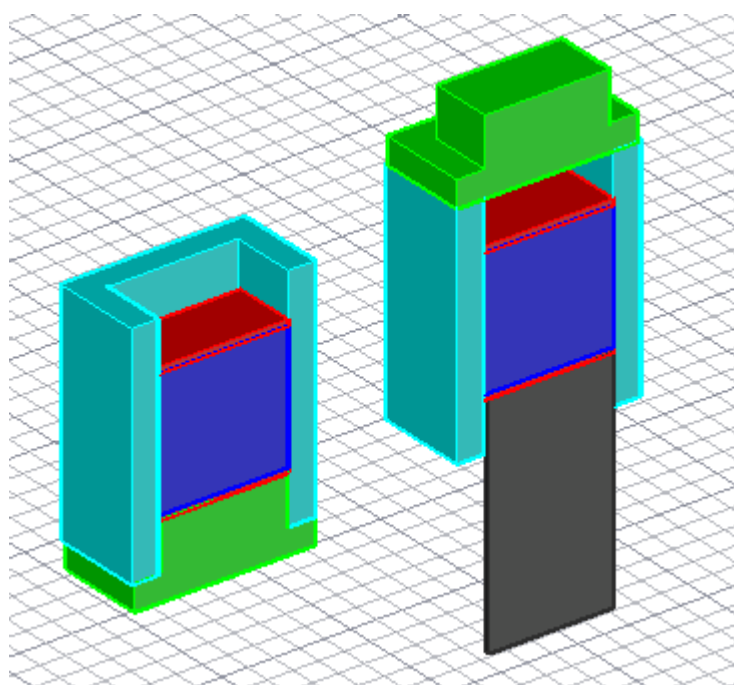


Figura 4-2 Corte do processo de moldagem e extrusão cubos de 5cm de aresta. A esquerda ao final da compactação e a direita processo inicial de extrusão.

Terminado o processo de extrusão, as amostras foram alojadas em sacos de polietileno e seladas via elastômeros de látex. Prosseguia-se com a limpeza do solo das paredes da contenção, a qual foi notada uma perda não insignificante de material, além de arredondamentos nas arestas paralelas ao sentido da extrusão. Foram tomadas duas amostras para controle de umidade de

moldagem por CP. Devido à instabilidade das amostras a sua pesagem e aferição de dimensões após a extrusão se mostrava inviável. Assim, estas aferições só eram feitas após seis dias de cura, imediatamente antes de sua imersão em água para saturação. No sétimo dia, elas eram rompidas na prensa de compressão simples, utilizando o sistema de leitor de células de carga descrito na secção 3.2.

Foram feitas amostras com três índices de vazios distintos 0,78, 0,70 e 0,64, quatro teores volumétrico de cimento distintos 1, 3, 7 e 12% além das duas orientações em relação a compactação, gerando assim um montante de 24 tipos de amostras distintas. As amostras foram feitas em duplicata e, caso fosse registrada uma discrepância superior a 10% entre elas, uma terceira era moldada. Para avaliar a divergência entre o formato do corpo de prova cilíndrico e cúbico, foram moldados três corpos de prova com dimensões cilíndricas de 50mm de altura e diâmetro. A sua fabricação foi feita em um molde bipartido de aço que pode ser visto na Figura 4-3. Eram marcadas a face que recebia a compactação pela letra “z”, para identificar as dimensões que recebiam a força e para posterior cálculo de tensão. A Figura 4-4 ilustra parte das amostras de compressão simples, tanto antes quando depois da imersão.

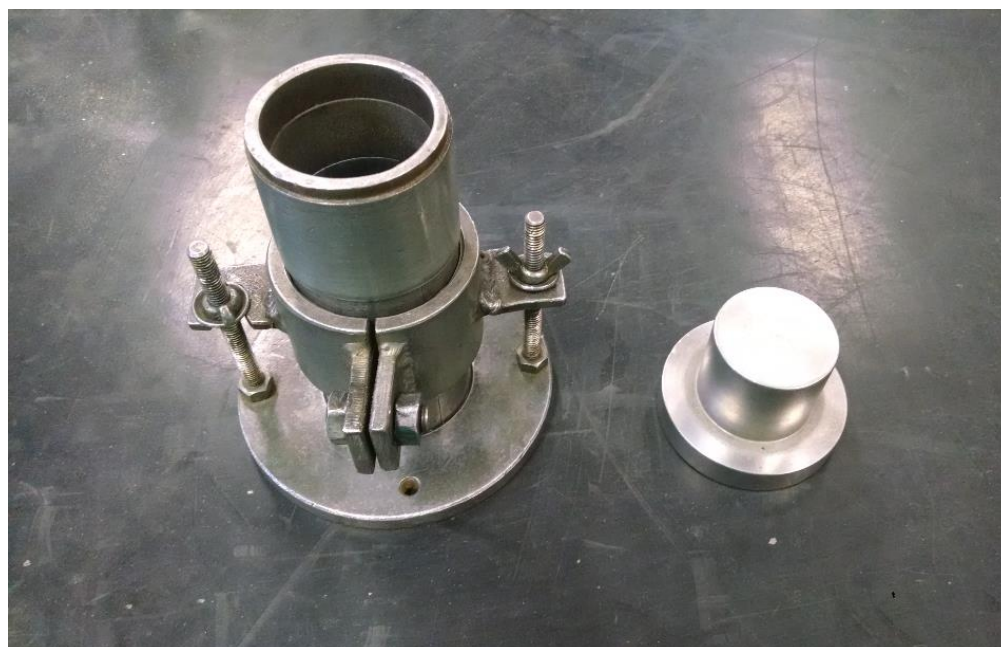


Figura 4-3 Molde bipartido cilíndrico.

Para a ruptura, foram utilizadas células de carga de 5 kN acopladas ao sistema de leituras. As amostras eram colocadas diretamente em placas de aço na base e, acima delas, foi colocado um pistão com uma esfera para não ser transmitidos momentos a amostra, bem como ajudar com potenciais não paralelismos nos planos da base ou topo do CP. Foram tiradas fotos delas antes e após a ruptura. Eventuais amostras apresentaram planos de ruptura no encontro das camadas de compactação, sendo que predominantemente os planos de ruptura se apresentavam aproximadamente a um terço da amostra paralelamente ao sentido da força aplicada, para tanto as amostras tensionadas paralelamente quando perpendicularmente a compactação. A Figura 4-5 demonstra uma amostra com força aplicada paralelamente a compactação enquanto a Figura 4-6 perpendicularmente.



Figura 4-4 Amostras de compressão simples. Esquerda amostras antes da imersão com 6 dias de cura e direita saturadas com 7 dias de cura prontas para ruptura.



Figura 4-5 Amostra de compressão simples antes (esquerda) e depois da ruptura (centro e direita) com força aplicada paralelamente a compactação.



Figura 4-6 Amostra de compressão simples antes (esquerda) e depois da ruptura (centro e direita) com força aplicada perpendicularmente a compactação.

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observou-se um controle dimensional com desvio padrão de 0,26mm nas dimensões transversais e 1,02mm na paralela à compactação. Foi almejado que as amostras teriam uma umidade de 10%, entretanto, os valores encontrados foram de 9,18% com desvio padrão de 0,77%. Os valores encontrados de desvio padrão relativo à massa foram 2,57, 1,71 e 1,39 % para, respectivamente, as amostras com índices de vazios 0,64, 0,70 e 0,78, nota-se uma perda de massa maior para as mais densas e menor para as menos densas.

Para as amostras cilíndricas, a moldagem se apresentou com valores mais controlados de fabricação, com desvios padrões dimensionais de 0,22mm, desvio padrão relativo de massa de 0,74% e umidade 2,02%. Estes valores refletem que, comparando-se as amostras advindas do molde bipartido com extrudados, as primeiras apresentaram maior controle. Comparando parâmetro por parâmetro de moldagem é possível ver o compilado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 Desvios Padrões Relativos entre os processos de moldagem, extrusão e bipartido

DPR	Massa	Transversal	Longitudinal	Volume
Extrusão/Bipartido	4,163	1,136	7,178	8,154

Levando em consideração que todo o processo de moldagem e de extrusão se criava discrepância entre a geometria e massa geral do corpo de prova, foi preciso se basear nos métodos que considera o η/C_{iv} como parâmetro de controle. Deste modo, apesar destas discrepâncias, na hora que se utiliza os parâmetros corrigidos estes fatores são considerados. Os resultados das compressões simples das amostras cúbicas foram compilados na Figura 4-7. Observaram-se bons valores de R^2 , mesmo forçando o expoente para melhor comparação com os valores de Cruz (2008). As amostras rompidas na direção da compactação (0°) apresentaram uma resistência de 17,58% maior quando comparadas com as rompidas perpendicularmente a compactação (90°).

Comparando estes valores como os de Cruz (2008), notou-se uma queda de 19,17% para as amostras rompidas perpendicularmente a compactação e somente de 4,95% com amostras rompidas na direção da compactação, não demonstrando uma variação significativa. Em Cruz (2008), foram utilizadas amostras cilíndricas com relação de 2 entre a altura e diâmetro, para analisar esta influência é relevante comparar os dados com os cilindros moldados nesta pesquisa. Foi encontrado um incremento de aproximadamente 60% entre a amostra com relação de 2 para as amostras com relação de 1. Este achado é esperado devido à diminuição da esbeltez da amostra.

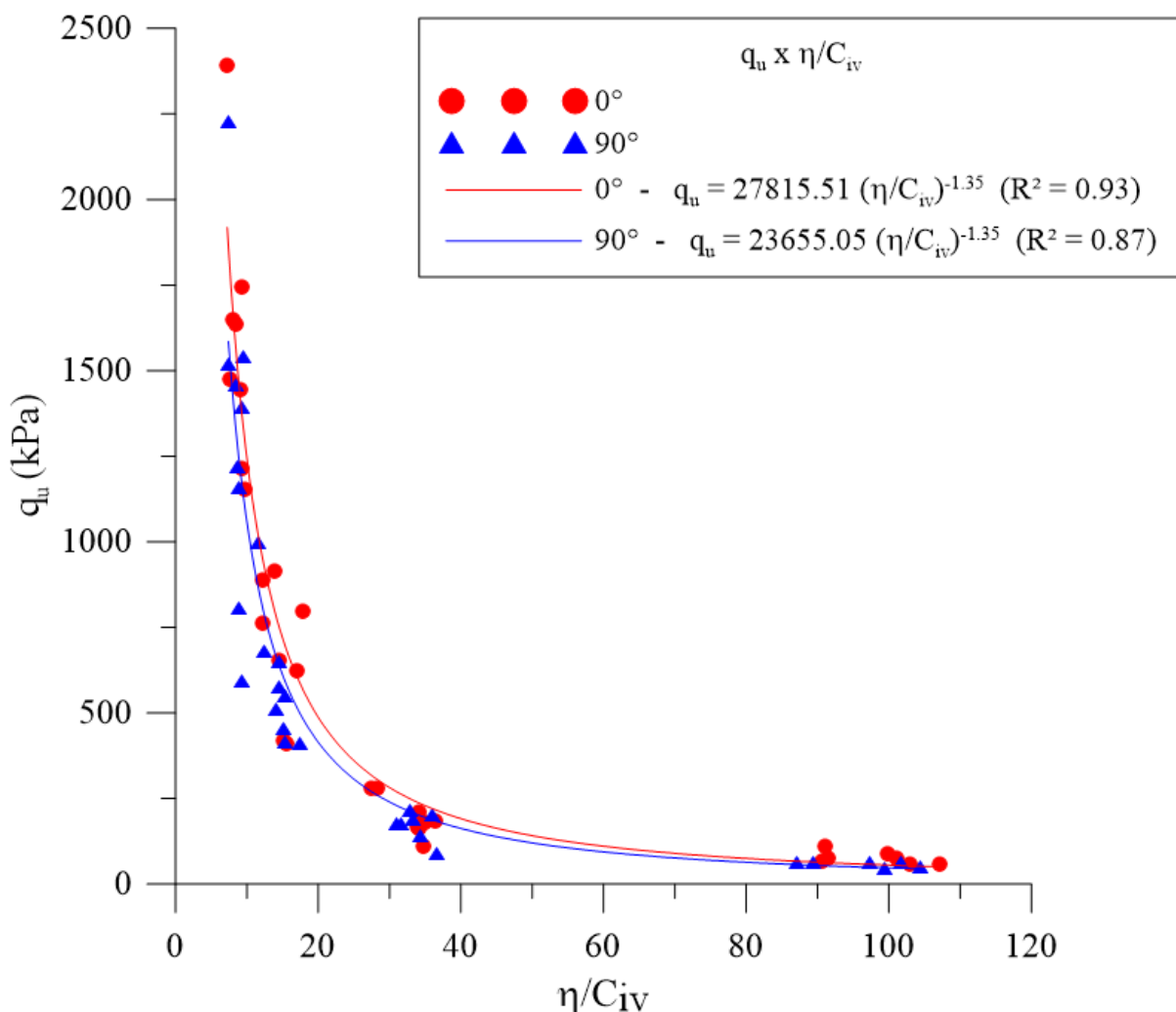


Figura 4-7 Resistência a compressão simples amostras cúbicas.

Pelo fato de não ter sido isolado somente a variável de processo de moldagem e geometria, uma comparação com outros trabalhos não seria proveitoso. Assim, para uma melhor avaliação destes casos, seria necessário moldagem de CPs cilíndricos por extrusão para ter-se uma melhor comparação entre os fatores geométricos e processo de moldagem. Apesar disto, pode-se comparar com outros tipos de materiais que tiveram somente as propriedades geométricas investigadas. Em Lan *et al.* (2018) houve investigação somente das influências da geometria para uma argila com baixo índice de plasticidade, notando-se que não se tinha considerável diferença entre as resistências para corpos de prova cúbicos e cilíndricos com relação 1 entre altura e diâmetro.

Por outro lado, em um trabalho que apresenta resultados com grande variabilidade e poucas amostras, Tripura e Das (2017) fazem amostras de uma areia graduada cimentada em diferentes geometrias, e é registrado uma variabilidade de resistência entre amostras cúbicas e cilíndricas de relação 2 entre altura e diâmetro. Neste estudo, encontra-se resistência de cubos superior em 25% a 66% a mais comparando com amostras cilíndricas. Entretanto, os dados apresentados mostram grande variabilidade para se tomar um padrão aceitável.

5 ENSAIOS TRIAXIAIS CÚBICOS

Neste capítulo são descritos todos os ensaios realizados para avaliar em profundidade o comportamento da areia de Osório cimentada (aOc) e não cimentada (aOnc). Para isso, foram realizados ensaios em sete trajetórias diferentes, correspondentes aos ângulos ρ de 0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180° que este conjunto será nominado de rosetas no restante do texto com tensão octaédrica constante. Foram realizadas rosetas de areia de Osório não cimentada, aOc com sete dias de cura e cimentação atmosférica, aOc com três dias de cimentação sob tensão atmosférica com dois teores de cimentação, totalizando quatro rosetas. Totalizando, assim, vinte e oito ensaios triaxiais cúbicos.

Para se ter uma avaliação relativa entre os diferentes ângulos ρ para cada uma das amostras, propõem-se também avaliar os resultados levando em consideração parâmetros das invariantes de tensão. Para uma melhor interpretação comparativas dos resultados, estes podem ser plotados em função dos invariantes de tensões, primeiro I_1 e segundo desviador J_2 , bem como em relação ao invariante segundo invariante desviador de deformação ε_{J2} que podem ser vistos respectivamente em Eq. 28, Eq. 29 Eq. 30.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

Eq. 28

$$J_2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6}$$

Eq. 29

$$\varepsilon_{J2} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}{6} = \frac{3}{4} \varepsilon_q^2$$

Eq. 30

Também convém a utilização da utilização da maior tensão diferencial q que tem sua definição dada pela Eq. 31.

$$q = |\sigma_1 - \sigma_3|$$

Eq. 31

5.1 AREIA DE OSÓRIO NÃO CIMENTADA

Nestes ensaios seguiu-se o procedimento descrito no item 3.61 descrito na página 110, onde somente as amostras seguiam trajetórias distintas correspondentes aos ângulos ρ de 0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180° e a tensão média utilizada em todos os ensaios foram 100 kPa. Dois ensaios típicos serão demonstrados neste capítulo, o restante estará deposto no anexo.

Nas Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 e Figura 5-4 apresentam os resultados da amostra de areia de Osório não cimentada (aOnc) sob trajetória com ρ a 0° (aOnc-0°) respectivamente o comportamento tensão deformação, sob parâmetros de tensão desvio versus deformação planificada ($q \times \epsilon_{cs}$), comportamento os aspectos volumétricos e por fim o desempenho sob uma óptica das invariantes.

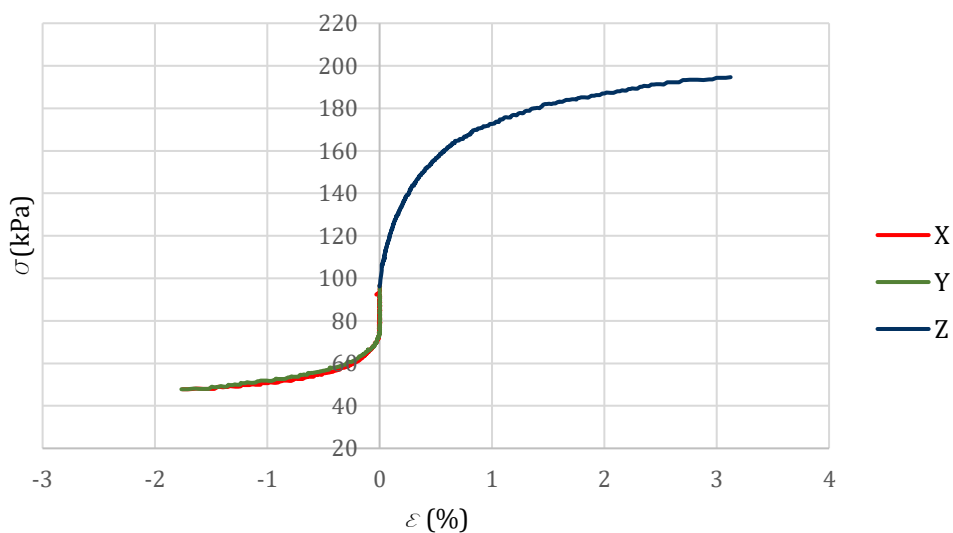


Figura 5-1 Tensão-deformação dimensional da amostra aOnc-0°. Compressão triaxial no eixo da compactação

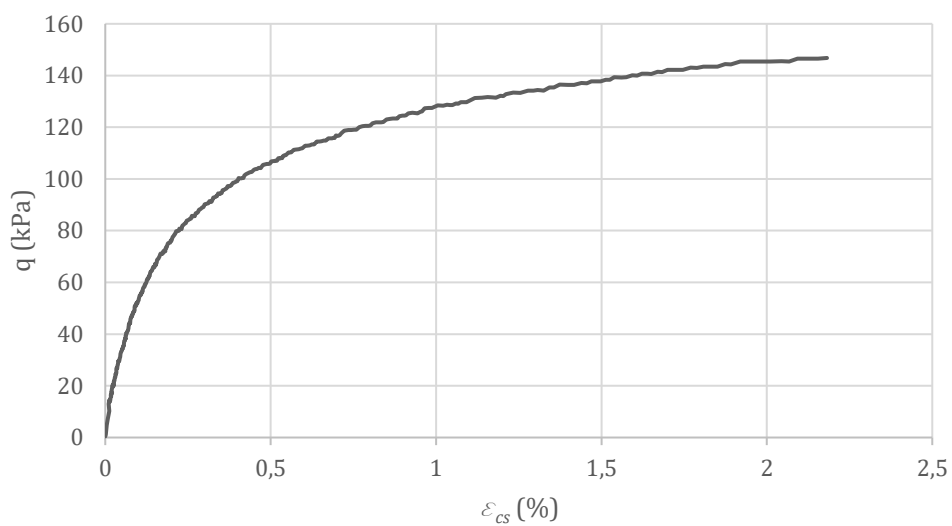


Figura 5-2 Tensão desvio versus deformação planificada da amostra aOnc-0°.

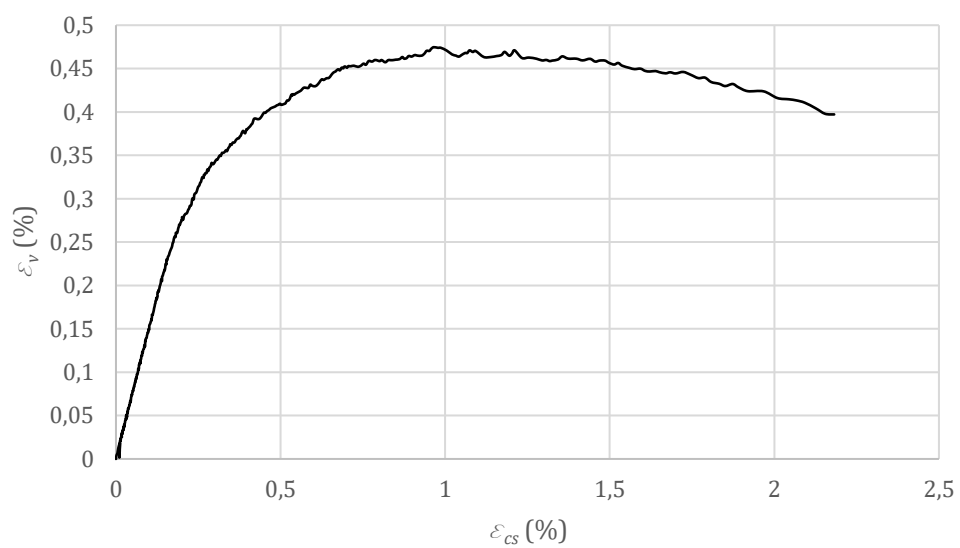


Figura 5-3 Comportamento volumétrico da amostra aOnc-0°.

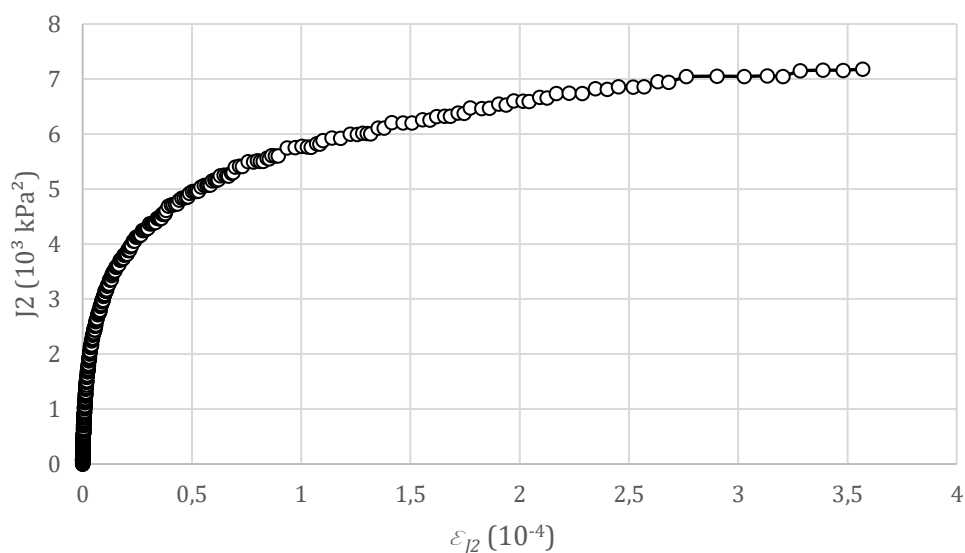


Figura 5-4 Comportamento sob invariantes da amostra aOnc-0°.

Em todos os ensaios realizados sob o triaxial cúbico quando mantido a tensão média, deve-se tomar cuidado com as interpretações das deformações, visto que no eixo onde há a redução da tensão o material terá um comportamento distinto dos eixos em que haverá a sobrecarga, já que no primeiro o material está passando por uma região com histórico de tensão, enquanto no segundo ter-se-á um comportamento de tensão virgem. Este comportamento fica evidente na Figura 5-1, pois no eixo Z, onde há a carregamento, a deformação inicia instantaneamente ao incremento, enquanto nos eixos X e Y, há somente uma deformação significativa após uma descarga de aproximadamente 25 kPa, indicando que somente então neste eixo atinge-se o fim da influência do histórico de tensões. Por esse motivo, o autor não tratará de parâmetros como módulo de Young ou Poisson, já que, diferente de um carregamento axial tradicional, o material terá ao mesmo tempo comportamento que está sendo aplicado um incremento de tensão virgem e uma redução onde teve-se uma tensão superior no seu histórico.

O comportamento descrito anteriormente em que o material não apresenta uma deformação significativa nos eixos X e Y também pode ser visto na Figura 5-3, dado que é apresentada uma reta até aproximadamente uma deformação cisalhante de 0,2%, sendo que neste regime a deformação volumétrica é composta somente pela contração no eixo Z. Já após a deformação de 1%, a tendencia expansiva dos eixos X e Y superam a contração no eixo Z, tendendo a uma

expansão até o fim do ensaio. Ressalta-se que este ensaio é de tensão controlada, e não é esperado que o material entre no estado crítico, pois são exigidas deformações incompatíveis com o equipamento e tipo de ensaio. Ainda assim, nota-se, avaliando a Figura 5-4, que o pico da resistência do material foi atingido, uma vez que após um pequeno incremento de tensão há um substancial deformação diferencial observada, caracterizando assim a falha.

Nas Figura 5-5, Figura 5-6, Figura 5-7 e Figura 5-8 apresentam os resultados da amostra de areia de Osório não cimentada (aOnc) sob trajetória com ρ a 60° (aOnc- 60°) respectivamente o comportamento tensão deformação, sob parâmetros de tensão desvio versus deformação planificada, comportamento os aspectos volumétricos e por fim o desempenho sob uma óptica das invariantes.

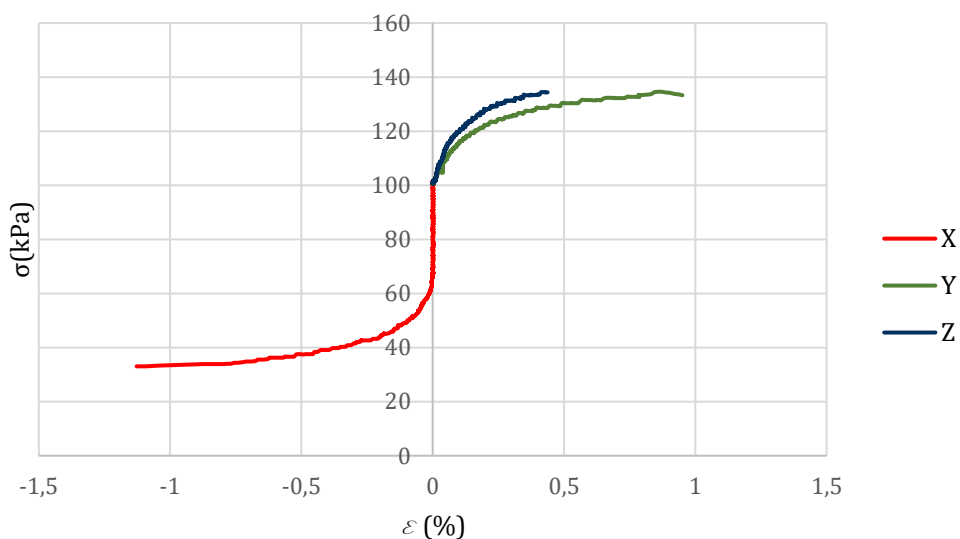


Figura 5-5 Tensão-deformação dimensional da amostra aOnc- 60° .
Extensão triaxial no eixo paralelo a compactação.

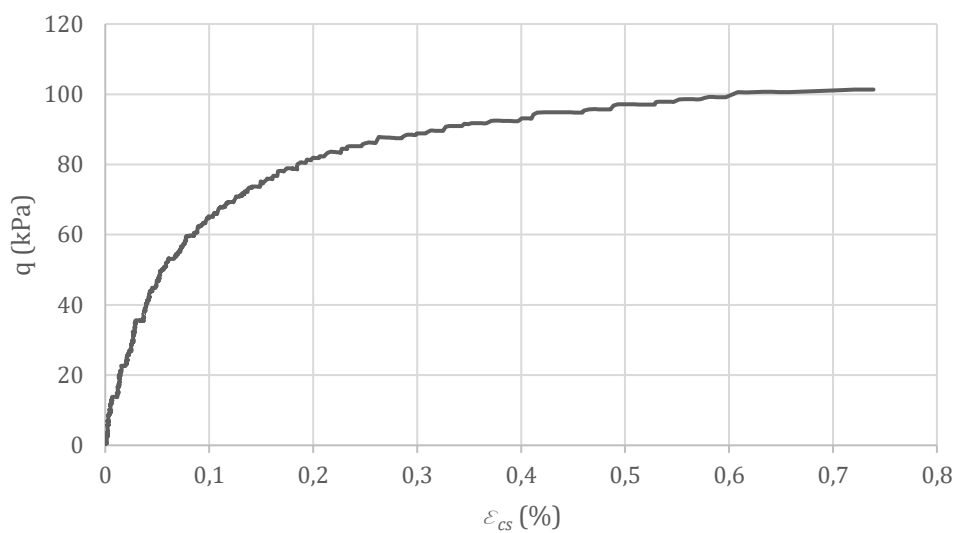


Figura 5-6 Tensão desvio versus deformação planificada amostra aOnc-60°.

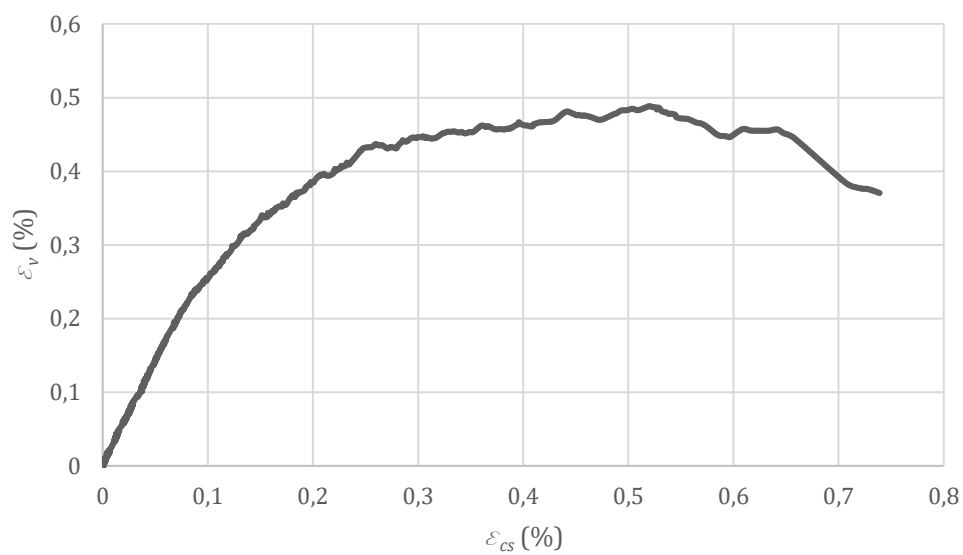


Figura 5-7 Comportamento volumétrico da amostra aOnc-60°.

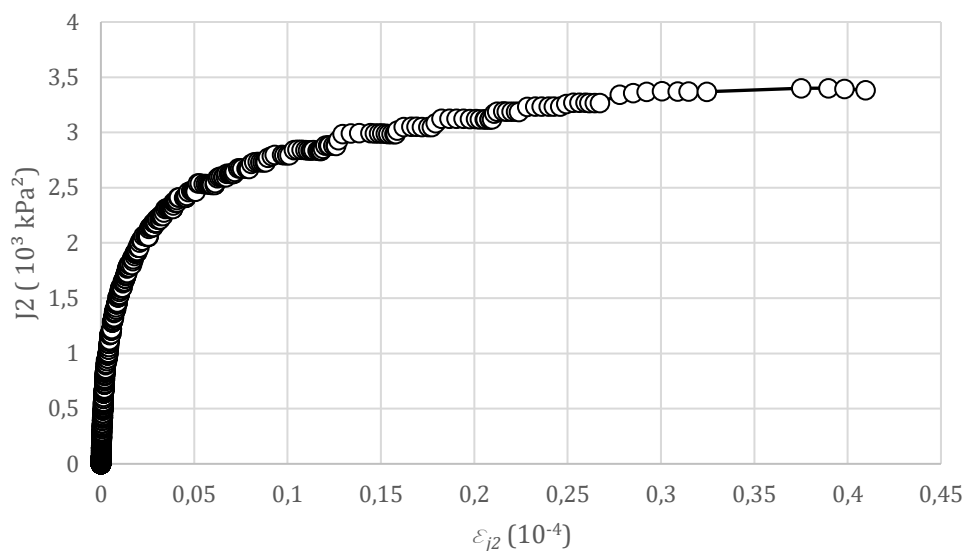


Figura 5-8 Comportamento sob invariantes da amostra aOnc-60°.

A amostra aOnc-60° apresenta as mesmas tendências de comportamento que a amostra aOnc-0°, especificamente o comportamento plástico sob o eixo onde há a redução da tensão, no caso o eixo X, evidenciado na Figura 5-5, a tendência compressiva inicial e, posteriormente, a expansão notável na Figura 5-7 e a notável deformação próximo ao final do ensaio sob pequeno incremento de tensão, visível na Figura 5-8.

Entretanto, pode-se notar uma diferença entre as amostras aOnc-0° e aOnc-60°, analisando a Figura 5-1 e a Figura 5-5, enquanto na primeira, os eixos sujeitos a mesma trajetória de tensão há um comportamento indistinguível entre estes, nominalmente os eixos X e Y, na segunda nota-se um comportamento diferente entre os eixos Y e Z, em que há uma maior deformação no primeiro comparado com o segundo. Este comportamento denota uma anisotropia do material, sendo que no eixo de compactação Z o material apresenta maior módulo de deformação comparado com o eixo perpendicular a compactação Y.

Na Figura 5-9 pode ser vistos os resultados plotados em função de q_x e q_z .

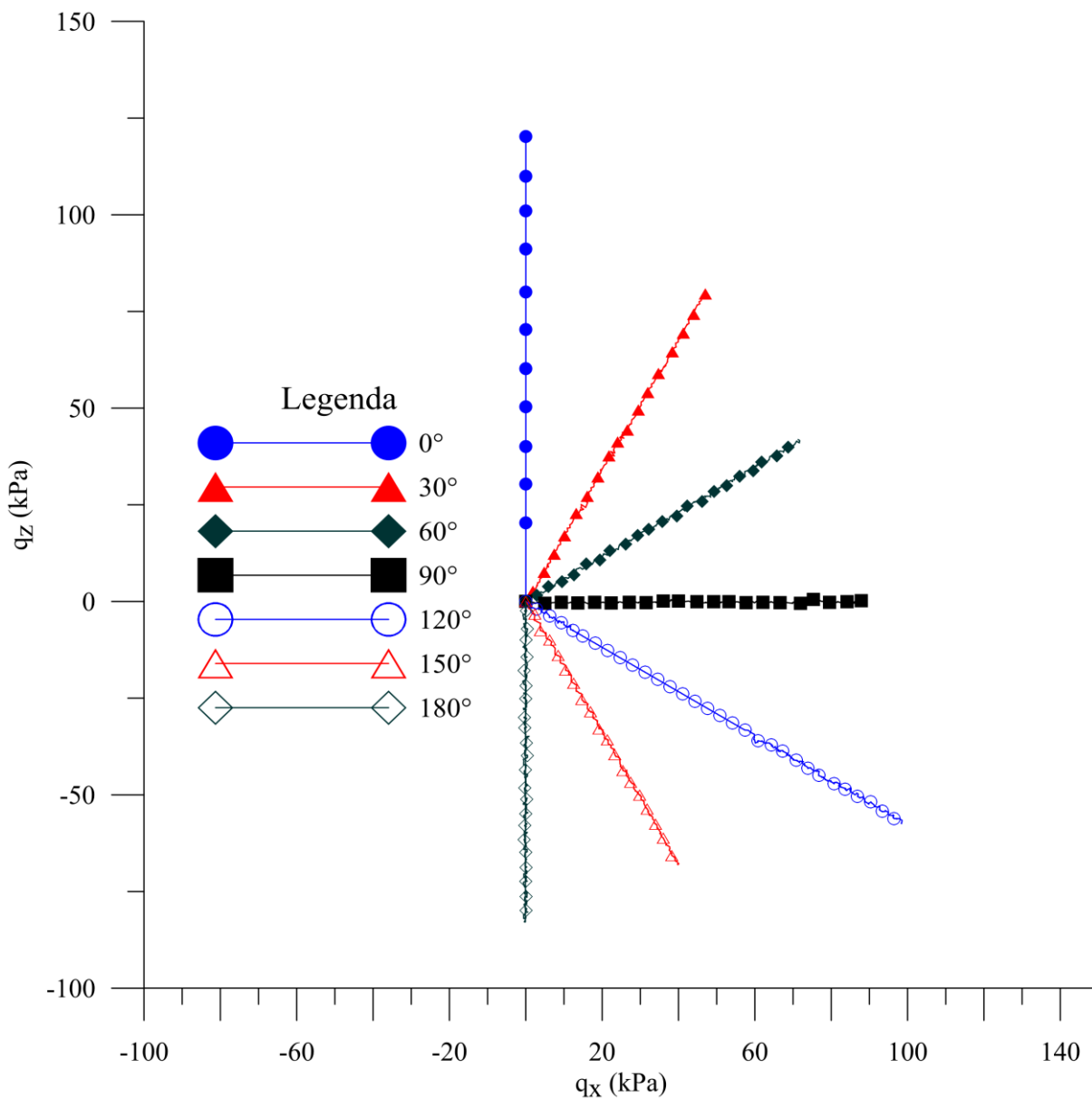


Figura 5-9 Roseta areia de Osório não cimentada.

Na Figura 5-10 é possível notar comparativamente em relação aos diferentes ângulos ρ e as suas respectivas respostas aos invariantes.

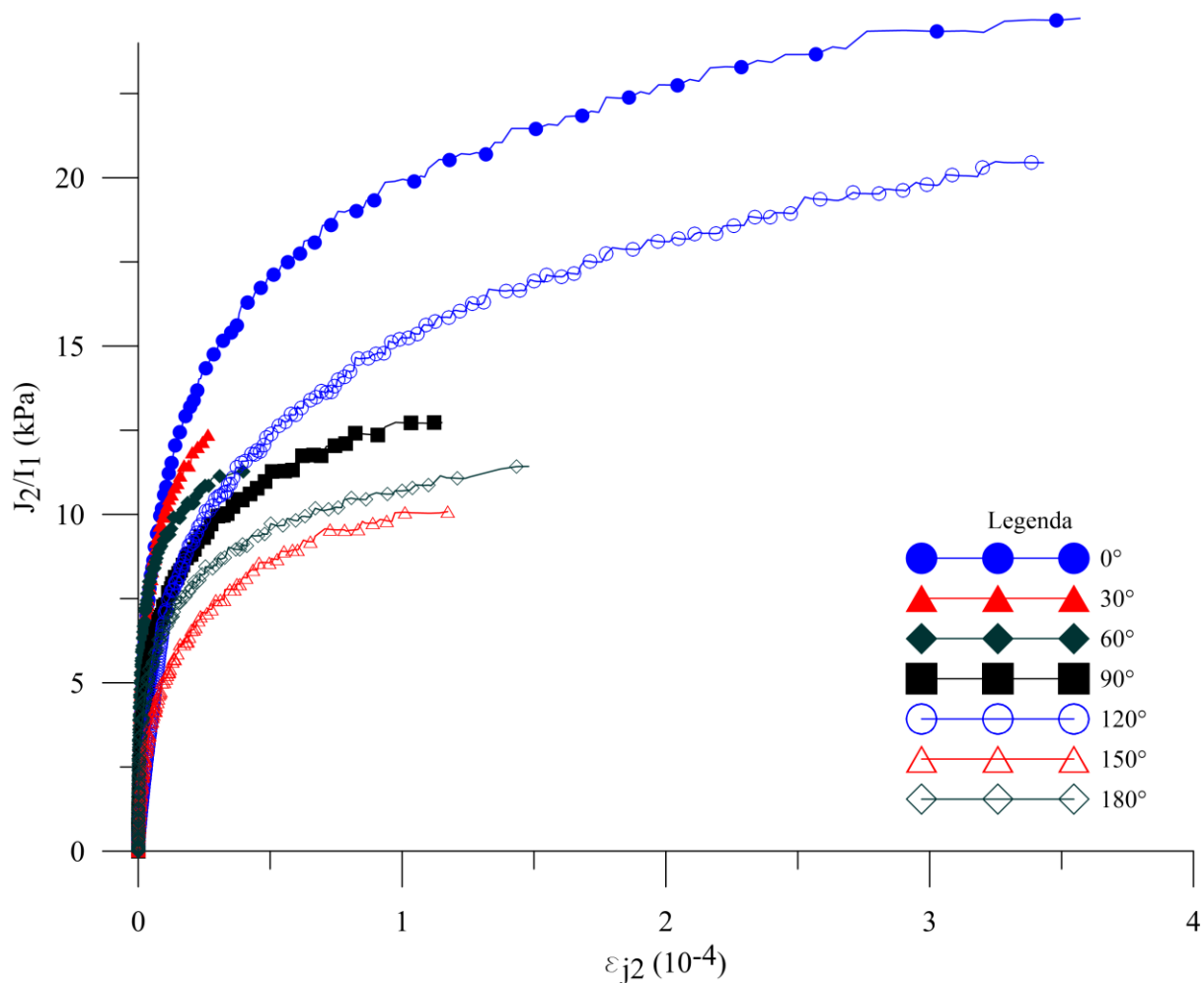


Figura 5-10 Areia de Osório não cimentada em função das invariantes.

Analisando a Figura 5-10, observa-se claramente um anisotrópico da areia de Osório, em especial, nota-se que as trajetórias 0, 30 e 60° quando comparadas as análogas 120, 150 e 180° apresentam as segundas menor resistência. Indicando, assim, que solicitações que mobilizem o eixo de compactação apresentam melhor desempenho mecânico quando comparado com solicitações tangenciais.

5.2 AREIA DE OSÓRIO CIMENTADA

Para avaliar a influência da cimentação no comportamento da areia de Osório, foram propostas três baterias de ensaios utilizando dois tempos de cura e dois teores de cimentação distintos, sendo que todos foram feitos para conseguir-se uma roseta completa. A nomenclatura das amostras pode ser vista na Tabela 5-1. Na Figura 5-11 os resultados relativos ao comportamento da areia de Osório com diferentes cimentações e tempo de cura com trajetória de 0° pode ser analisado.

Tabela 5-1 Nomenclatura das amostras do triaxial cúbico

Propriedade	aOnc	aO1c7d	aO1c3d	aO2c3d
Teor de umidade	8,5%	8,5%	8,5%	8,5%
Teor de cimento em massa	0%	1,066%	1,066%	2,140%
Índice de vazios	0,75	0,75	0,75	0,75
Cura	-	7 dias	3 dias	3 dias

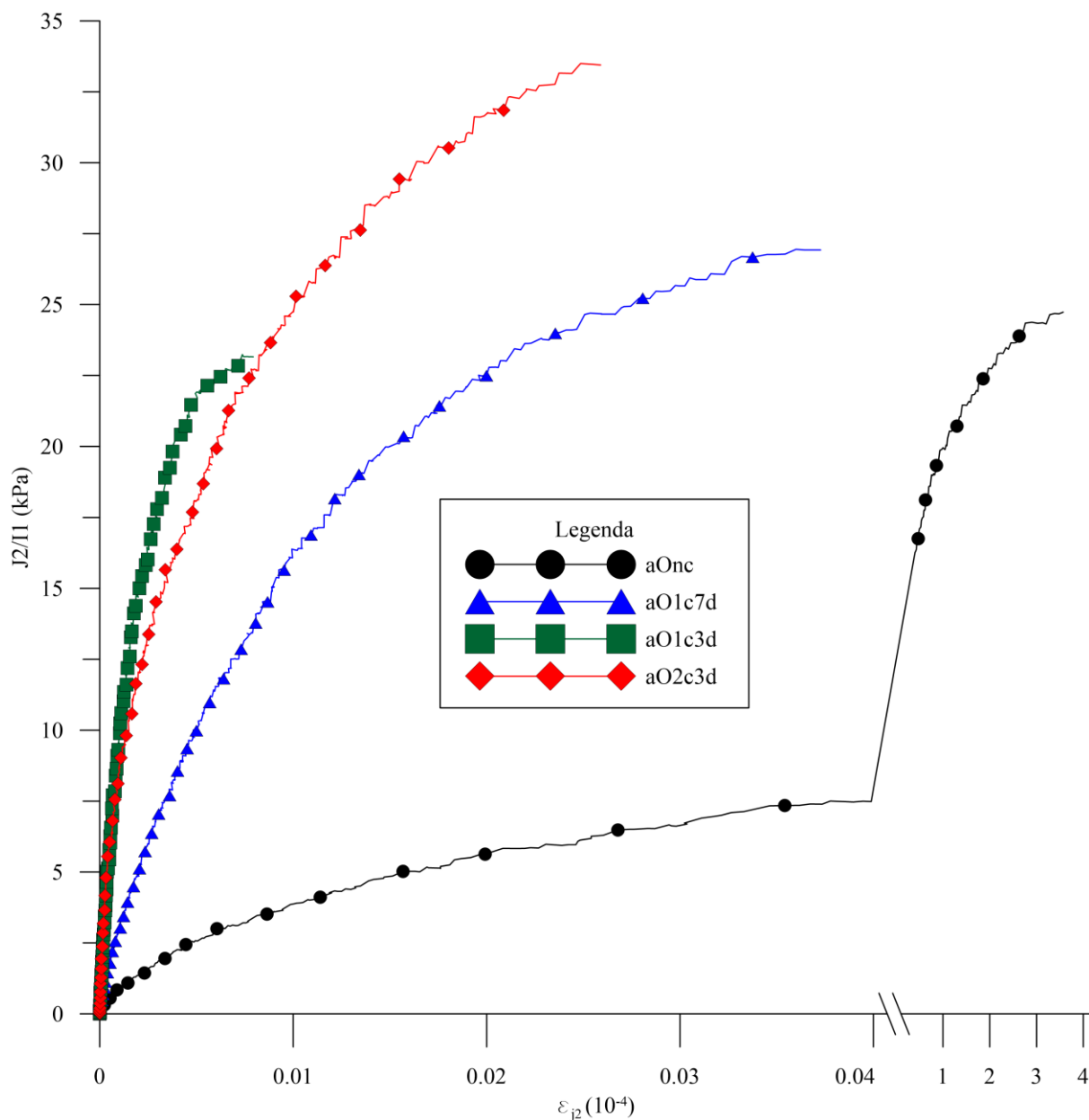


Figura 5-11 Comportamento relativo entre a areia de Osório com diferentes cimentações e $\rho = 0^\circ$.

Comparando os resultados, há inicialmente uma diferença significativa em questão de deformabilidade entre a areia de Osório com e sem cimentação, sendo que a primeira tem um comportamento similar a rochas brandas e a segunda similar a um solo granular, cujo primeiro tem uma fragilidade maior ordens de grandeza maior que o segundo. Ainda sob a óptica da

deformabilidade, o tempo de cura demonstra uma diferença significativa na ductibilidade do material, demonstrando que o cimento curado com somente três dias apresenta uma maior fragilidade quando comparado com a cura aos sete dias em uma. Comparando os teores de cimento e o mesmo tempo de cura, avalia-se um aumento na deformabilidade quando aproximadamente dobra-se o teor cimentício. Estes níveis de deformação foram compatíveis com os trabalhos feitos por Reddy (1991) e Silvani (2017).

Em relação à resistência, analisa-se que não houve uma notável modificação entre a resistência a ausência de cimentação em comparação com um teor de 1,066% com três dias de cura, ao mesmo momento que quando a cura é de sete dias há um pequeno aumento da resistência e, por fim, quando a cimentação é aumentada para o teor de 2,140% há então um notável crescimento de resistência quando comparado com qualquer uma das outras amostras. Vale a pena ressaltar que essa pequena modificação na resistência relativa à amostra aO1c3d e aOnc, pode não ser reprodutível, visto que, comparando os dois materiais há uma diferença de aproximadamente 10 vezes menor deformabilidade entre o primeiro e o segundo, a comparação da resistência enviesada pois trata-se de materiais com comportamentos totalmente diferentes.

5.3 APLICAÇÃO DE MODELOS

Os resultados obtidos foram comparados com os modelos de Mohr-Coulomb, William-Warnke e Lade, os parâmetros e métodos de obtenção destes será descrito na seção a seguir, enquanto as comparações gráficas e numéricas estão na sessão 5.3.4.

5.3.1 Mohr-Coulomb

Neste modelo, foi utilizado o mesmo ângulo de atrito obtido nos ensaios de triaxial tradicional ($34,24^\circ$) em todas as amostras cimentadas, enquanto as coesões foram obtidas de maneiras diferentes. Para as amostras aO1c7d, foi utilizada a coesão encontrada diretamente dos triaxiais convencionais (8,39 kPa), enquanto para a amostra aO1c3d, a coesão foi multiplicada por 0,87 para comportar o menor tempo de cura. Para as amostras aO2c3d, a coesão foi estimada tomando em consideração o valor da resistência a compressão simples estimada pela equação descrita na Figura 4-7, o ângulo de atrito, e o mesmo coeficiente de 0,87 relativo ao menor

tempo de cura. Já para a amostra de aOnc foi utilizado o valor do ângulo de atrito utilizado foi 37°.

5.3.2 William-Warnke

Para a utilização deste modelo, são necessários parâmetros de resistência de tração direta (f_t), compressão simples (f_{cu}) e compressão biaxial (f_{cb}). Como não foram realizados neste trabalho ensaios de tração diametral nem compressão biaxial, estes valores foram buscados na literatura. Em Consoli *et al* (2010), consegue-se correlacionar a resistência de tração por compressão diametra (f_{tcd}) e a f_{cu} . Para correlacionar a f_{tcd} com a f_t , utilizou-se o modelo descrito por Al Awad (2020) com o valor de Poisson advindo de Diambra *et al.* (2018). O de f_{cb} foi baseado na f_{cb} e utilizando a relação descrita em Kupfer & Gerstle (1973). Gerando, assim, os valores constantes para todos os ensaios de 0,111 e 1,16 para os valores de α_z e α_u respectivamente. Os valores respectivos à resistência à compressão simples das amostras aO1c7d foram retirados diretamente da equação disposta na Figura 4-7 para amostras rompidas a 0°. Para as amostras aO1c3d e aO2c3d as resistências encontradas pela equação já descritas foram, então, multiplicadas por 0,87 para fazer a equivalência entre 3 e 7 dias de cura. Já para a amostra de areia não cimentada, somente para ter-se um valor numérico, a resistência utilizada foi 1 Pa.

5.3.3 Lade

Tendo em vista que neste modelo é necessário a realização de ensaios triaxiais prévios para encontrar os parâmetros m e n_I que descrevem o valor da terceira invariante de tensões, é descrita a envoltória de falha do material, este valor só pode ser estimado para as amostras aO1c7d. O parâmetro m corresponde ao módulo da inclinação da reta no gráfico $\log(I_1^3/I_3 - 27)$ x $\log(p_a/I_1)$, enquanto o valor η_I é o valor deste intercepto no eixo das ordenadas elevando a potência 10. Na Figura 5-12, apresentam-se os valores obtidos de m 0,55 e η_I 51,28. Com estes valores, utiliza-se a Eq. 27 e se encontra o valor do respectivo I_3 utilizando o valor de I_1 de 300 kPa que foi utilizado nos ensaios.

Para as amostras aOnc, O1c3d e O2c3d, o valor de I_3 utilizado foi a partir do resultado da amostra a 0° e, com este, foram estimados os restantes dos pontos.

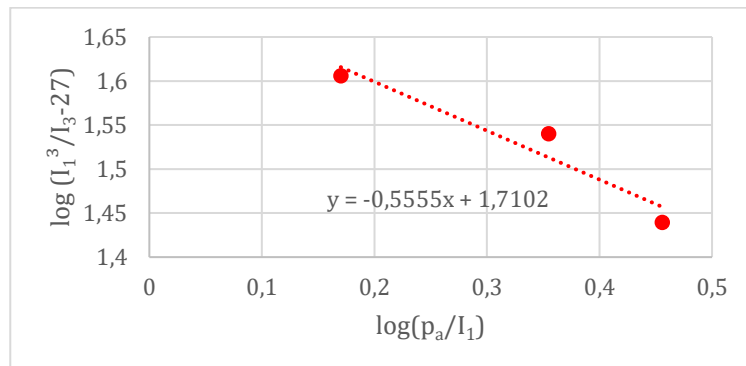


Figura 5-12 Obtenção dos parâmetros do modelo de Lade para a amostra aO1c7d.

5.3.4 Resultados compilados e discussões

Os resultados dos ensaios realizados com as amostras aOnc podem ser vistos na Tabela 5-2, Figura 5-13 e Figura 5-14. Pode-se notar uma anisotropia entre os ângulos de 0 e 120°, bem como 30 e 150°, enquanto as amostras de 60 e 180° não há uma diferença significativa. Demonstrando que no sentido da compactação a amostra apresenta resistência maior do que em direções perpendiculares, valores similares aos encontrados por Li e Yu (2009). Perante os modelos, o que apresentou o menor desvio foi o de Mohr-Coulomb, somente superestimando a resistência nos ângulos de 120 e 150°. Na Figura 5-15, vemos o comportamento tensão – deformação do material, nele é observado que há uma maior deformabilidade do material quando este está sujeito a $b=0$ quando comparado aos outros carregamentos. Estes resultados são consistentes aos encontrados por Arthur e Menzies (1972), Abelev e Lade (2003). Perante à variação da rigidez do material pode ser observado que não há uma diferença significativa em função dos ângulos de carregamentos até 50% da carga de pico, tendo somente uma diferença significativa após este patamar como pode ser visto na Figura 5-16, cujos valores de rigidez foram calculados em função da deformação quando a tensão correspondia aos respectivos valores relativos da tensão de pico como pode ser visto na Eq. 32 e Eq. 33.

$$G_{50\% - 5\%} = \frac{q_{(50\%)} - q_{(5\%)}}{e_{cs(50\%)} - e_{cs(5\%)}} \quad \text{Eq. 32}$$

$$G \ 100\% - 0\% = \frac{q_{(max)}}{e_{cs(max)}}$$

Eq. 33

Tabela 5-2 Resultados e modelos para amostra aOnc

aOnc	Resultados	Mohr-Coulomb		William-Warkne		Lade	
		q/p0	desvio	q/p0	Desvio	q/p0	desvio
ρ (°)	q/p						
0	1,246	1,229	1,34%	1,034	18,63%	1,247	-0,07%
30	0,936	0,851	9,49%	0,696	29,46%	1,013	-7,87%
60	0,824	0,819	0,63%	0,610	29,77%	0,907	-9,66%
90	0,879	0,851	3,21%	0,696	23,28%	1,013	-14,14%
120	1,099	1,229	-11,23%	1,034	6,10%	1,247	-12,63%
150	0,784	0,851	-8,23%	0,696	11,92%	1,013	-25,47%
180	0,826	0,819	0,96%	0,610	30,10%	0,908	-9,35%
Média Abs.			5,01%		21,32%		11,31%

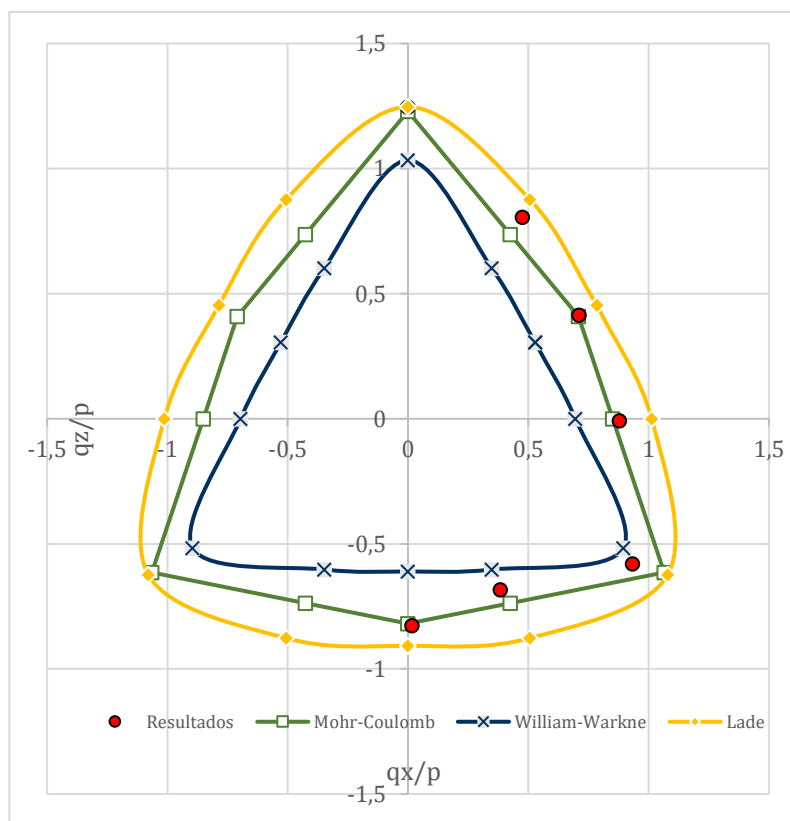


Figura 5-13 Roseta amostras aOnc.

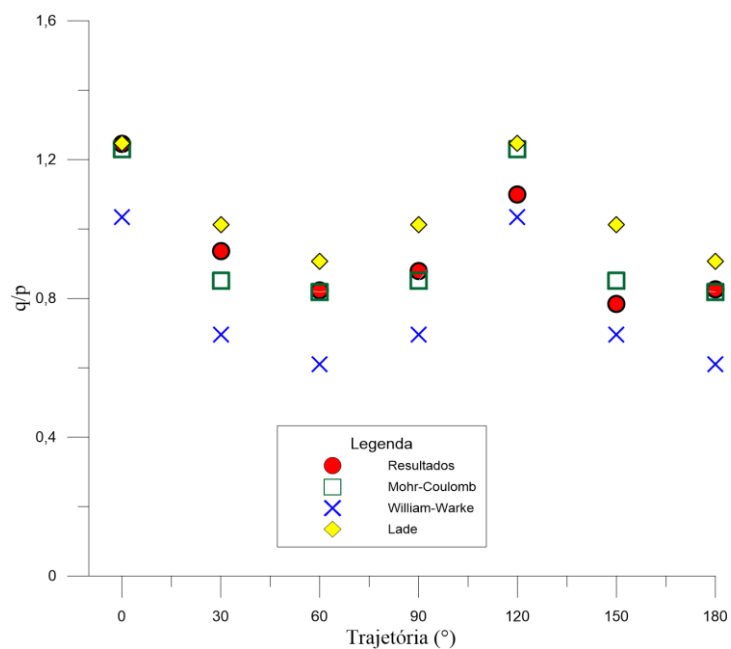


Figura 5-14 Resultados e modelos amostras aOnc.

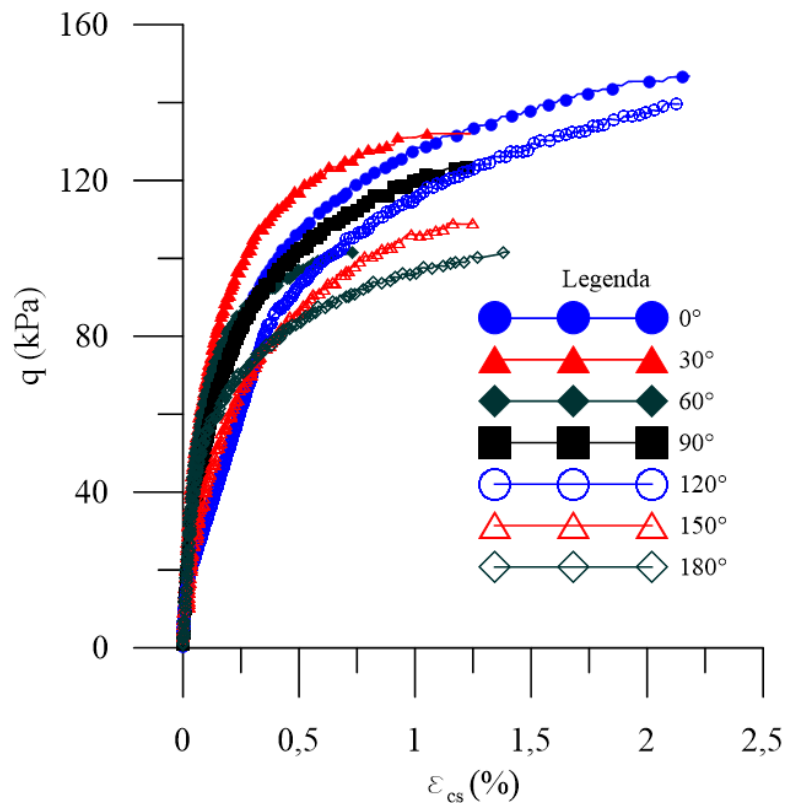


Figura 5-15 Tensão desvio vs deformação cisalhante aOnc.

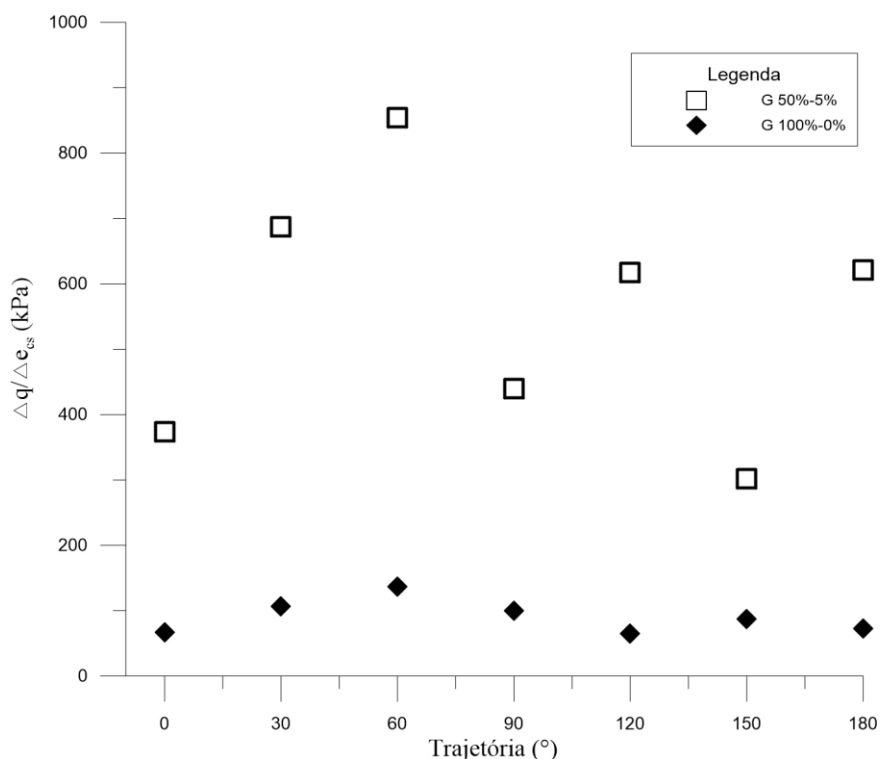


Figura 5-16 Variação da rigidez das amostras aOnc em função dos carregamentos.

Os resultados obtidos das amostras aO1c7d podem ser vistos na Tabela 5-3, Figura 5-17 e Figura 5-18. Devido a grande diferença entre a resistência obtida entre as amostras de 0 e 120° houve uma repetição do ensaio, porém o mesmo resultado foi encontrado na duplicata. Novamente a resistência na direção de 120° foi superestimada para todos os modelos, enquanto a diferença entre as resistências de 30 e 150 foi menor e, por outro lado, houve uma maior resistência para a amostra a 180 comparada com a amostra de 60, sugerindo que a cimentação se concentrou na direção perpendicular à compactação. Na Figura 5-19, o comportamento do material em um viés de tensão deformação pode ser observado que as deformações com ângulos 0 e a 30° foram maiores que suas contrapartes. Perante a rigidez inicial, os materiais que estão no primeiro quadrante de Lade (0, 30 e 60°) apresentam uma semelhança inicial, enquanto ensaios que acontecem no terceiro quadrante de Lade (120, 150 e 180°) se agrupam de mesma maneira como pode ser observado na Figura 5-20.

Tabela 5-3 Resultados amostras aO1c7d

aO1c7d ρ (°)	Resultados			Mohr-Coulomb		William-Warkne		Lade	
	q/p	q/p0	desvio	q/p0	Desvio	q/p0	desvio		
0	1,337	1,260	5,91%	1,276	4,64%	1,225	8,75%		
30	0,936	0,895	4,52%	0,859	8,64%	1,004	-6,97%		
60	0,927	0,868	6,54%	0,753	20,65%	0,906	2,26%		
90	1,166	0,895	26,31%	0,859	30,30%	1,004	14,89%		
120	1,013	1,267	-22,32%	1,276	-23,00%	1,225	-18,93%		
150	1,000	0,895	11,07%	0,859	15,20%	1,004	-0,39%		
180	1,104	0,869	23,78%	0,753	37,72%	0,906	19,65%		
Média Abs.			14,35%		20,02%		10,26%		

Na Tabela 5-4, Figura 5-21 e Figura 5-22 os resultados das amostras aO2c3d podem ser observados. A mesma tendência observada nas amostras aO1c7d pode ser vista onde uma maior cimentação resultou em um ganho significativo na resistência nas direções de 120, 150 e 180° quando comparadas com suas contrapartes perpendiculares 0, 30 e 60°, respectivamente. Entre os modelos, devido à metodologia aplicada, o modelo de Lade foi o que melhor previu a resistência. Entretanto, superestimou a resistência a 90° de 16%, enquanto o modelo de Mohr-Coulomb apresentou uma menor superestimação neste mesmo ângulo e ainda um desvio comparável ao modelo de Lade.

Por outro lado, o modelo de William-Karkne não apresentou nenhuma superestimação de resistência, porém gerou o maior módulo de desvio em suas previsões. Perante o comportamento de rigidez e deformação, o comportamento destas amostras é encontrado na Figura 5-23. Diferentemente das amostras aO1c7d, estas amostras apresentam comportamento mais similar dependendo de seu b do que o ângulo, ou seja, agrupando as amostras em três grupos: primeiro 0 e 120; segundo 30, 90 e 150 e terceiro, 60 e 180°. Na Figura 5-24 pode ser observado a diferença na rigidez em função dos ângulos de carregamento. Evidencia-se um comportamento muito mais dependente do valor do b do carregamento do que inclinação com o eixo de compactação, demonstrando maior isotropia relativa.

Tabela 5-4 Resultados e modelos para amostra aO2c3d

ρ (°)	Resultados			Mohr-Coulomb		William-Warkne		Lade	
	q/p	q/p0	desvio	q/p0	desvio	q/p0	desvio		

0	1,443	1,393	3,52%	1,345	7,07%	1,443	0,04%
30	1,103	1,032	6,56%	0,905	19,67%	1,124	-1,96%
60	0,993	0,999	-0,59%	0,794	22,30%	0,997	-0,37%
90	0,953	1,032	-7,91%	0,905	5,17%	1,124	-16,48%
120	1,407	1,456	-3,47%	1,345	4,50%	1,443	-2,54%
150	1,310	1,033	23,63%	0,905	36,55%	1,124	15,25%
180	1,185	1,001	16,82%	0,794	39,53%	0,997	17,25%
Média Abs.			8,93%		19,25%		7,70%

Os resultados das amostras aO1c3d podem ser apreciados na Tabela 5-5, Figura 5-25 e Figura 5-26. Estas amostras foram as que apresentaram a maior divergência interna comparando com as tendências observadas nas outras amostras, pois há uma significativa menor resistência nas amostras nos ângulos de 120 e 150°, enquanto apresenta uma maior resistência a 60°. Devido a estas inconsistências, estes resultados foram feitos em duplicata e o mesmo resultado foi observado. Perante os modelos, não houve nenhum destaque, uma vez que todos apresentaram um desvio na previsão na mesma ordem de 14%. Os resultados em função da deformabilidade são encontrados na Figura 5-27 e, em relação à rigidez, na Figura 5-28. Neles, é possível perceber uma tendência de deformabilidade mais relativa ao ângulo de carregamento do que especificamente com o tipo de carregamento, com exceção aos carregamentos de extensão que tem comportamento similar, enquanto a 90° o comportamento é intermediário aos outros ângulos. O autor não recomenda a utilização de baixo teor de cimentação e um menor tempo de cura, já que as amostras apresentaram um comportamento de maior fragilidade, resultando em ensaios com difícil replicabilidade e a menor imperfeição na amostra pode gerar planos de rupturas difíceis de replicar.

Tabela 5-5 Resultados e modelos para amostra aO1c3d

ρ (°)	Resultados			Mohr-Coulomb		William-Warkne		Lade	
	q/p	q/p0	Desvio	q/p0	desvio	q/p0	desvio		
0	1,300	1,248	4,08%	1,245	4,32%	1,300	0,00%		
30	1,066	0,882	18,87%	0,838	23,98%	1,004	5,98%		
60	0,794	0,856	-7,57%	0,735	7,68%	0,906	-13,27%		
90	0,913	0,882	3,49%	0,838	8,62%	1,004	-9,49%		
120	0,918	1,250	-30,61%	1,245	-30,21%	1,225	-28,63%		
150	0,721	0,882	-20,15%	0,838	-14,99%	1,004	-32,84%		
180	0,797	0,857	-7,22%	0,735	8,12%	0,906	-12,83%		

Média Abs. 13,14% 13,99% 14,72%

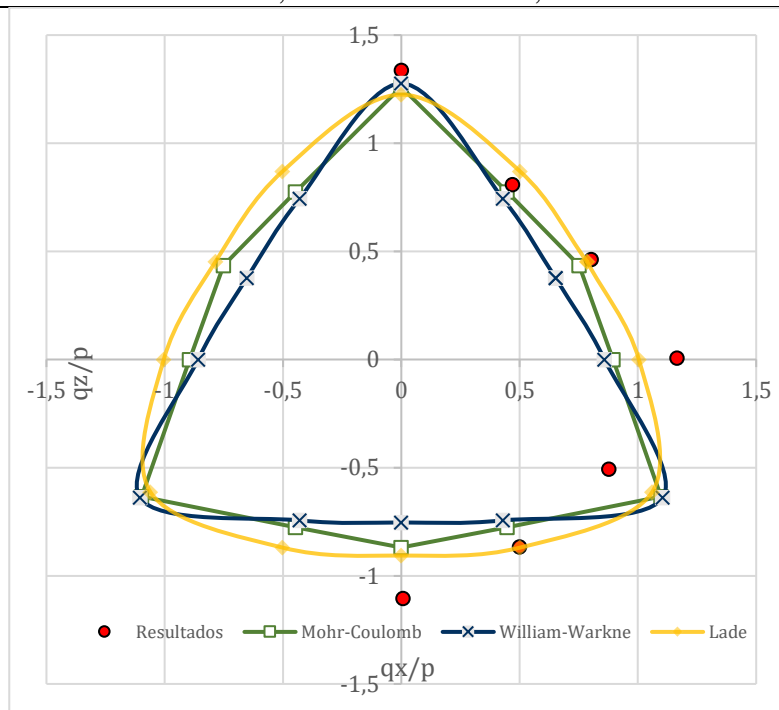


Figura 5-17 Roseta amostras aO1c7d.

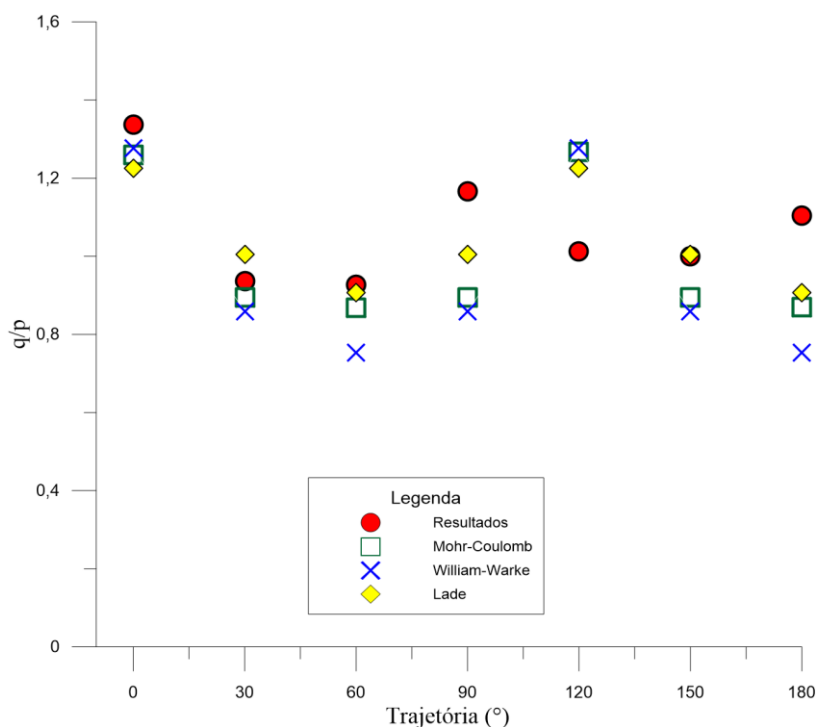


Figura 5-18 Resultados e modelos amostras aO1c7d.

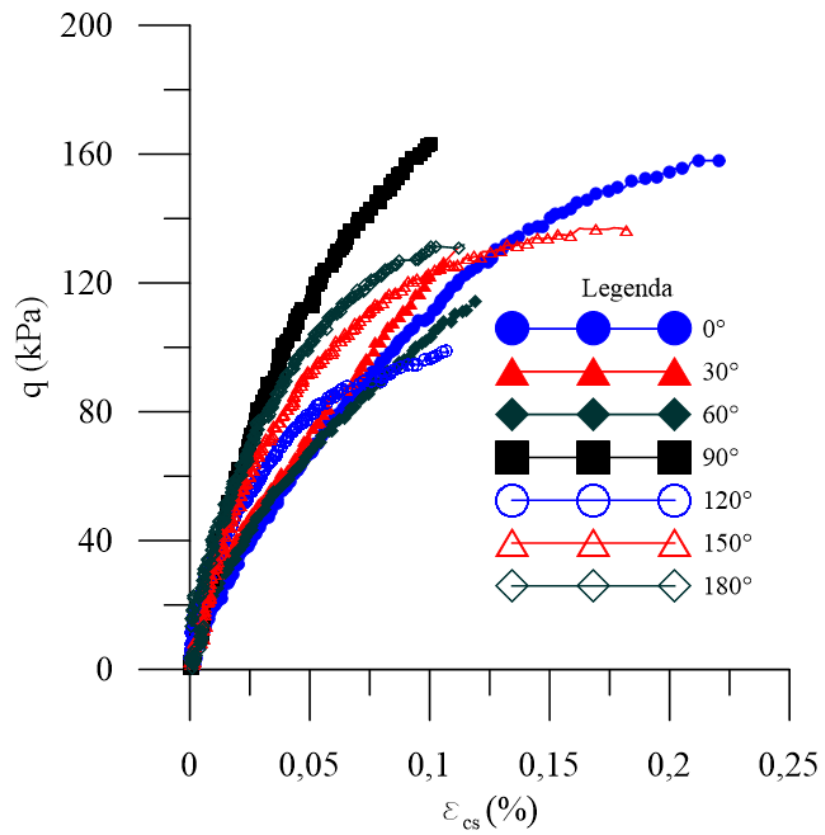


Figura 5-19 Tensão desvio versus deformação cisalhante amostra aO1c7d.

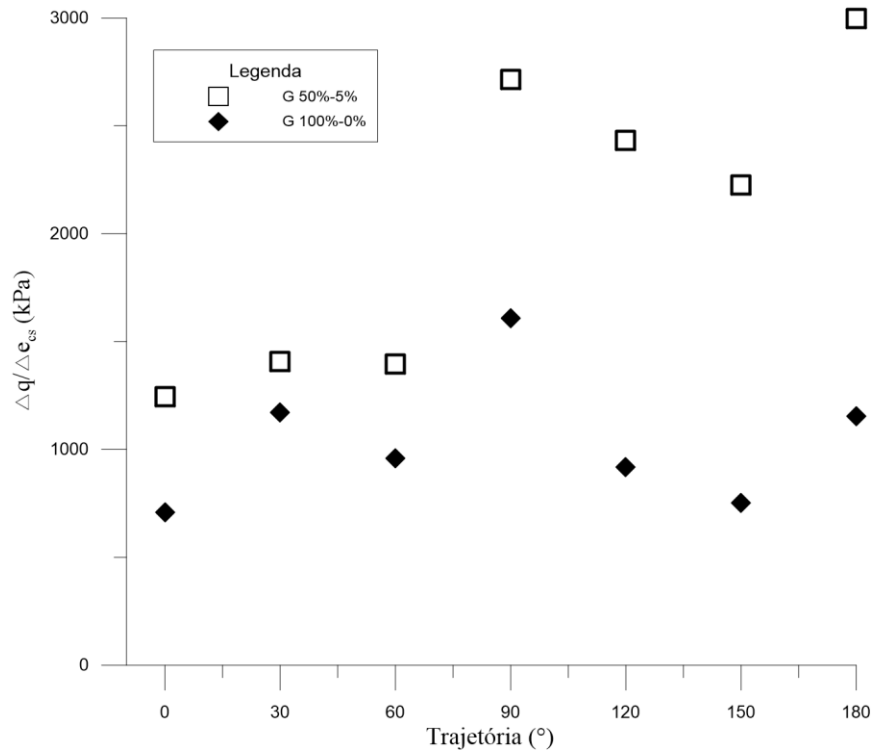


Figura 5-20 Variação da rigidez das amostras aO1c7d em função dos carregamentos.

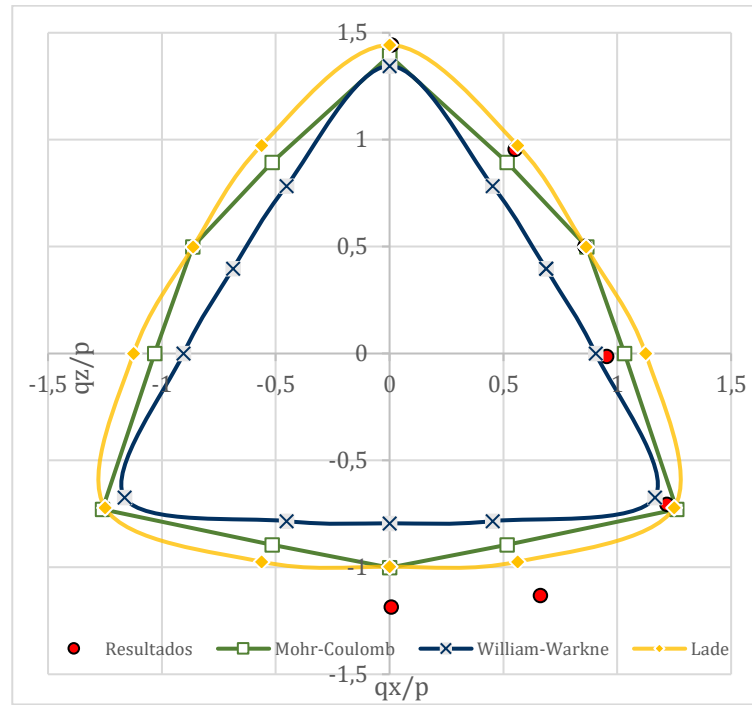


Figura 5-21 Roseta amostras aO2c3d.

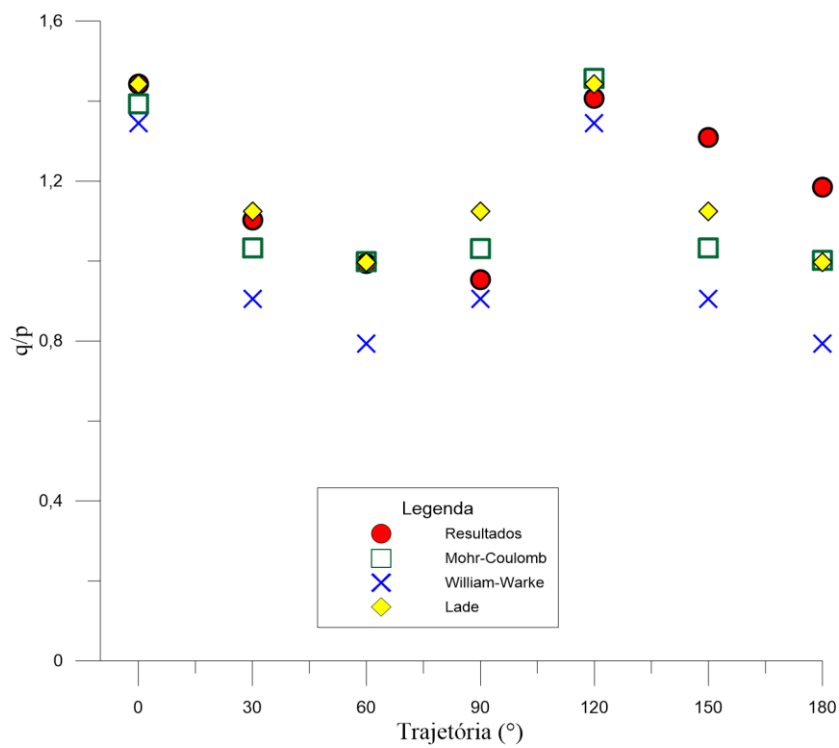


Figura 5-22 Resultados e modelos amostras aO2c3d.

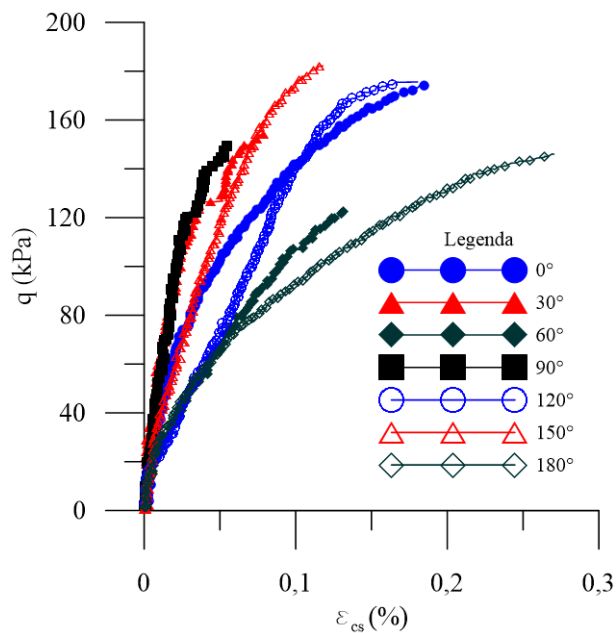


Figura 5-23 Tensão desviadora vs deformação cisalhante aO2c3d.

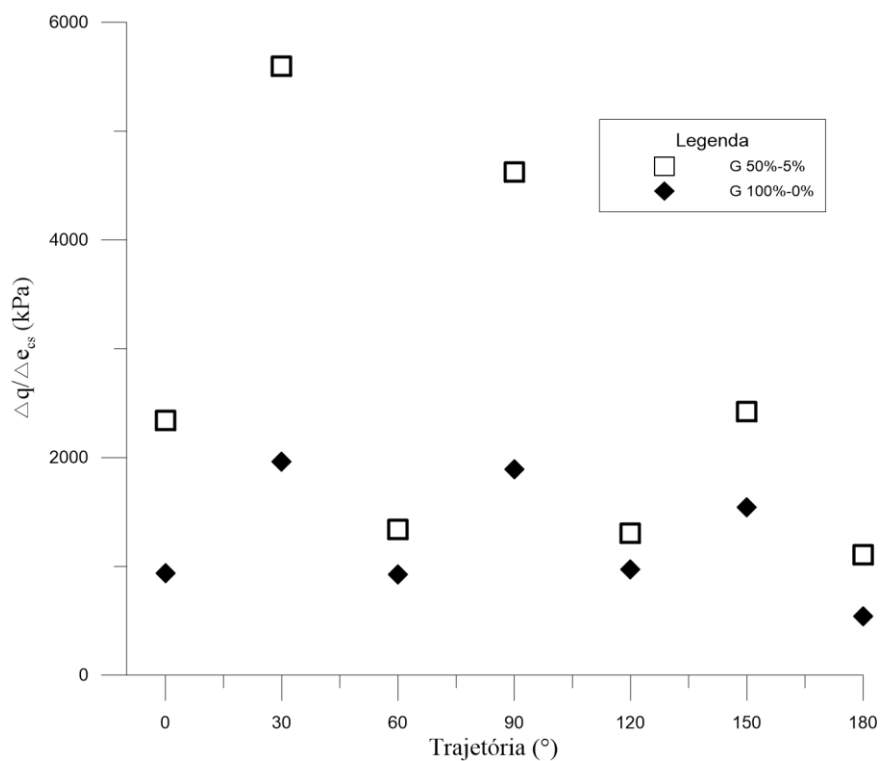


Figura 5-24 Variação da rigidez das amostras aO2c3d em função do carregamento.

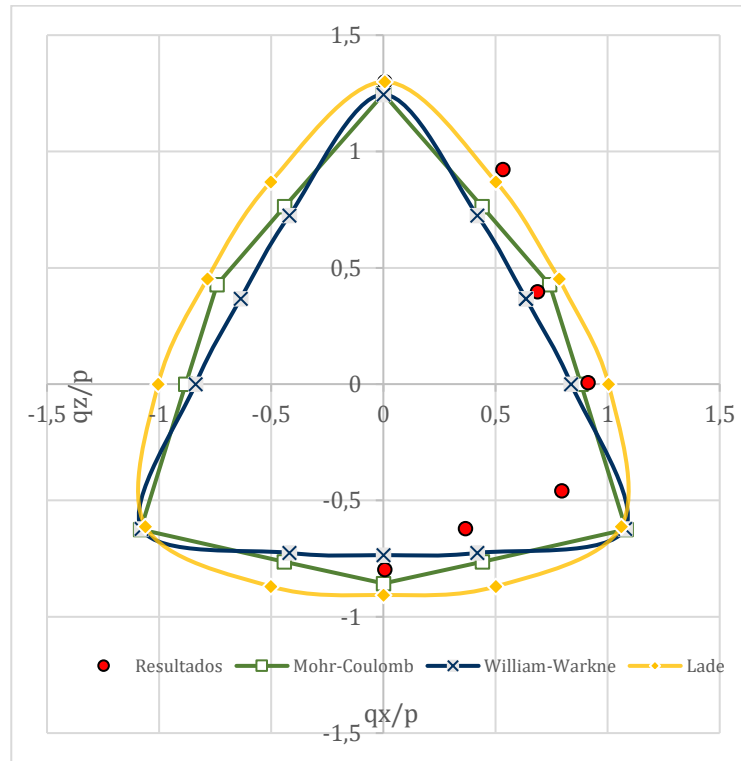


Figura 5-25 Roseta amostra aO1c3d.

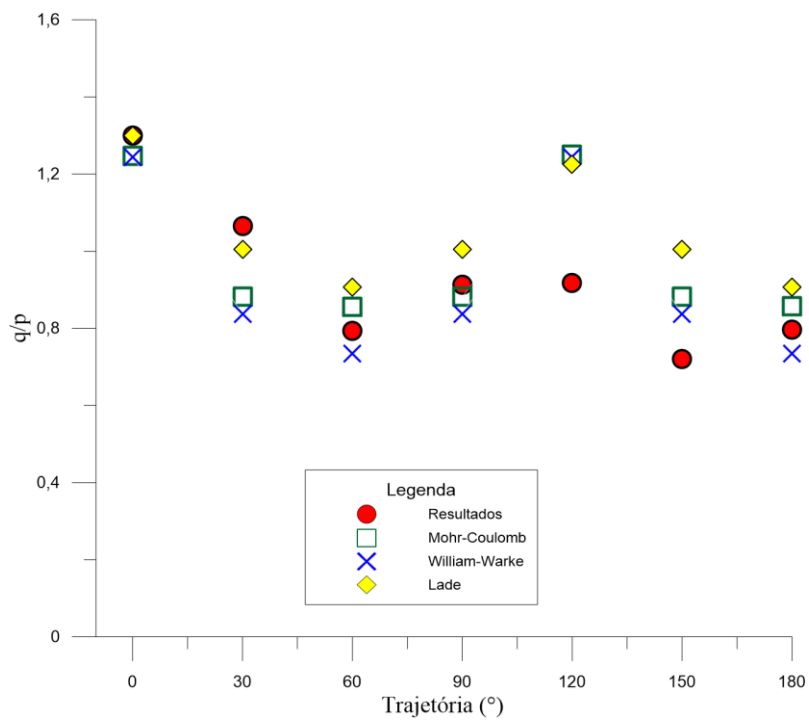


Figura 5-26 Resultados e modelos amostras aO1c3d.

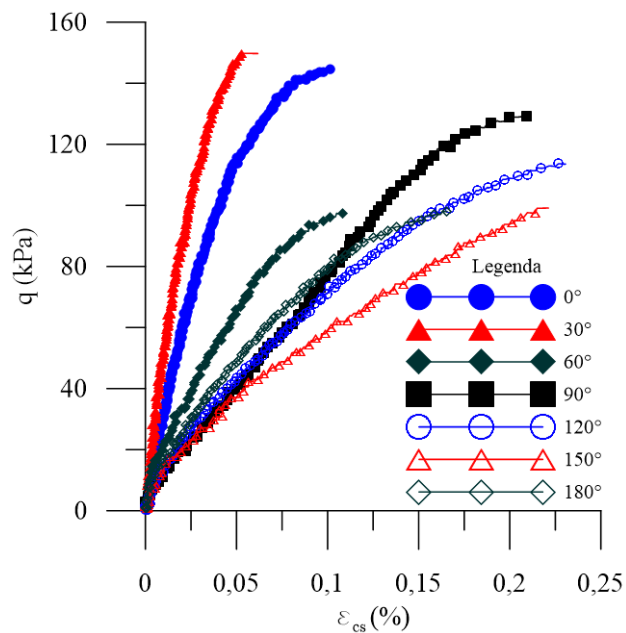


Figura 5-27 Tensão desviadora vs deformação cisalhante aO1c3d.

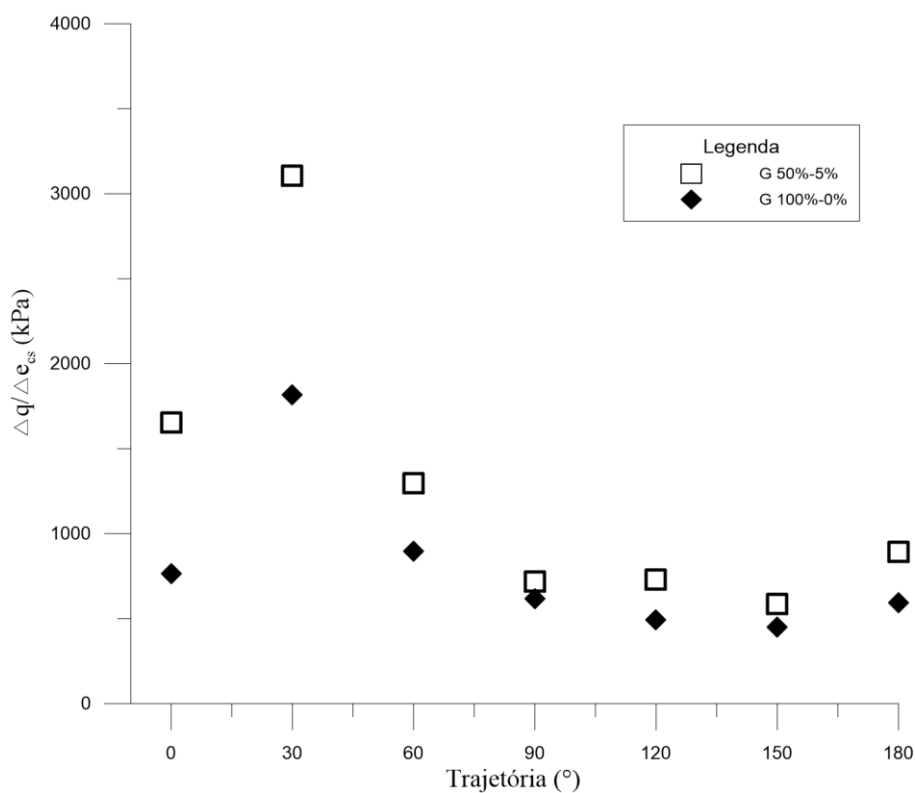


Figura 5-28 Variação da rigidez das amostras aO1c3d em função do carregamento.

Os resultados comparativos entre as amostras estão expostos na Figura 5-29. As amostras aO1c7d apresentaram uma resistência similar às amostras aOnc nos ângulos 0, 30, 60, e 120 enquanto houve uma maior resistência nos ângulos de 90, 150 e 180°. As amostras aO2c3d apresentaram uma resistência similar as suas contrapartes não cimentadas nos ângulos 0, 30, 60 e 90, enquanto um significativo aumento na resistência pôde ser observado nas amostras a 120, 150 e 180°. Perante às amostras aO1c3d há uma grande inconsistência em seus resultados, em virtude de que se apresenta até resistência inferior quando comparado com a amostra não cimentada no ângulo de 120, e um aumento de resistência no ângulo de 60 graus. Por outro lado, no restante das amostras não há uma diferença significativa quando comparada com a amostra não cimentada. Uma possível explicação pode ser dar devido à má distribuição de cimento na amostra derivado do baixo teor como citado em Mitchell (1981) *apud* Reddy e Saxena (1993).

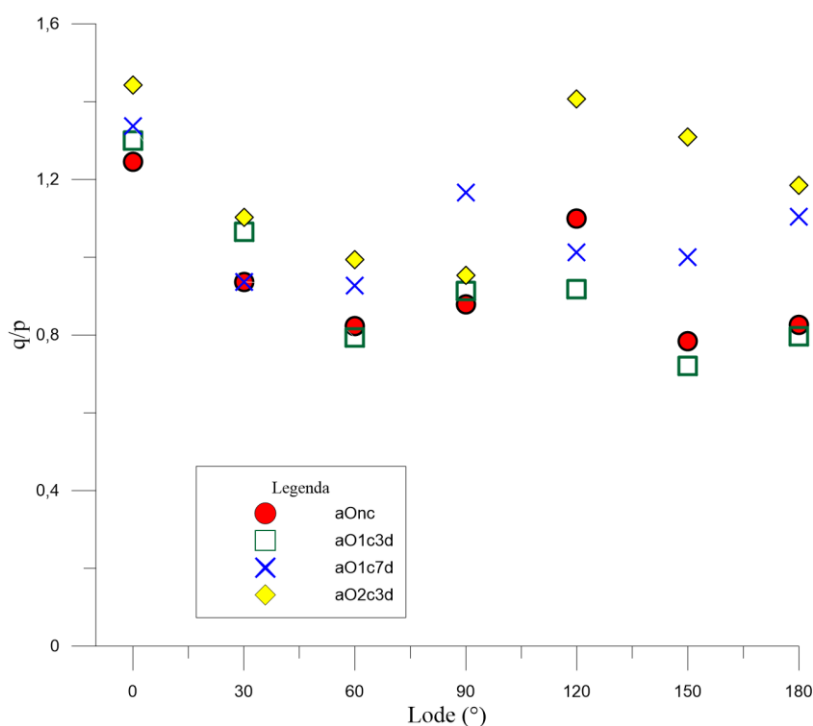


Figura 5-29 Resultados comparativos com todas as amostras.

Os resultados encontrados diferem dos encontrados em Silvani (2017), que em suas amostras foi notada isotropia do material, em contrapartida, os encontrados nesta tese se assimilam aos ensaios realizados por Cai (2010), por Festugado *et al.* (2019) e por Sadek (2006) cuja

anisotropia foi também observada. Resultados similares podem ser vistos também no trabalho de Corte (2020), em que também foi utilizada outra areia cimentada, conforme é mostrado na Figura 5-30.

Em relação à rigidez, uma comparação pode ser feita na Figura 5-31, é notável um claro aumento na rigidez quando se aplica cimento sob qualquer carregamento, como é respaldado em qualquer literatura. Comparando os módulos G_{50} com os módulos G_{100} fica nítido o fenômeno de *softening*, ou seja, um decréscimo do módulo conforme a tensão total é aumentada. Sob ótica do montante de cimentação, comparando as amostras aOnc, aO1c3d e aO2c3d, há um nítido acréscimo de rigidez para todos os carregamentos com exceção aos carregamentos de extensão ($b=1, 60$ e 180°), e o acréscimo mais nítido acontece nos carregamentos de cisalhamento ($b=0,5, 30, 90$ e 150°). Comparando os setores, comprova-se um decréscimo progressivo do primeiro para o segundo e do segundo para o terceiro. As amostras com sete dias de cura apresentam uma maior rigidez no terceiro setor em comparação com os demais.

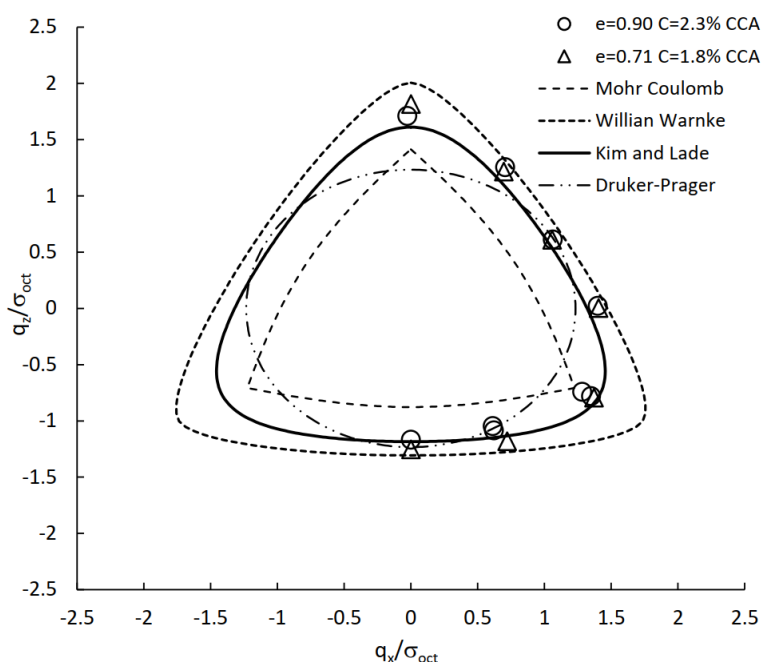


Figura 5-30 Areia do Hudson cimentada.

Fonte: Corte (2020)

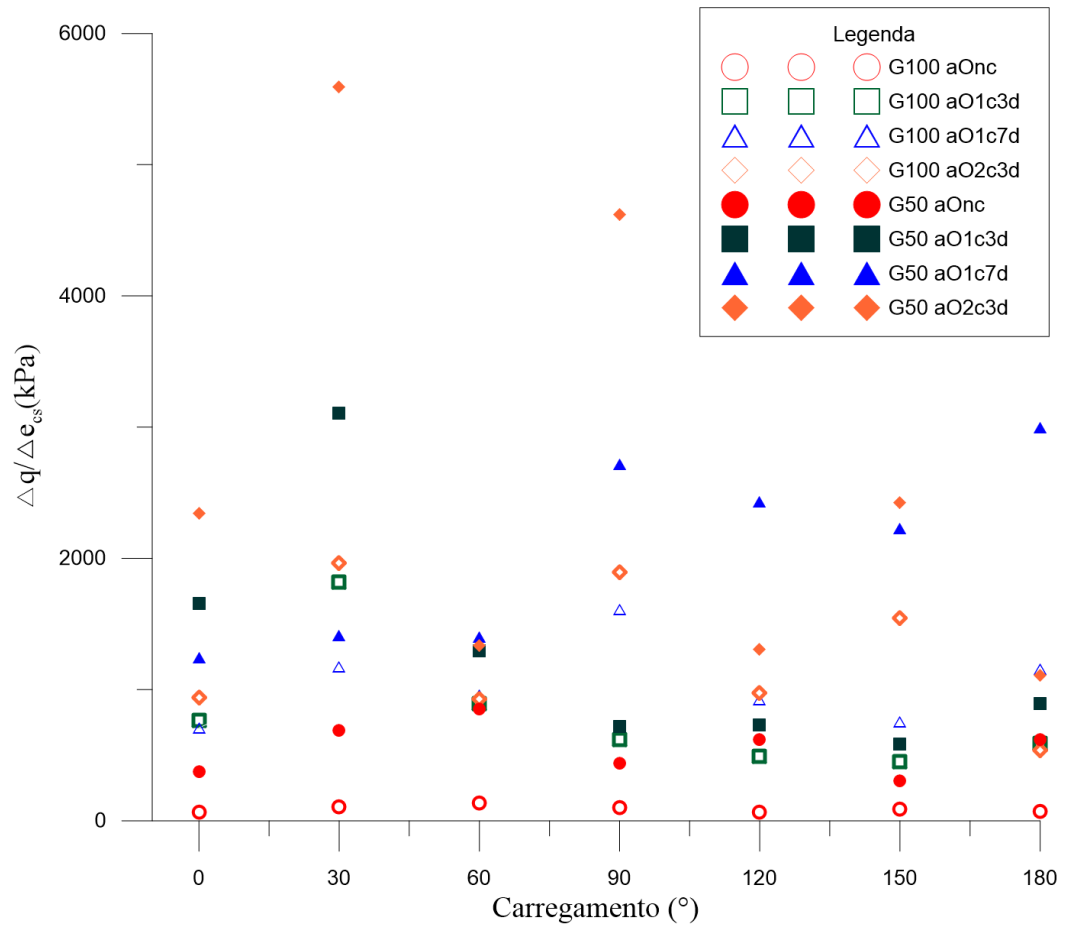


Figura 5-31 Rigidez em função dos carregamentos de todos os materiais ensaiados.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as conclusões advindas deste trabalho, é possível citar que:

Executou-se um leitor de células de carga de baixo custo em plataforma Arduino, que se encontra em uso no laboratório para inúmeras teses, dissertações e trabalhos de graduação.

Sistema de aquisição em plataforma Arduino se mostrou eficiente para sistemas como triaxiais com baixas velocidades de ensaio, reduzindo significativamente o custo destes tipos de sistemas.

O sistema aplicador de pressão à base de Arduino e válvulas de precisão se demonstraram eficientes para controle de triaxial e baixa velocidade de ensaio, reduzindo em aproximadamente 80% o custo quando comparado com soluções industriais.

Este trabalho teve êxito em desenvolver um triaxial cúbico com seu respectivo software, que é e será ferramenta de pesquisa para estudos futuros. Até o momento de produção desta tese já é objeto de estudo de outras quatro teses em andamento.

Demonstrou-se que há uma anisotropia para amostras de areia de Osório para amostras quando rompidas na direção perante perpendicularmente na direção da compactação, onde esta diferença é mitigada conforme acrescenta-se cimento – que pode chegar a um valor 15% menor de resistência na direção perpendicular à compactação, conforme observada pelos ensaios de compressão simples.

A mesma anisotropia observada nas amostras cimentadas rompidas sob compressão simples foi observada para amostras não cimentadas rompidas no triaxial cúbico em uma ordem de 10% a 20% para a compactação utilizada dependendo do tipo de carregamento utilizado.

Areia de Osório não cimentada apresenta anisotropia quando compactada, mais proeminentemente para compressões e cisalhamentos, em carregamentos de extensão não foi notado uma diferença significativa.

Para amostras de areia cimentadas há um incremento maior na resistência e rigidez na direção perpendicular à compactação quando comparada a perpendicular a esta, com cura de sete dias, como pode ser visto nos resultados das amostras aO1c7d.

Quando comparadas amostras sem cimentação com dois teores de cimentação, a resistência e rigidez tiveram acréscimos significativos e dependentes do teor de cimentação. Esse aumento de incremento de cimentação não teve resultado significativo para rigidez a extensões.

Os modelos de Lade e Mohr-Coulomb apresentaram menor desvio em relação aos resultados observados, porém ambos superestimaram a resistência na compressão perpendicular à compactação (120°) e a cisalhamento no terceiro setor (150°). William-Warkne desenvolve resistências mais distantes do que dois supracitados; devido a isso, o autor recomenda a moldagem de corpos de provas perpendiculares à compactação/deposição quando é possível realizar ensaios em triaxiais cúbicos ou *hollow cylinders*, desta maneira, obter-se-á a menor resistência de areias e, em pior das hipóteses, haverá uma subestimação da resistência quando tensões perpendiculares significativas forem esperadas.

O autor não recomenda a utilização de baixos teores de cimento em combinação com pouco tempo de cura para estudos futuros de laboratório, uma vez que, as amostras apresentam uma fragilidade que geram resultados difíceis de replicar.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos investigando o comportamento de diferentes solos e cimentações para observar sua anisotropia/isotropia. A influência de diferentes taxas de cimentação e índice de vazios também podem ser investigados ainda com a areia de Osório, bem como o tempo e temperatura de cura.

REFERÊNCIAS

ABELEV, A. V.; LADE, P. V. Effects of Cross Anisotropy on Three-Dimensional Behavior of Sand. I: Stress-Strain Behavior and Shear Bending. **Journal of engineering mechanics**. 129 (2): 160-166. 2003.

AIREY, D. W. & WOOD, D. M. The Cambridge True Triaxial Apparatus. **Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock**. Donaghe, Chaney & Silver (eds), ASTM STP 977, 796-805. 1988.

AL AWAD, M. N. J. Modification of the Brazilian indirect tensile strength formula for better estimation of the tensile strength of rocks and rock-like geomaterials, **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**. 2020.

ANANTANASAKUL, P.; YAMAMURO, J. A.; LADE, P. V. Three-dimensional drained behavior of normally consolidated anisotropic kaolin clay. **Soils and Foundations**. 52 (1):146-159, 2012). doi:10.1016/j.sandf.2012.01.014.

ARTHUR, J. R. F.; MENZIES, B. K.; Inherent anisotropy in a sand. **Géotechnique**. Vol 22, no 1, 115-128. 1972.

ASHBY, M.; JONES, D. R. H. **Engineering Material: an Introduction to their Properties and Applications**. New York: Pergamon Press, 1980

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **BT-106**: Guia básico de utilização do cimento Portland. 7 ed. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12004**: Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 6 p.

_____**NBR 12024**: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a. 6 p.

_____**NBR 12051**: Solo - Determinação do índice de vazios mínimos de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 1991a. 14 p.

_____**NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.

_____NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12p.

_____NBR 7181: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 12 p.

_____NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: 2016b. 10 p.

ASSOULINE, S.; OR, D. Anisotropy factor of saturated and unsaturated soils. **Water Resources Research**. Vol 42, W12403. 2006. doi 10.1029/2006WR005001.

ASTM **D2487**. Standard classification of soils for engineering purposes. West Conshohocken, PA. 2006.

BESTUZHEVA, A.; ADBULOEV, A. Experimental studies of deformation anisotropy on gravel soils. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 883, 012189. 2020. doi:10.1088/1757-899X/883/1/012189.

BISHOP, A. W.; WESLEY, L. D. A hydraulic apparatus for controlled stress path testing. **Géotechnique**, Vol 25 Issue 4, pp 657-670. 1975.

BORTOLOTTO, M. S. **Bender Elements, Ultrasonic Pulse Velocity, and Local Gauges for the Analysis of Stiffness Degradation of an Artificially Cemented Soil**. 2017. 273 p. Tese de mestrado (MSc) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BROSSE AM, JARDINE RJ, NISHIMURA S. The undrained shear strength anisotropy of four Jurassic to Eocene stiff clays. **Géotechnique** 67(8):653–671. 2017. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.p>.

BRESSANI, L. A. **Experimental studies of an artificially bonded soil**. London. 459p. Thesis (Ph.D.) – University of London, 1990.

BRUMADINHO não poderia ter recebido aval, diz laudo da PF. **Exame**. São Paulo, 26 de nov. de 2019. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/brasil/brumadinho-nao-poderia-ter-recebido-aval-diz-laudo-da-pf/>>. Acesso em: 27/12/2019.

BURLAND, J.B. On the compressibility and shear strength of natural clays. **Géotechnique**. London, v. 40, n. 3. P. 329-378, 1990.

CAI, Yanyan. **An Experimental Study of Non-Coaxial Soil Behaviour Using Hollow Cylinder Testing**. Tese de Doutorado. Universidade de Nottingham. 233p. 2010.

CAMBOU, B.; LANIER, J.; Induced Anisotropy in Cohesionless Soil: Experiments and Modeling. **Computers and Geotechnics**. Vol 6, 291-311. 1989.

CHANG, T. S.; WOODS, R. D. Effect of particle contact bond on shear modulus. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 118, n. 8, p. 1216–1233, 1992.

CHENARI, J. R.; MAHIGIR, A.; The Effect of Spatial Variability and Anisotropy of Soils on Bearing Capacity of Shallow Foundations. **Civil Engineering Infrastructures Journal**. Vol 47(2), 199-213. ISSN: 2322-2093. 2014.

CLARE, K. E.; POLLARD, A. E. The effect of curing temperature on the compressive strength of soil-cement mixtures, **Géotechnique**, v. 4, p. 97-107, 1954.

CLOUGH, G. W.; SITA, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N.S. Cemented sands under static loading. **Journal of Geotechnical Engineering** Division, New York, v. 107, n. 6 p. 799-817. 1981.

CONSOLI, N.C.; da FONSECA, A.V.; SILVA, S.R.; CRUZ, R.C.; FONINI, A. Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. **Géotechnique** 62:2, 177-183. 2012.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S.; Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v 133 (2), p197-205. 2007.

CONSOLI, N. C.; FARO, V. P.; SCHNAID, F., BORN, R. B.; CARRETTA, M.S. Crosswise-loaded short and long piles in artificially cemented top sand layers embedded in lightly bonded residual soil. **Soils And Foundations**, v. 57, n. 6, p.935-946, dez. 2017.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, pp. 759-763. 2010.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, J. A.; GAUER, E. A.; dos SANTOS, V. R.; MORETTO, R. L.; CORTE, M. B. Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures. **Geotechnique Letters**, 2, 81-85. 2012.

CONSOLI, N.C., da SILVA, A., BARCELOS, A.M. et al. Porosity/Cement Index Controlling Flexural Tensile Strength of Artificially Cemented Soils in Brazil. **Geotech Geol Eng** 38, 713–722. 2020.

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S.; Strain-hardening behaviour of fibre-reinforced sand in view of filament geometry. **Geosynthetics International**. 16, No.2. 2009.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; CARRARO, J. A.; HEINECK, K. S. Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 127(9), pp. 774-782. 2001.

CONSOLI, N. C., HEINECK, K. S., CASAGRANDE, M. T., & COOP, M. R. Shear Strength Behavior of Fiber-Reinforced Sand Considering Triaxial Tests under Distinct Stress Paths. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 133(11), 1466-1469. 2007.

CONSOLI, N. C.; LOPES JUNIOR, L. S.; HEINECK, K. S. Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 21(5), 210-216. 2009.

CONSOLI, N. C.; ROCHA, C. G.; SILVANI, C. Devising dosages for soil-fly ash-lime blends based on tensile strength controlling equations. **Construction and Building Materials**, 55, pp. 238-245. 2014.

CONSOLI, N. C.; ROTTA, G. V.; PRIETTO, P.D.M. Yielding-compressibility-strength for an artificially cemented soil cured under stress. **Géotechnique**, v. 56, n.1, p 69-72. jul 2006.

CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F.; MILITITSKY, J. Interpretation of Plate Load Tests on Residual Soil Site. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**, [s.l.], v. 124, n. 9, p.857-867, set. 1998.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; PRIETTO, P. D. M. Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 1, p.96-101, jan. 2003.

COOP, M. R.; ATKINSON, J. H. The mechanics of cemented carbonate sands. **Géotechnique**, v. 43, n. 1, p. 53-67, 1993.

CORTE, M. B. **Response of Lightly Cemented Sand under Multiaxial Loading**. Tese (Doutorado). 261 f. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CRUZ, R.C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente**. 216 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CUCCOVILLO, T.; COOP, M. R. On the mechanics of structured sands. **Géotechnique**, v. 49, n. 6, p. 741-760, 1990

DALLA ROSA, F. **Efeito do estado de tensões de cura no comportamento de uma areia artificialmente cimentada**. 2009. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011. Tradução da 7ª edição norte-americana.

DANAS, K.; CASTAÑEDA, P. P.; Influence of the Lode parameter and the stress triaxiality on the failure of elasto-plastic porous materials. **International Journal of Solids and Structures**. Elsevier, 49, pp 1325-1342. 2012.

DIAMBRA, A., FESTUGATO, L., IBRAIM, E., CONSOLI, N.C. Modelling tensile/compressive strength ratio of artificially cemented clean sand. **Soils and Foundations**. Volume 58, Issue 1, pp 199-211. 2018.

DUPAS, J.M.; PECKER, A. Static and dynamic properties of sand-cement. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, v. 105, n. GT3, p. 419–435, 1979.

FESTUGATO, L.; CORTE, M. B.; IBRAIM, E.; DIAMBRA, A. Artificially cemented sand under multiaxial loading. **E3S Web of Conferences**, v 92, 11011, 2019.

FRANZIUS, J. N.; POTTS, D. M.; BURLAND, J. B.; The influence of soil anisotropy and K_0 on ground surface movements resulting from tunnel excavation. **Géotechnique**. V. 55, n 3. 189-199. 2005.

GENS, A.; NOVA, R. Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks. In: INT. SYMP. ON GEOTECHNICAL ENGINEERING OF HARD SOILS – SOFT ROCK. Athens: 1993. **Proceedings** ... Rotterdam: A. A. Balkema, 3v. v.1, p 485-494. 1993.

HAMBLY, E. C. A new true triaxial apparatus. **Géotechnique**. Vol 19, No 2, p 107-124. 1969.

HEINECK, K. S. **Estudo da influência de cimentações introduzidas sob tensão**. 1998. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

HERZOG, A., MITCHELL, J. K. Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement. **Highway Research Record** No. 36, pp. 146-171, 1963.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization—Principles and practice**, Butterworths, Australia, 1972.

- ISMAIL, M. A.; JOER, H. A.; SIM, W. H.; RANDOLPH, M. F. Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 6, p. 520–529, 2002.
- KIRKGARD, M. M.; LADE, P. V. Anisotropic three-dimensional behavior of a normally consolidated clay. **Can. Geotech. J.** Vol 30, 848-858. 1993.
- KO, H. Y.; SCOTT, R. F. A new soil testing apparatus. **Géotechnique**. Vol 17, No 1, p 40-57. 1967.
- KOLYMBAS, D., ZDRAVKOVIC, D.; POTTS, D.M. **Constitutive Modelling of Granular Materials**. Springer, Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-63115-3 DOI 10.1007/978-3-642-57018-6. 558p. 2000.
- KUMRUZZAMAN, M., YIN, J.H. Influences of principal stress direction and intermediate principal stress on the stress–strain–strength behaviour of completely decomposed granite. **Canadian Geotechnical Journal**. 47(2), 164–179. 2010. doi:10.1139/t09-079
- KUPFER, H. B.; GERSTLE, K. H. Behavior of concrete under biaxial stresses. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, ASCE, v.99, p.852-866, 1973.
- LADE, P. V, **Elasto-plastic Stress-strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surfaces**. Int. J. Solids Structures, v 13, pp 1019-1035. London. 1977.
- LADE, P. V.; KIM, M. K. **Single Hardening Constitutive Model for Soil, Rock and Concrete**. Int. J. Solids Structures, v. 14. Pp 1963-1978, London. 1995
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969. 553 p.
- LAN, G.; WANG, Y.; CHAO, S. **Influences of Speciment Geometry and Loading Rate on Compressive Strength of Unstabilized Compacted Earth Block**. Advances in Materials Science and Engineering, Vol 2018, 10p. 2018.
- LEON, H. B.; **O índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η / C_{iv}) como um parâmetro de estado para areias cimentadas**. 135f. Dissertação (mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- LEROUEIL, S.; VAUGHAN, P. R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. **Géotechnique**, v. 40, n. 3, p.467-488, 1990.

- LI, Z.; WANG, L.; LU, Y.; LI, W.; WANG, K. Experimental Investigation on the Deformation, Strength, and Acoustic Emission Characteristics of Sandstone under True Triaxial Compression. **Advances in Materials science and Engineering**. Article ID 5241386, vol 2018, 2018.
- Li, X. Yu, H S. Influence of Loading Direction on the Behaviour of Anisotropic Granular Materials. **International Journal of Engineering Science**. Vol 47, No 11-12. Pp 1284-1296. 2009.
- LIU, X.; ZHANG, X.; KONG, L.; AN, R.; XU, G. Effect of inherent anisotropy on the strength of natural granite residual soil under generalized stress paths. **Acta Geotechnica**. Vol 16, 3793-3812. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01393-5>.
- LIU, J.; OTSUBO, M.; KAWAGUCHI, Y.; KUWANO, R. Anisotropy in small-strain shear modulus of granular materials: Effects of particles properties and experimental conditions. **Soils and Foundations**. Vol 62. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.101105>.
- MANDEVILLE, D.; PENUMADU, D. True Triaxial Testing Sistem for Clay with Proportional-Integral-Differential (PID) Control. **Geotechnical Testing Journal**. Vol 27 n 2, 2004.
- MARQUES, S. F. V. **Comportamento de uma Areia Artificialmente Cimentada até Altas Tensões de Confinamento**. 379 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- MARQUES, S. F. V.; CONSOLI, N. C.; ALMEIDA E SOUSA, J. (2014). Testing Cement Improved Residual Soil Layers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 26(3), 544-550.
- MARTINS, F. B. **Investigação do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**. 300p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2001.
- MAYNE, P. W. Stress Anisotropy effects on Clay Strength. **Journal of Geotechnical Engineering**. Vol 111, no 3, paper 19550. 1985.
- MICHELIS, P. A True Triaxial for Soil and Rock. **Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock**. Donaghe, Chaney & Silver (eds), ASTM STP 977, 806-818. 1988.
- MOREIRA, E. B. **Capacidade de carga de fundações superficiais assentes sobre camada finite de solo cimentado**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2020.

MOH, Z. C. Reactions of Soil Minerals with Cement and Chemicals. **Highway Research Record**, V. 86, P. 39–61, 1965.

NAKASE, A.; KAMEI, T. Undrained Shear Strength Anisotropy of Normally Consolidated Cohesive Soils. **Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Vol 23, no 1. 1983.

NISHIMURA, S.; MINH, N.A.; JARDINE, R. J. Shear strength anisotropy of natural London Clay. **Géotechnique**, vol 75, no 1, 49-62, 2007.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo de arenito Botucatu, visando o seu emprego na pavimentação**. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 1991.

O'ROURKE, T. D.; CRESPO, E. Geotechnical properties of cemented volcanic soil. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, New Your, v. 114, n. 10, p. 1126-1147.

OCHIAIA, H.; LADE, P. V. Three-Dimensional Behavior of Sand with Anisotropic Fabric. **Journal of Geotechnical Engineering**. Vol 109, no 10. 1313-1328. 1983.

Passados 10 anos, ninguém foi condenado por acidente do Metrô de São Paulo. **Agência Brasil**. 11 de janeiro de 2017. Acesso em 16 de junho de 2021.
<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2017-01/passados-10-anos-ninguem-foi-condenado-por-acidente-no-metro-de-sao-paulo>

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORBAHA, A.; TANAKA, H.; KOBAYASHI, M. State of the art in deep mixing technology. Part II: Applications. **Ground Improvement**, J. ISSMGE, v. 2, n. 2, p. 125–139, 1998. <https://doi.org/10.1680/gi.1998.020303>

PRIETTO, P. D. M. **Resistência e dilatância de solos cimentados: uma abordagem teórico-experimental**. 2004. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RAZEGHI, H. R.; ROMANI, H. M. Experimental investigation on the inherent and initial induced anisotropy of sand. **KSCE Journal of Civil engineering**. Vol 19 (3):583-591. 2015.

RODRIGUEZ, N. M.; LADE, P. V. True Triaxial Tests on Cross-Anisotropic Deposits of Fine Nevada Sand. **International Journal of Geomechanics**. Vol 13(6), 779-793. 2013. Doi 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000282.

ROTTA, G. V. **Cimentação introduzida sob tensão: compreendendo a importância do índice de vazios de formação da estrutura no comportamento mecânico de solos cimentados**. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2000.

REDDY, K. **Behavior of cemented sand under three-dimensional loading**. Civil Engineering (Tesis), Illinois Institute of Technology, Chicago. 1990.

REDDY, K., SAXENA, S. K. Effects of cementation on stress-strain and strength characteristics of sands. **Soils and foundations**. Vol 33, no 4, 121-135. Japanese Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering. 1993.

ROTTA, G.V. **Plastificação de um solo cimentado curado sob tensão**. 2005. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ROTTA, G.V.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M; COOP, M.R.; GRAHAM, J. Isotropic yielding in artificially cemented soil curing under stress. **Géotechnique**, v.53, n.5, p. 493-501, dez 2003.

SADEK, T. **The multiaxial Behaviour and Elastic Stiffness of Hostun Sand**. Doctorship tesis, University of Bristol. 213p. 2006.

SALENÇON, J. **Handbook of Continuum Mechanics – General Concepts Thermoelasticity**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York. 2001.

SAXENA, S. K; LASTRICO, R. M. Static properties of lightly cemented sand. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE, v. 104, n. 12, p. 1449–1464, 1978.

SILVANI, C. **Solos Artificialmente Cimentados em Célula Cúbica: Isotropia a Pequenas Deformações e na Ruptura**. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

The THREE Gorges Dam in China: forced resettlement, suppression of dissent and labor rights concerns (Report). **Human Rights Watch/Asia** Vol. 7, No. 1 ed. New York: Human Rights Watch. Acesso em 27 dec. 2019. Fev. 1995.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 42, n. 6, p. 1569–1584, 2005. <https://doi.org/10.1139/t05-069>.

TRIPURA, D. D.; DAS, S. Shape and Size Effects on the Compressive Strength of Cement Stabilised Rammed Earth. **ASCE AEI 2017**. 2017.

VARGAS, M. Some engineering properties of residual clay soils occurring in southern Brazil. **3rd Int. conf. on Soil Mechanics and Foundation 1**, pp 67-71.

VAUGHAN, P. Engineering and hydraulic properties of in situ residual soils – general report. **Int. Symp. on Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks** (pp. 231-263). Athens: A. A. Balkema, 1985.

WILLIAMS, H. S. **Development of a True Triaxial Apparatus for Soil**. Thesis – The Department of Civil and Environmental Engineering. Louisiana State University. Louisiana. 2004.

YAMADA, Y.; ISHIHARA, K.; Anisotropic deformation characteristics of sand under three-dimensional stress conditions. **Soils and Foundations**. V 19, n 02, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1979.

YAMADA, Y.; ISHIHARA, K.; Undrained deformation characteristics of sand in multi-directional shear. **Soils and Foundations**. V 23, n 01, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1983.

YANG, L.T.; LI, X.; YU, H.S.; WANATOWSKI, D. A laboratory study of anisotropic geomaterials incorporating recent micromechanical understanding. **Acta Geotech** .11(5):1111–1129. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0423-7>

ZDRAVKOVIC', L.; JARDINE, R.J. Undrained anisotropy of K0-consolidated silt. **Can Geotech J** 37(1):178–200. 2000. <https://doi.org/10.1139/t99-09>

7 APÊNDICE

7.1 SISTEMA DE LEITURA DAS CÉLULAS DE CARGA

Projeto elétrico sistema de leitura da célula de carga

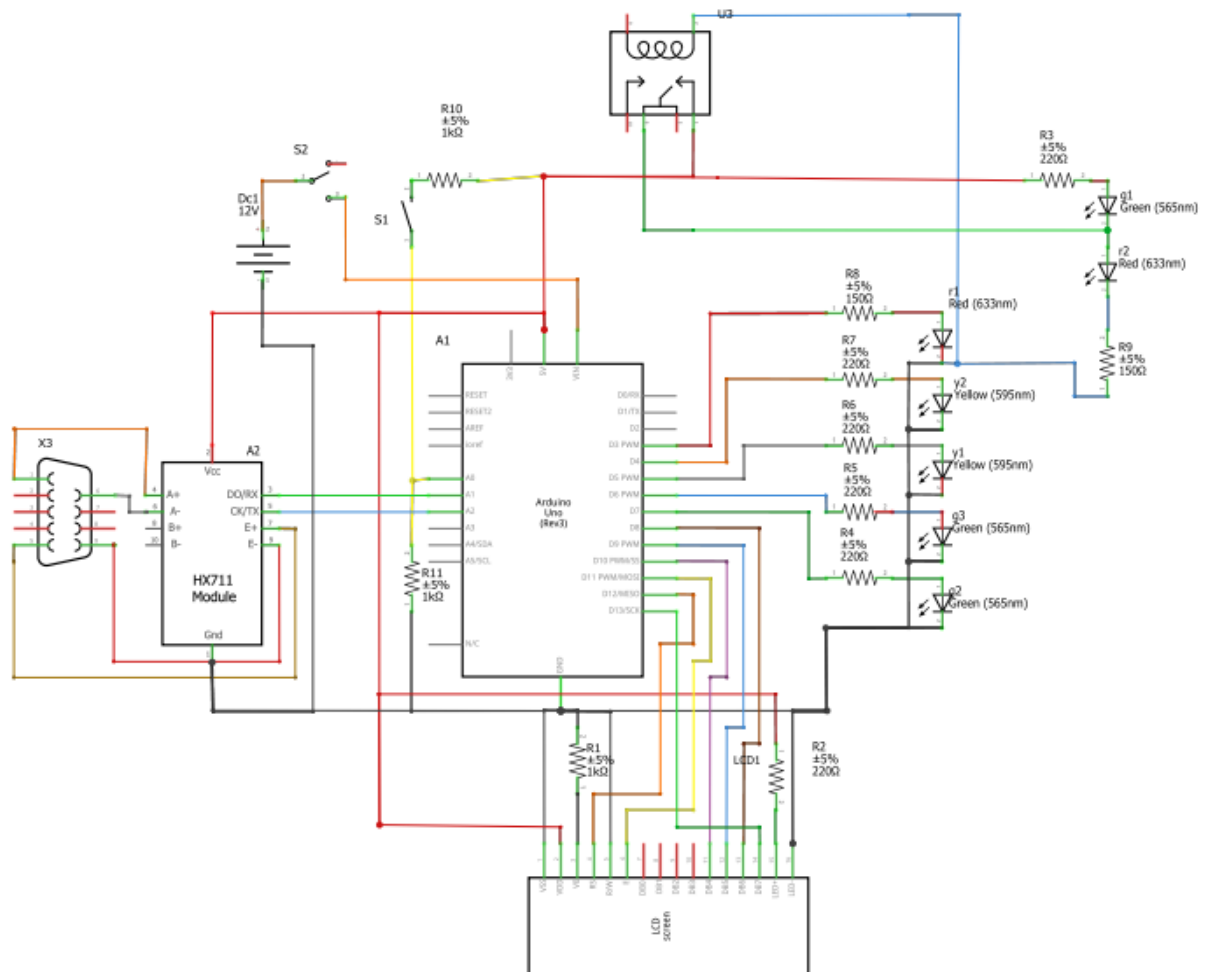


Figura 7-1 Esquema elétrico aquisição

Link para o download em formato Fritzing:

<https://1drv.ms/u/s!AnGLUhbDRRUHjaRU0Q3ToyzQ8BI3bg?e=S5SAyb>

Código do Arduino

```

/* Leitor de celula de carga (HX711) com display em LCD 16x2
*
* UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
* PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
* LEGG - Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental
* Doutorando Dionatas Hoffmann Andreghetto
*
* Distribuicao livre desde que citado fonte

*/

//Inclui as duas bibliotecas necessarias para rodar o código, a do LCD e do HX711
#include <LiquidCrystal.h>
#include "HX711.h"

//Declaração das portas digitais dos leds e relay

//Para todos os propósitos g1 a primeira luz verde que deve acender, esta está ligada a
porta digital 2 junto com a r2, ambas que não estão inclusas no código. O restante será
acesso dependendo do valor das constantes

const int g2 = 7; //Porta digital da g2

const int g3 = 6; //Porta digital da g3

```

```

const int y1 = 5; //Porta digital da y1
const int y2 = 4; //Porta digital da y2
const int r1 = 3; //Porta digital da r1
const int off1 = 2; //Porta digital que comanda relay, g1 e r2

//Declara o dos valores que acenderam as luzes e desativar o rel.
long g2v;
long g3v;
long y1v;
long y2v;
long r1v;
long offv;

//Chamada da função do HX de sua biblioteca
HX711 scale;

//Declara o dos pinos do LCD na seguinte ordem: lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7)
LiquidCrystal lcd(12, 11, 10, 8, 9, 13);

//Cria o das variáveis usadas para armazenar os valores instantâneos (i) e máximos (Pmax) das leituras
float Pmax;

float i;

```

```

void setup()
{
  //Declaração dos OUTPUTS digitais
  pinMode(g2, OUTPUT);
  pinMode(g3, OUTPUT);
  pinMode(y1, OUTPUT);
  pinMode(y2, OUTPUT);
  pinMode(r1, OUTPUT);
  pinMode(off1, OUTPUT);

  //Inicialização do LCD da biblioteca lcd
  lcd.begin(16, 2);

  //Configuração da célula de carga
  //Declaração dos valor rlv que quando deve disparar a r1
  rlv = 100;

  //Escreve espera
  lcd.setCursor(0,0);

  lcd.print("Espera "); // Os espaços apartir do espere são necessários para apagar o
  que estava escrito nos 16 caracteres do LCD

  //Inicialização do HX711 com as pinagens (Dout , Sck)
  scale.begin(A1, A2);

```

```

scale.read();

scale.read_average(20);

scale.get_value(5);

scale.get_units(5);

//Declara o que o valor da escala utilizado ser 1
scale.set_scale(1.f);

//Função de tara
scale.tare();

//Escreve a de que a célula está pronta
lcd.setCursor(0,0);

lcd.print("Inicio e Tara");

lcd.setCursor(0,1);

lcd.print("Completo");

//Leitura inicial
i = scale.get_value(5)/40000;

//Arma relé, liga g1 e desliga r2
digitalWrite(off1,LOW);

//Define valor inicial de Pmax
Pmax = i;

//Espera para estabilizar
delay(1000);

```



```
//Determina o dos valores em fun o do valor caracteristico (r1v)
```

```
g2v = r1v*0.05;
```

```
g3v = r1v*0.30;
```

```
y1v = r1v*0.50;
```

```
y2v = r1v*0.80;
```

```
offv = r1v*1.3;
```

```
//Comandos para debugg se necessario
```

```
//Serial.begin(9600);
```

```
// Serial.println("Startup + tare is complete");
```

```
//Escreve o texto basico nas duas linhas
```

```
lcd.setCursor(0,0);
```

```
lcd.print("Maximo ");
```

```
lcd.setCursor(0,1);
```

```
lcd.print(" ");
```

```
}
```

```
void loop()
```

```
{
```

```

//Enquanto valor lido for inferior ao desarme do rel ser lido valores atuais
while(i<offv)
{
    //Ler o valor da carga com média dos últimos 5 valores para reduzir ruído
    i = abs(scale.get_value(5))/40000;//Obs o valor aqui tirado como absoluto

    //Utilizado para debuggin
    /*Serial.print("Atual ");
    Serial.print(i);
    Serial.print(" Max ");
    Serial.println(Pmax);*/
    //Imprime o valor da carga atual
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Atual ");
    lcd.setCursor(7,1);
    lcd.print(i,3);

    //Condicional para sobrescrever valor máximo
    if (Pmax<i)
    {
        //Armazena novo valor de Pmax e Imprime na tela
        Pmax = i;
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Maximo ");

```

```

    lcd.setCursor(7,0);

    lcd.print(Pmax,3);

}

//Ler o estado do botão

int sensorValue = analogRead(A0);

//Verifica se o botão analógico está pressionado. Caso não esteja, o valor do
analogRead(A0) é ~0, caso pressionado o valor é ~512. Devido variações um valor de 300
está bom

if (sensorValue >300){

    //Tira a tara, define valor zerado de i e sobrescreve Pmax com o novo valor do i,
    imprime novo valor de Pmax para o usuário. Aqui não é necessário mandar imprimir o
    valor do valor atual que já vai ser atualizado no próximo ciclo

    scale.tare();

    i = abs(scale.get_value(5))/40000;

    Pmax = i;

    lcd.setCursor(0,0);

    lcd.print("Maximo      ");

    lcd.setCursor(7,0);

    lcd.print(Pmax);

}

//Verifica se o valor da cara instantânea está maior do que os limites estabelecidos para
ligar os LEDs

if(i>g2v){digitalWrite(g2,HIGH);}

else{digitalWrite(g2,LOW);}

if(i>g3v){digitalWrite(g3,HIGH);}

else{digitalWrite(g3,LOW);}

```

```

if(i>y1v){digitalWrite(y1,HIGH);}
else{digitalWrite(y1,LOW);}
if(i>y2v){digitalWrite(y2,HIGH);}
else{digitalWrite(y2,LOW);}
if(i>r1v){
    digitalWrite(r1,HIGH);
    lcd.setCursor(0,1);    //Impreme para o usu?rio parar de carregar a c?lula pois est?
acima do valor caracteristico
    lcd.print("MAXIMO PARE!!!");
}
else{digitalWrite(r1,LOW);}
}

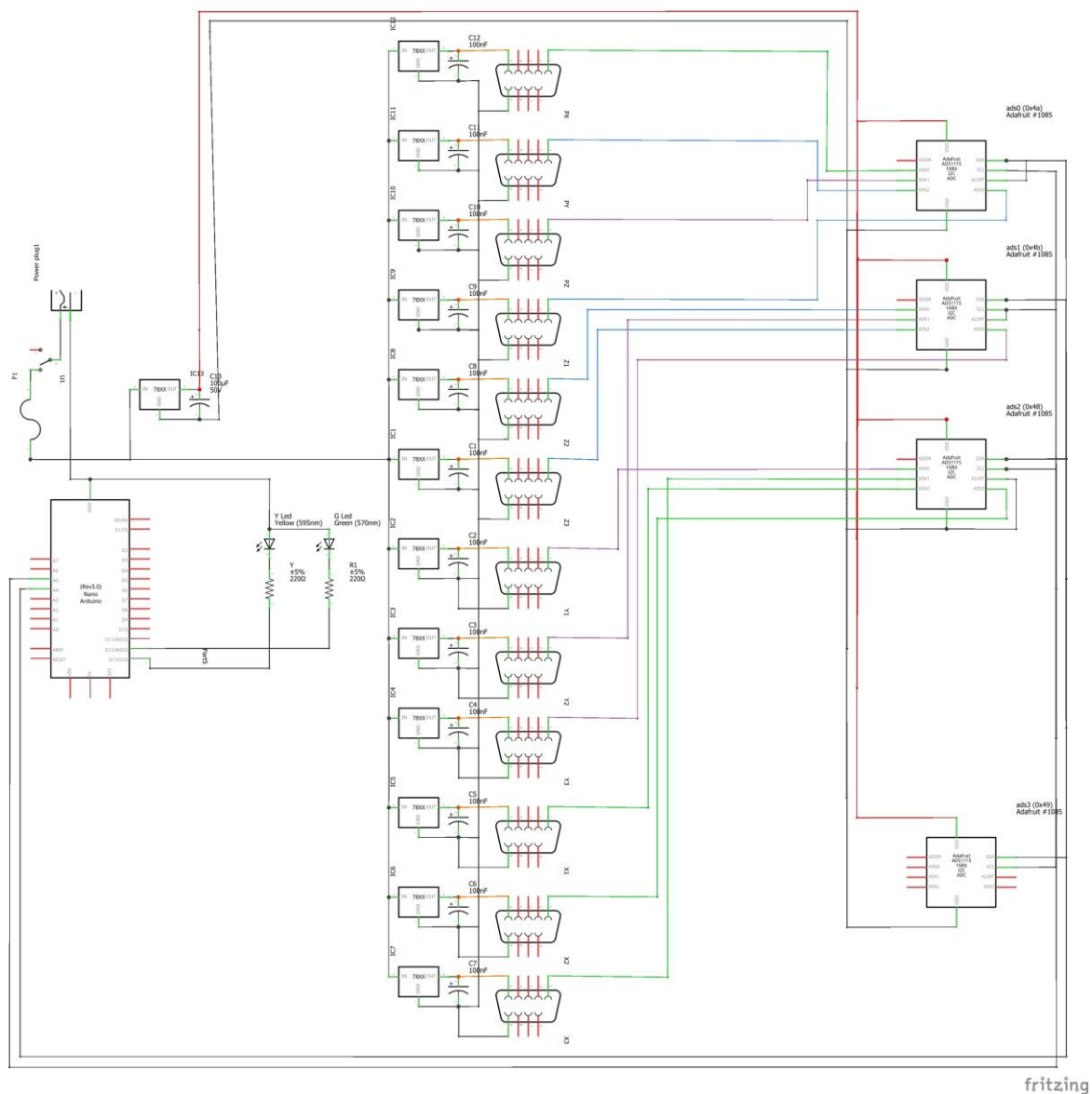
//Aqui o valor da carga ? superior a offv, desarma relay, desliga g1 , liga r2 e imprime
SOBRECARGA
digitalWrite(off1,HIGH);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("!!!SOBRECARGA!!!");

}

```

7.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

7.2.1 Esquema elétrico



O projeto pode ser obtido neste link

<https://1drv.ms/u/s!AnGLUhbDRRUHjP9LqjVOO3701CYhSg?e=kL5L3d>

7.2.2 Código do Arduino

```
//UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
//PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC
//Dionatas Hoffmann Andreghetto
//
//Algoritmo de aquisição de dados v4

//Chamada de bibliotecas
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>

Adafruit_ADS1115 ads0(0x4A);// adsX o nome do dispositivo, 0x4X o endereço,
dependendo de como foi feita a ligação no hardware

Adafruit_ADS1115 ads1(0x4B);
Adafruit_ADS1115 ads2(0x48);
//Adafruit_ADS1115 ads3(0x49);/* Código para expansão */

const int Y = 13;// Yellow Led
const int G = 12;// Green Led

int ini;

void setup(void)
{
  pinMode(Y, OUTPUT);
  pinMode(G, OUTPUT);
```

```

Serial.begin(9600);

while (!Serial) {

    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only

}

Serial.println("Beholder");

ads0.setGain(GAIN_TWOTHIRDS); //Declara o de ganho de 2/3 voltagem máxima
5,3V e inicio dos 3 ads

ads0.begin();

ads1.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);

ads2.begin();

ads2.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);

digitalWrite(G, HIGH);

digitalWrite(Y,HIGH);

ini = ads0.readADC_SingleEnded(0);ini = ads1.readADC_SingleEnded(1);ini =
ads2.readADC_SingleEnded(1);//ini = ads3.readADC_SingleEnded(1);//Pede leitura dos ads,
serve para alertar o usuário caso os ads estejam sem VDD, final incluso para expansão

digitalWrite(Y,LOW);//Caso luz amarela permanesça ligada durante o SETUP, indica que a
aquisição não conseguiu ler um dos 3 ads.

}

void loop(void)

{

int l6_t px,py,pz,x1,x2,x3,y1,y2,y3,z1,z2,z3; //Declara o das variaveiz de leitura

while (Serial.available() > 0) { //Le a porta serial

int a = Serial.parseInt();

if (Serial.read() == '\n') { // Se a leitura for inteiro, toma as leituras dos sensores e escreve os
valores lidos.

digitalWrite(Y,HIGH); //Liga a luz amarela para mostrar que tomou valor

```

```
    px = ads0.readADC_SingleEnded(0);py = ads0.readADC_SingleEnded(2);pz =  
ads0.readADC_SingleEnded(1);  
  
    x1 = ads2.readADC_SingleEnded(2);x2 = ads2.readADC_SingleEnded(3);x3 =  
ads2.readADC_SingleEnded(1);  
  
    y1 = ads2.readADC_SingleEnded(0);y2 = ads1.readADC_SingleEnded(1);y3 =  
ads1.readADC_SingleEnded(3);  
  
    z1 = ads0.readADC_SingleEnded(3);z2 = ads1.readADC_SingleEnded(0);z3 =  
ads1.readADC_SingleEnded(2);  
  
    Serial.print(px); Serial.print("\t"); Serial.print(py); Serial.print("\t"); Serial.print(pz);  
Serial.print("\t");  
  
    Serial.print(x1); Serial.print("\t"); Serial.print(x2); Serial.print("\t"); Serial.print(x3);  
Serial.print("\t");  
  
    Serial.print(y1); Serial.print("\t"); Serial.print(y2); Serial.print("\t"); Serial.print(y3);  
Serial.print("\t");  
  
    Serial.print(z1); Serial.print("\t"); Serial.print(z2); Serial.print("\t"); Serial.print(z3);  
Serial.println("\t");  
  
    digitalWrite(Y,LOW);// Desliga a luz amarela para acabar o recebimento  
  
    }  
  
    }  
  
    }
```


7.3 SISTEMA DE ATUADORES

7.3.1 Código Arduino Moradin

```
#include <AFMotor.h>

AF_Stepper PX(200, 1);
AF_Stepper PY(200, 2);

void setup()
{
  PX.setSpeed(0);
  PY.setSpeed(0);
  pinMode(2, OUTPUT);
  digitalWrite(2,HIGH);

  //Inicia conversa serial
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ;
  }
  Serial.println("Moradin");
}

void loop()
```

```
{  
while (Serial.available() > 0) {  
  {  
    // look for the next valid integer in the incoming serial stream:  
    int velX = Serial.parseInt();  
    // do it again:  
    int anguloX = Serial.parseInt();  
    // do it again:  
    int dirX = Serial.parseInt();  
    // do it again:  
    int velY = Serial.parseInt();  
    // do it again:  
    int anguloY = Serial.parseInt();  
    // do it again:  
    int dirY = Serial.parseInt();  
    // do it again:  
  
    if (Serial.read() == '\n') {  
      //Espera enter para fazer a modificação de parâmetros  
      digitalWrite(2,LOW);  
      velX = constrain(velX,0,40);  
      anguloX = constrain(anguloX,0,1023);  
      dirX = constrain(dirX,0,1);  
      velY = constrain(velY,0,40);  
      anguloY = constrain(anguloY,0,1023);  
    }  
  }  
}
```

```

dirY = constrain(dirY,0,1);

//Pega os valores de envio em velocidade, angulo e direção
PX.setSpeed(velX);

if (dirX==0){PX.step(anguloX,FORWARD,MICROSTEP);}
else {PX.step(anguloX,BACKWARD,MICROSTEP);}

PX.release();//Aqui ele deixa o motor em idle, para tanto não usar energia quanto não
esquentar

PY.setSpeed(velY);

if (dirY==0){PY.step(anguloY,FORWARD,MICROSTEP);}
else {PY.step(anguloY,BACKWARD,MICROSTEP);}

PY.release();//Aqui ele deixa o motor em idle, para tanto não usar energia quanto não
esquentar

Serial.print(velX); Serial.print(anguloX); Serial.print(dirX); Serial.print(velY);
Serial.print(anguloY); Serial.println(dirY);

digitalWrite(2,HIGH);

}

}

}

}

//O código pode ser baixado neste link
https://1drv.ms/u/s!AnGLUhbDRRUHjY447vc\_4icYOoQTcw?e=Sgq0Tx

```

7.3.2 Código Arduino Talos

```
#include <AFMotor.h>

AF_Stepper PZ(200, 2);
//AF_Stepper PC(200, 1);

void setup()
{
  PZ.setSpeed(0);
  //PC.setSpeed(0);
  pinMode(2, OUTPUT);
  digitalWrite(2,HIGH);

  //Inicia conversa serial
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ;
  }
  Serial.println("Talos");
}

void loop()
{
  while (Serial.available() > 0) {
    {
```

```

// look for the next valid integer in the incoming serial stream:

int velZ = Serial.parseInt();

// do it again:

int anguloZ = Serial.parseInt();

// do it again:

int dirZ = Serial.parseInt();

// do it again:

/* int velC = Serial.parseInt();

// do it again:

int anguloC = Serial.parseInt();

// do it again:

int dirC = Serial.parseInt();

// do it again:*/

if (Serial.read() == '\n') {

//Espera enter para fazer a modificação de parâmetros

digitalWrite(2,LOW);

velZ = constrain(velZ,0,40);

anguloZ = constrain(anguloZ,0,1023);

dirZ = constrain(dirZ,0,1);

/* velC = constrain(velC,0,40);

anguloC = constrain(anguloC,0,1023);

dirC = constrain(dirC,0,1);*/

//Pega os valores de envio em velocidade, angulo e direção

PZ.setSpeed(velZ);

```

```

if (dirZ==0){PZ.step(anguloZ,FORWARD,MICROSTEP);}
else {PZ.step(anguloZ,BACKWARD,MICROSTEP);}

PZ.release();//Aqui ele deixa o motor em idle, para tanto não usar energia quanto não
esquentar

/*

PC.setSpeed(velC);

if (dirC==0){PC.step(anguloC,FORWARD,MICROSTEP);}
else {PC.step(anguloC,BACKWARD,MICROSTEP);}

PC.release();//Aqui ele deixa o motor em idle, para tanto não usar energia quanto não
esquentar

*/

Serial.print(velZ); Serial.print(anguloZ); Serial.println(dirZ); /*Serial.print(velC);
Serial.print(anguloC); Serial.println(dirC);*/

digitalWrite(2,HIGH);

}

}

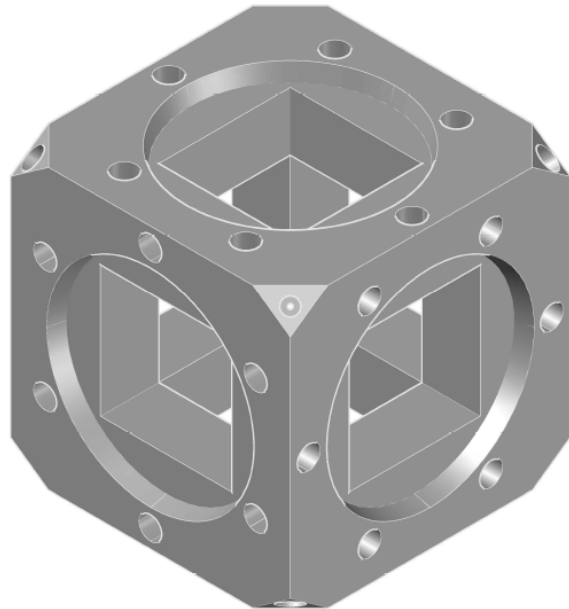
}

}

//O código pode ser baixado neste link
https://1drv.ms/u/s!AnGLUhbDRRUHjY42sEFcuLzIeH4K7A?e=wGMhFD

```


7.4 PROJETO CÉLULA CÚBICA

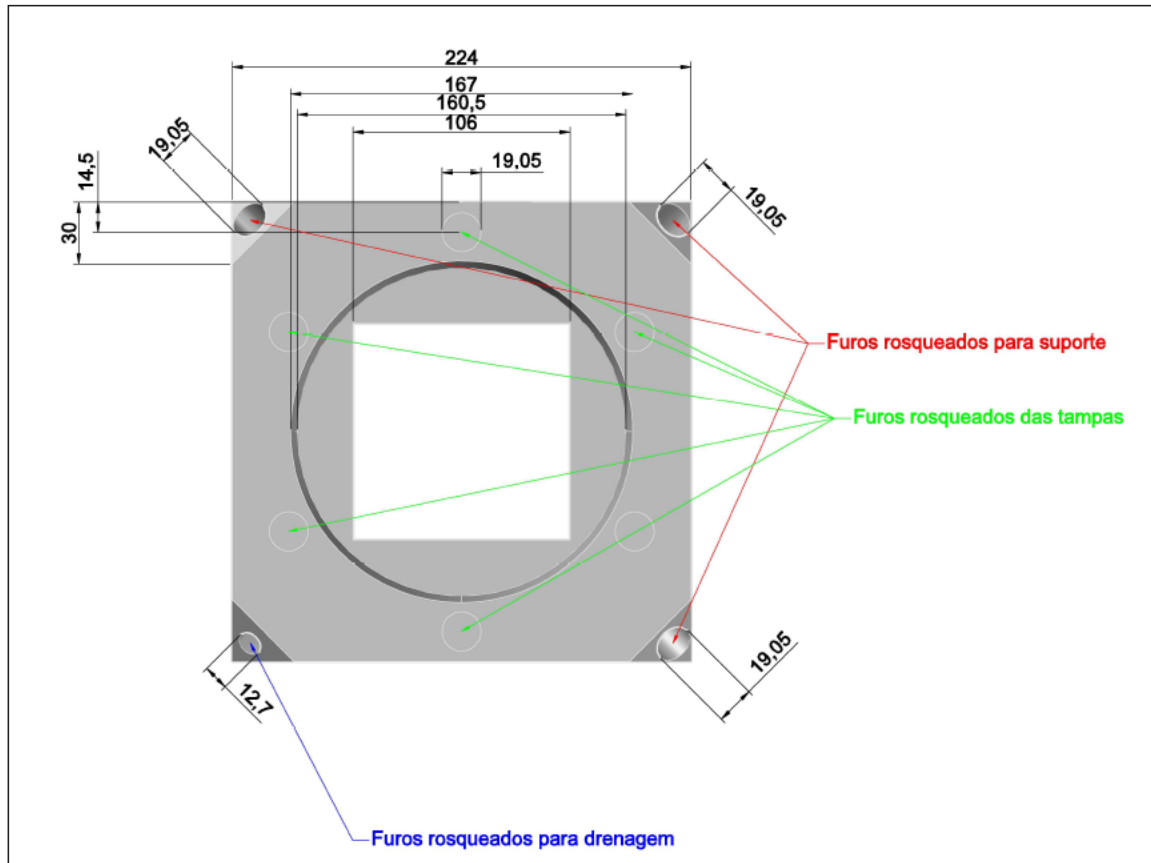


Peça cúbica simétrica exceto pela furações. Os furos para as tampas são intercalados para não coincidirem.

Em 6 das 8 quinas há suportes para fixações. Em duas quinas diametralmente opostas há furações para drenos e rosqueamento nas extremidades.

Projeção isométrica - Cubo
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

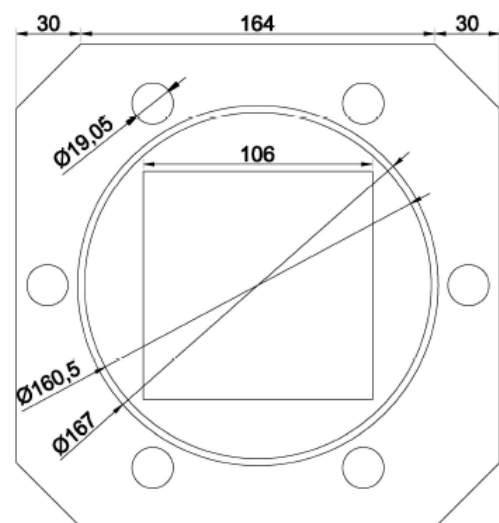
Escala 1:2
Folha 1/19
Abr / 2019



Furações cíclicas nas faces são cônicas, diâmetro externo 167mm, interno 160,6mm e profundidade 12,6mm.

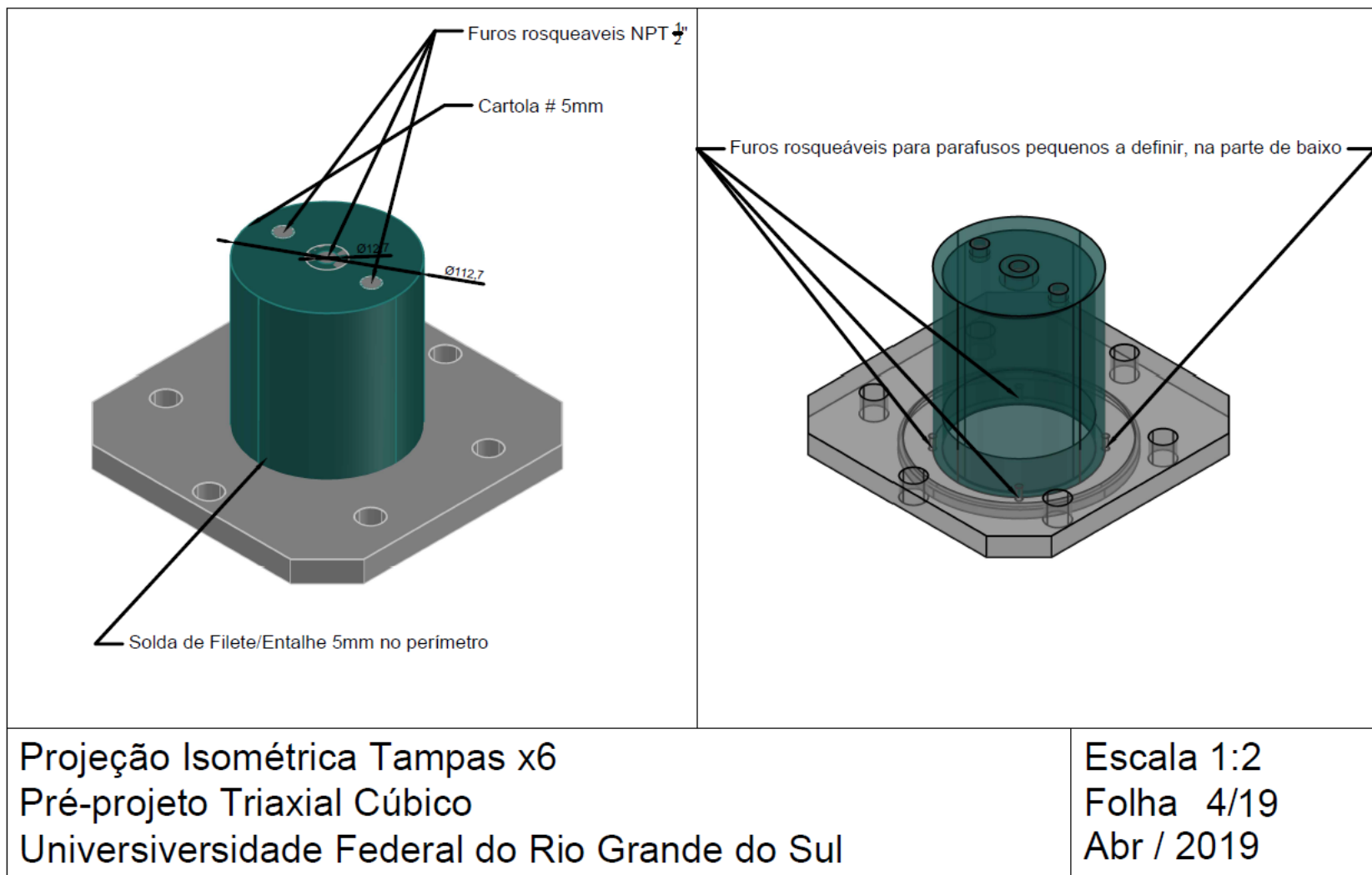
Projeção Frontal
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

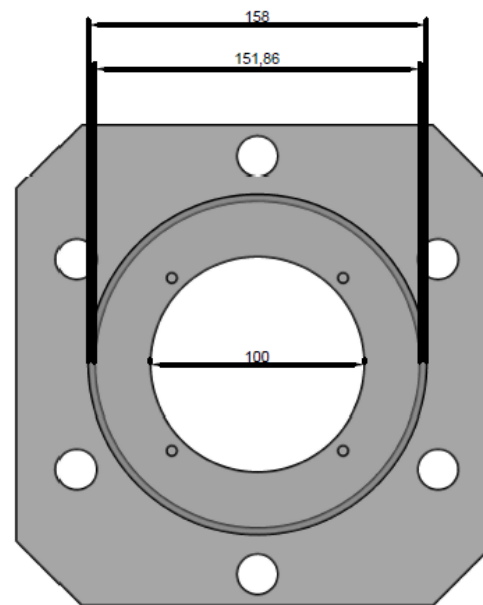
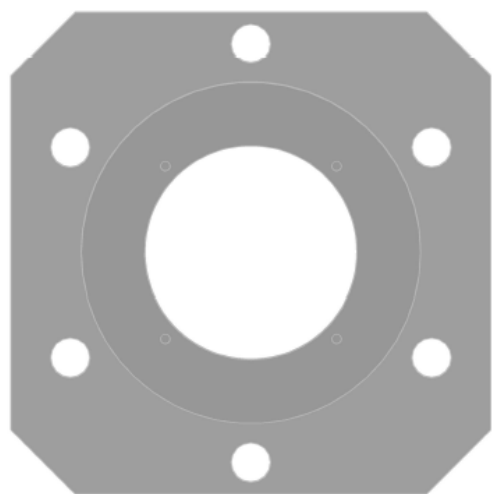
Escala 1:2
Folha 2/19
Abr / 2019



Desenho Cubo Frontal
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

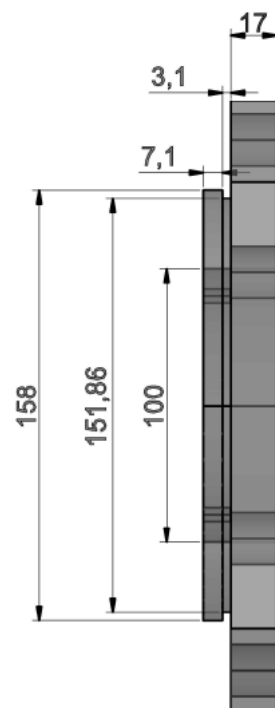
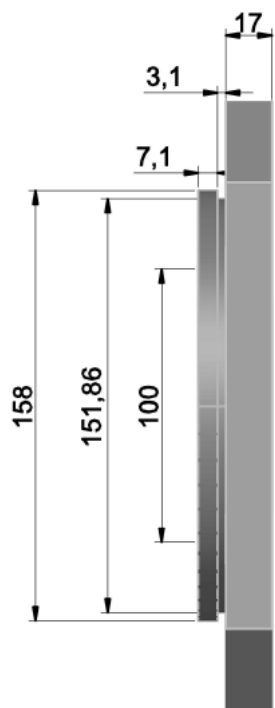
Escala 1:2
Folha 3/19
Abr / 2019





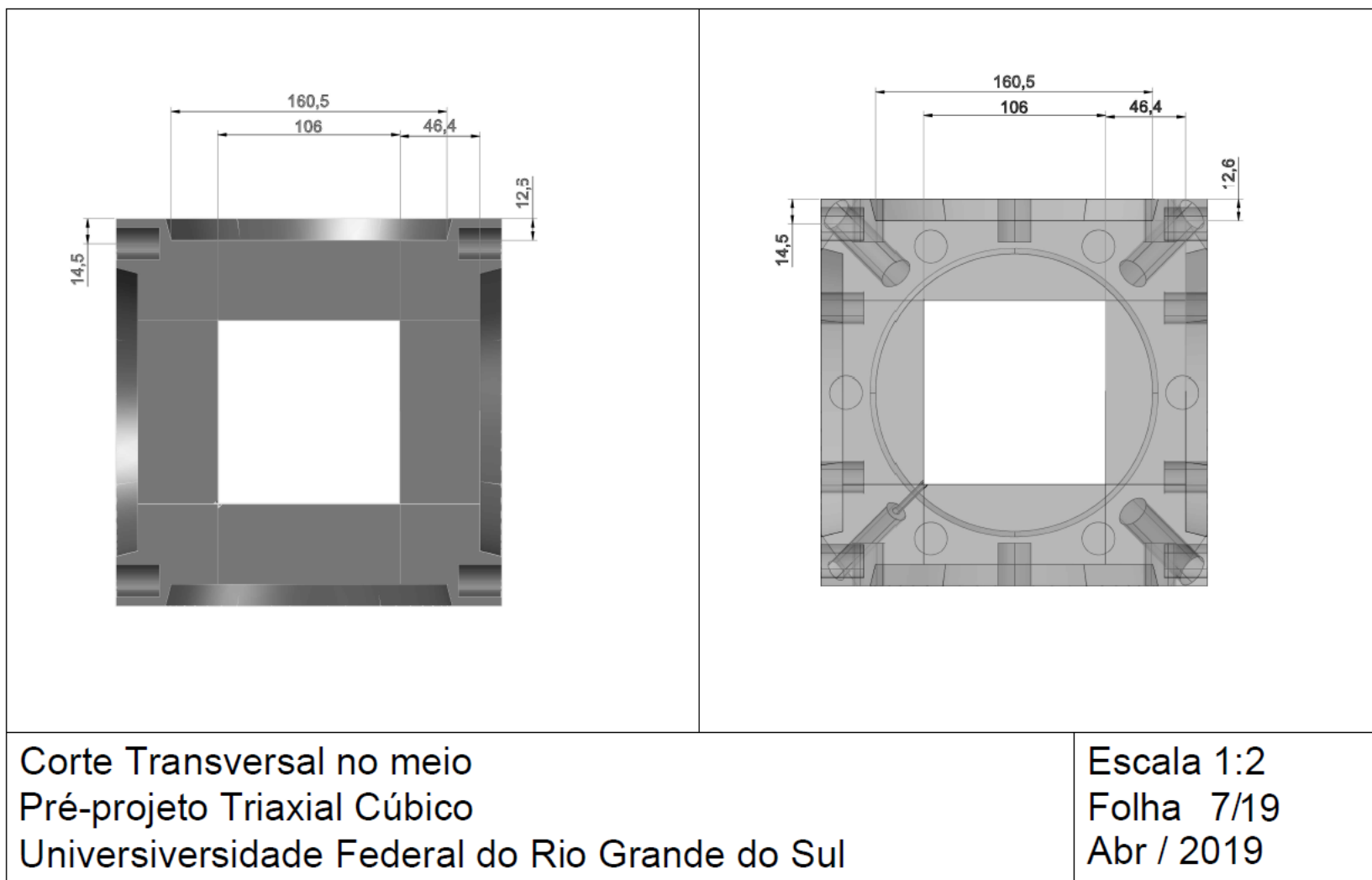
Desenho Tampas Parte Inferior, sem cartola x6
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

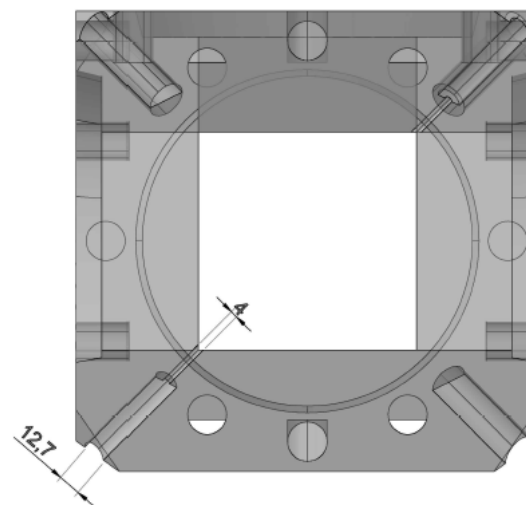
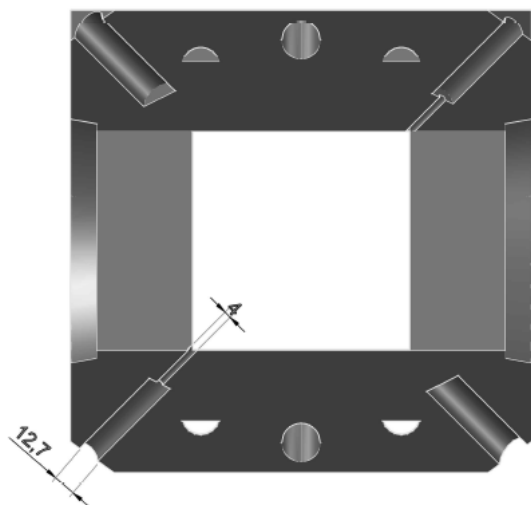
Escala 1:2
Folha 5/19
Abr / 2019



Vista lateral tampas para cushions sem a cartola
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

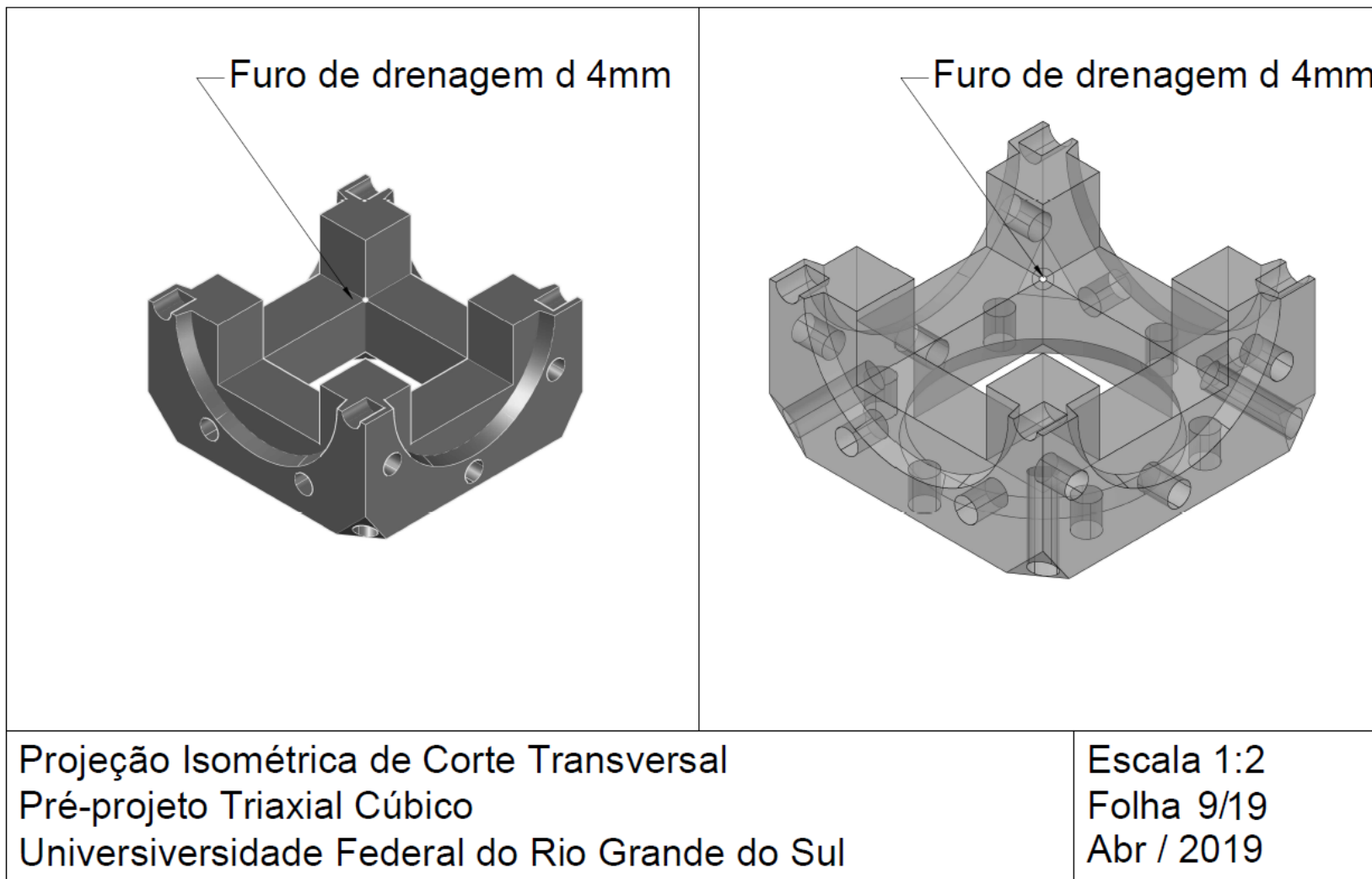
Escala 1:2
Folha 6/19
Abr / 2019

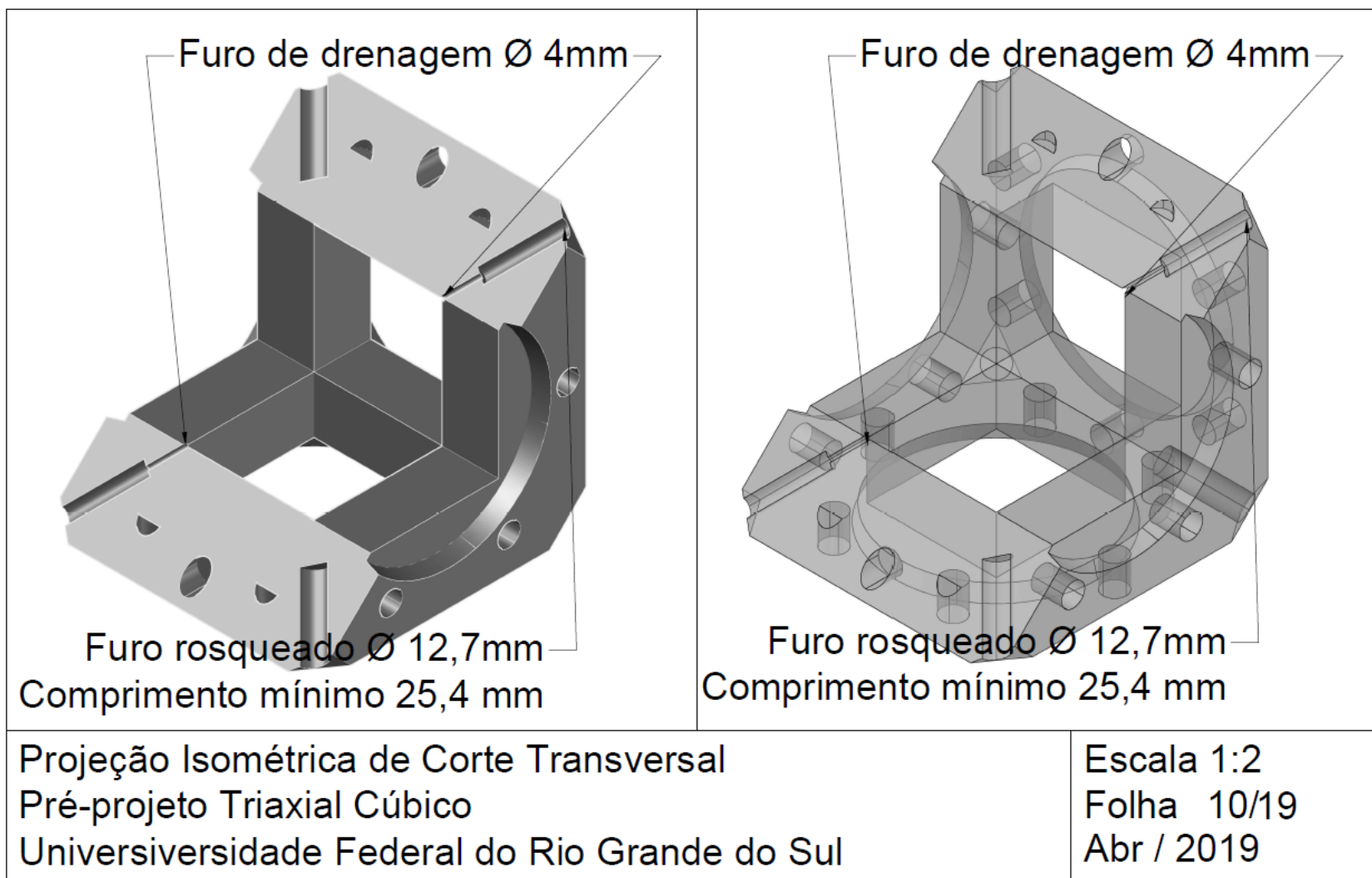


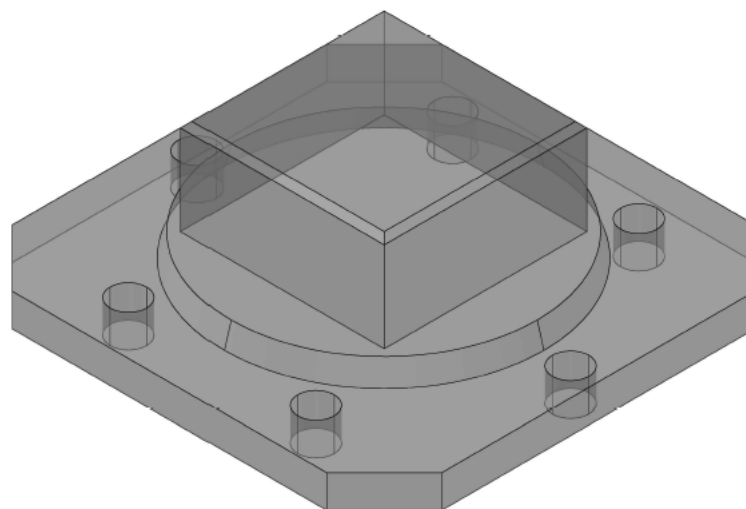
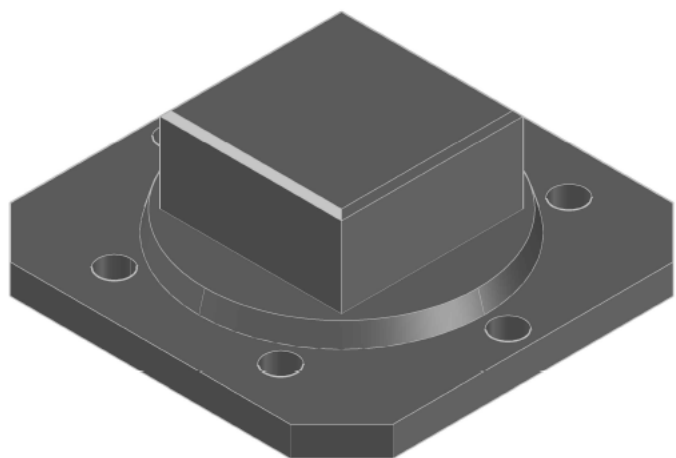


Corte Diagonal
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escala 1:2
Folha 8/19
Abr / 2019

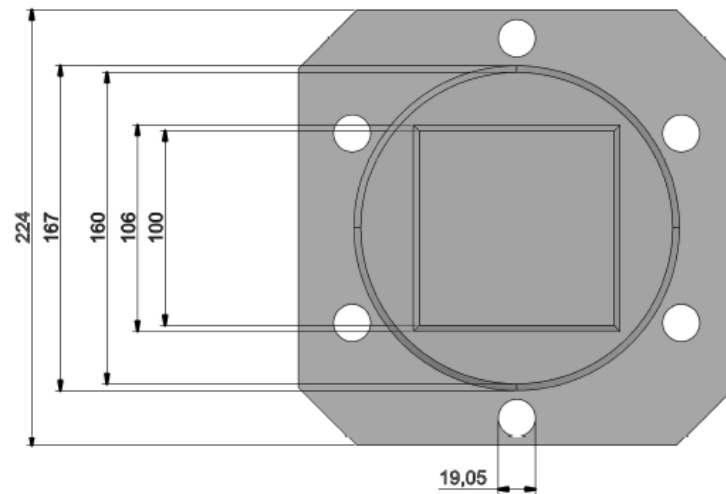






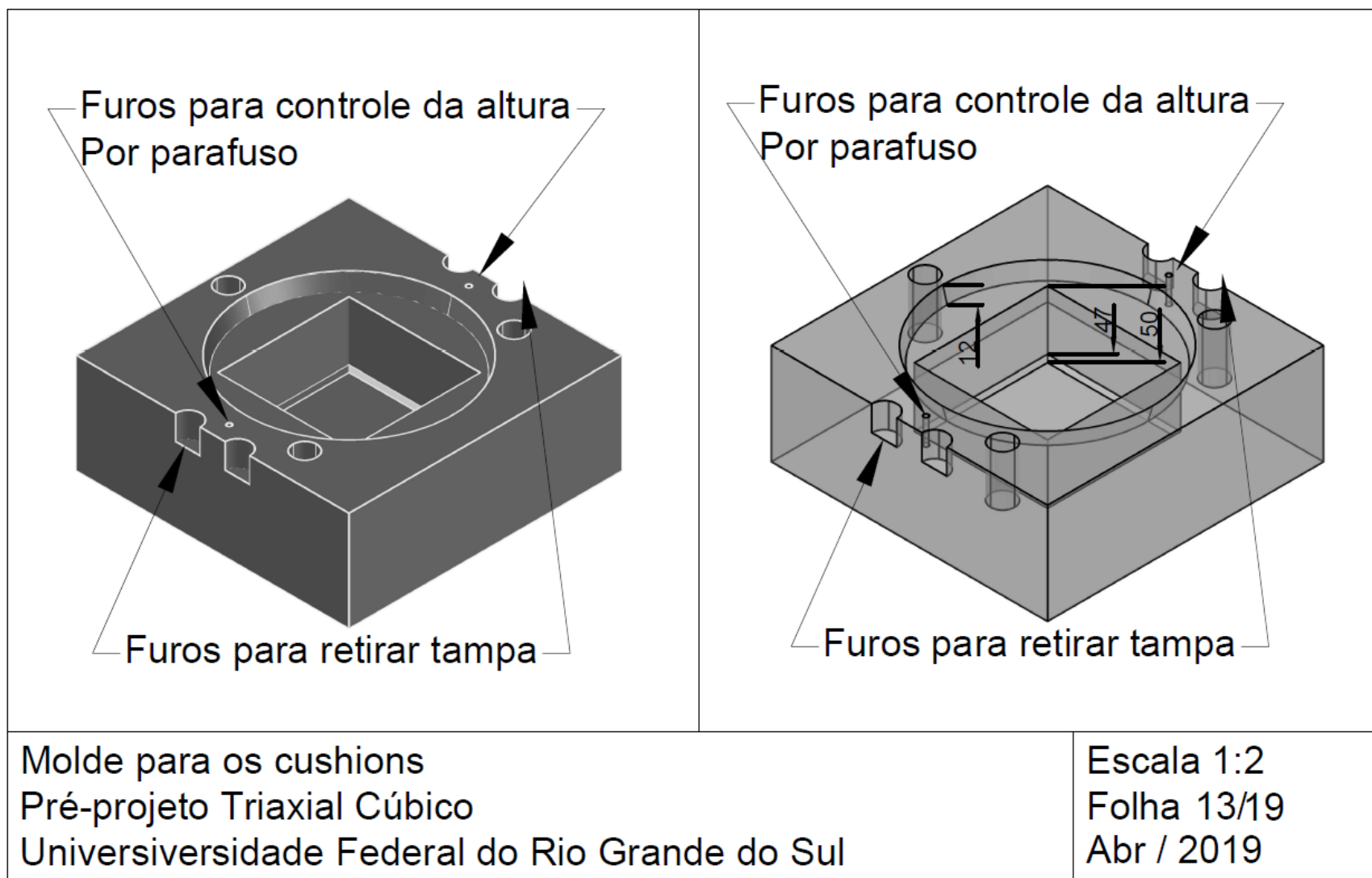
Tampas rígidas isométricas x3
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

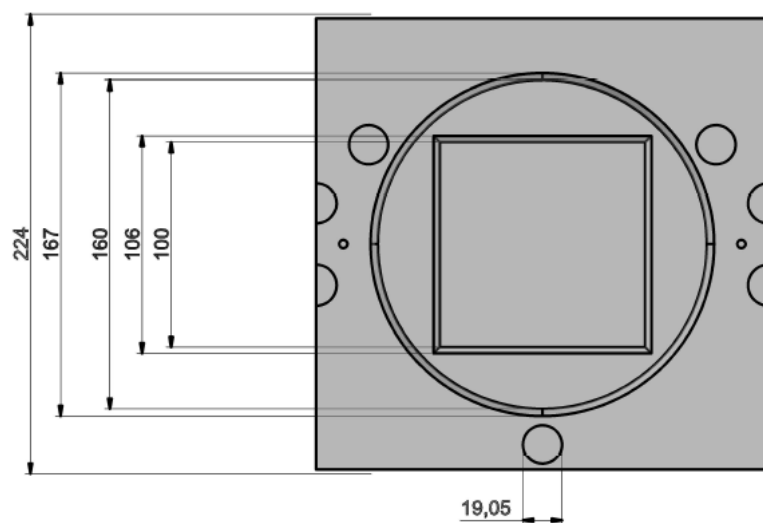
Escala 1:2
Folha 11/19
Abr / 2019



Tampa rígida cotas x3
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

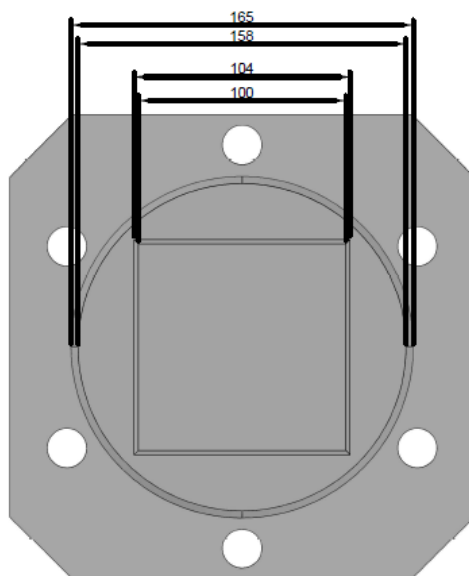
Escala 1:2
Folha 12/19
Abr / 2019





Molde para cushions planta
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

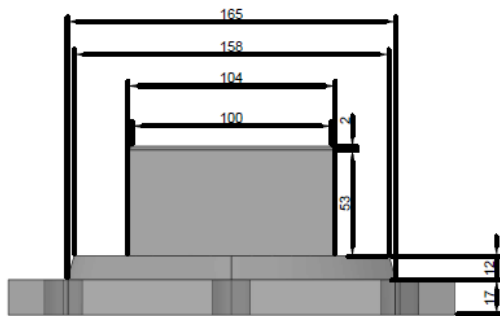
Escala 1:2
Folha 14/19
Abr / 2019



Tampa para molde de cushions planta
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universivversidade Federal do Rio Grande do Sul

Escala 1:2
Folha 15/19
Abr / 2019

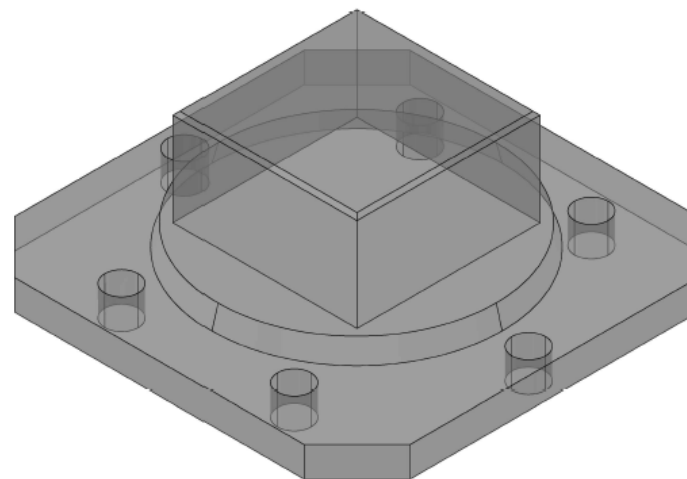
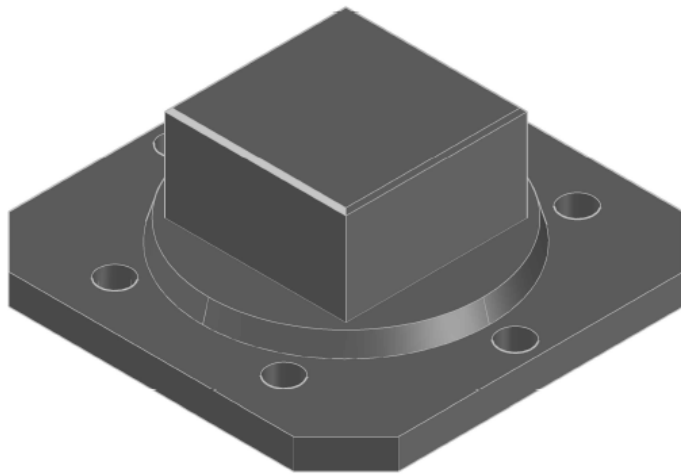
Tampa para os moldes,
similar as tampas
rígidas, porém com
dimensões diferentes



Tampa para molde de cushions planta
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

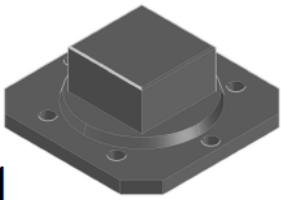
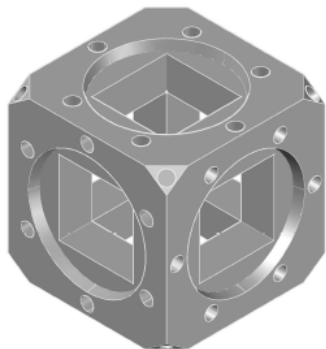
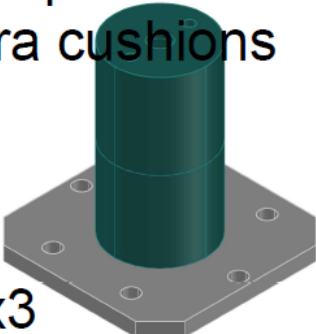
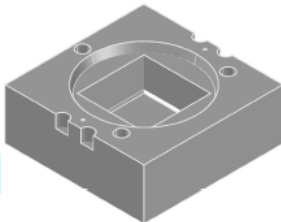
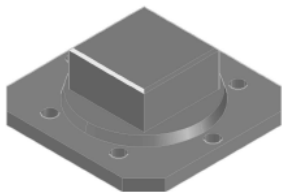
Escala 1:2
Folha 16/19
Abr / 2019

Peça parecida com as tampas rígidas, porém com dimensões um pouco diferentes

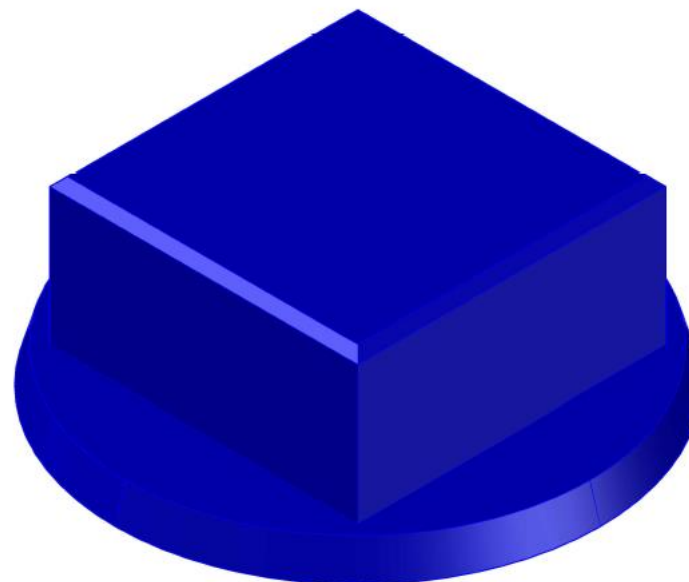
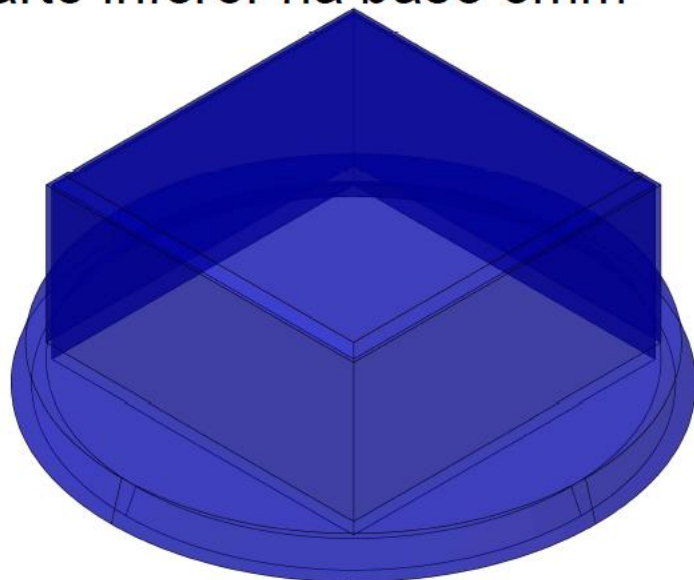


Tampa molde para os cushions isométrica x1
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escala 1:2
Folha 17/19
Abr / 2019

<p>Tapa para molde das cushions</p>  <p>x1</p>	<p>Cubo principal</p>  <p>x1</p>	<p>Tampas cubo para cushions</p>  <p>x3</p>
<p>Molde para cushion de borracha</p>  <p>x1</p>		<p>Tampas Rígidas</p>  <p>x3</p>
<p>Quantificação das peças Pré-projeto Triaxial Cúbico Universidade Federal do Rio Grande do Sul</p>		<p>Escala 1:4 Folha 18/19 Abr / 2019</p>

Cushion de borracha feito a partir do molde, vazado.
Espessura na parte superior 1mm parte do quadrado, na
parte inferior na base 5mm



Quantificação das peças
Pré-projeto Triaxial Cúbico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escala 1:1
Folha 19/19
Abr / 2019

7.5 GRÁFICOS DE TODOS OS TRIAXIAIS REALIZADOS

7.5.1 Triaxiais cúbicos de areia de Osório não cimentada

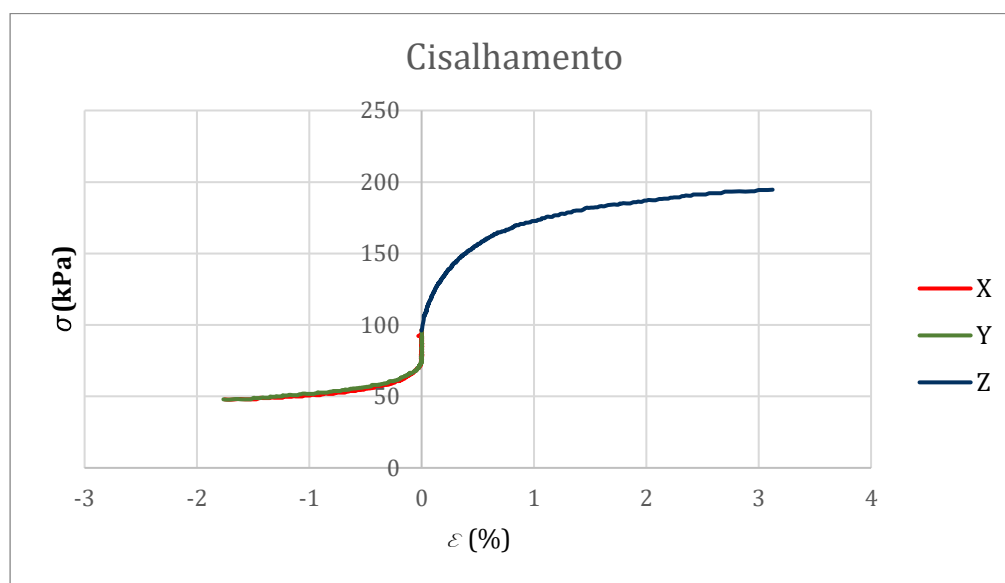


Figura 7-2 Tensão deformação amostra aOnc-0°

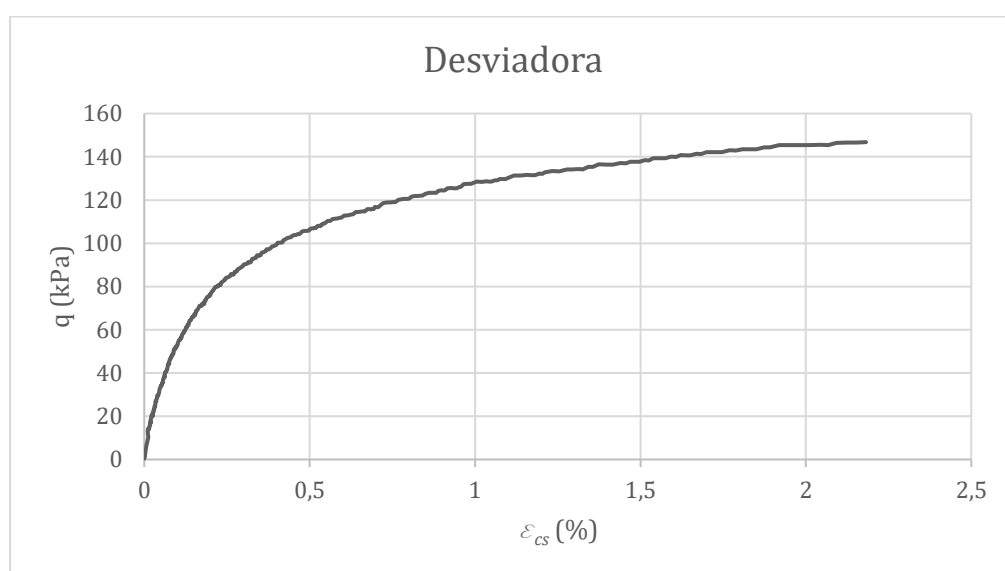


Figura 7-3 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-0°

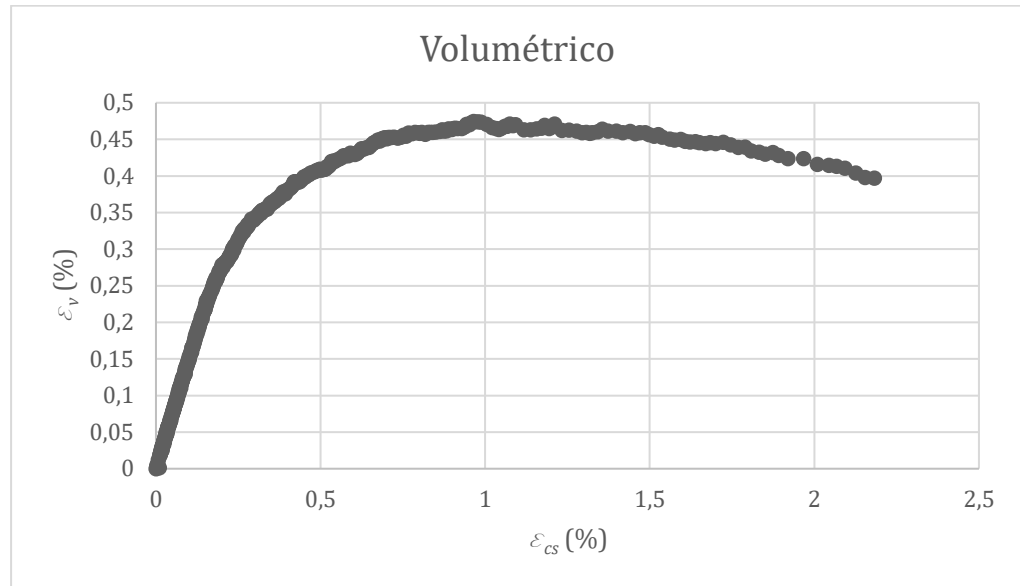


Figura 7-4 Comportamento volumétrico amostra aOnc-0°

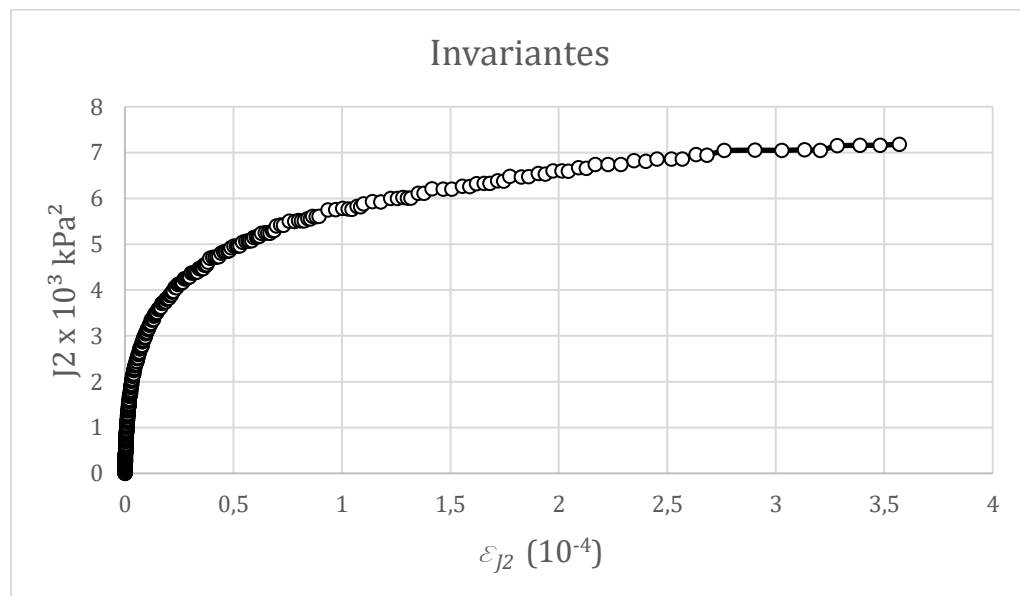


Figura 7-5 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-0°

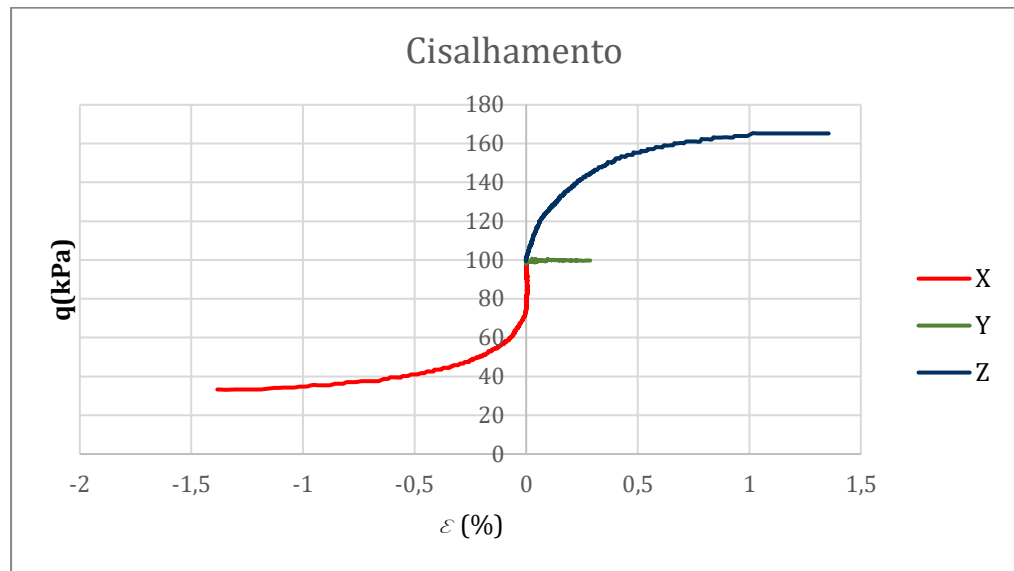


Figura 7-6 Tensão deformação amostra aOnc-30°

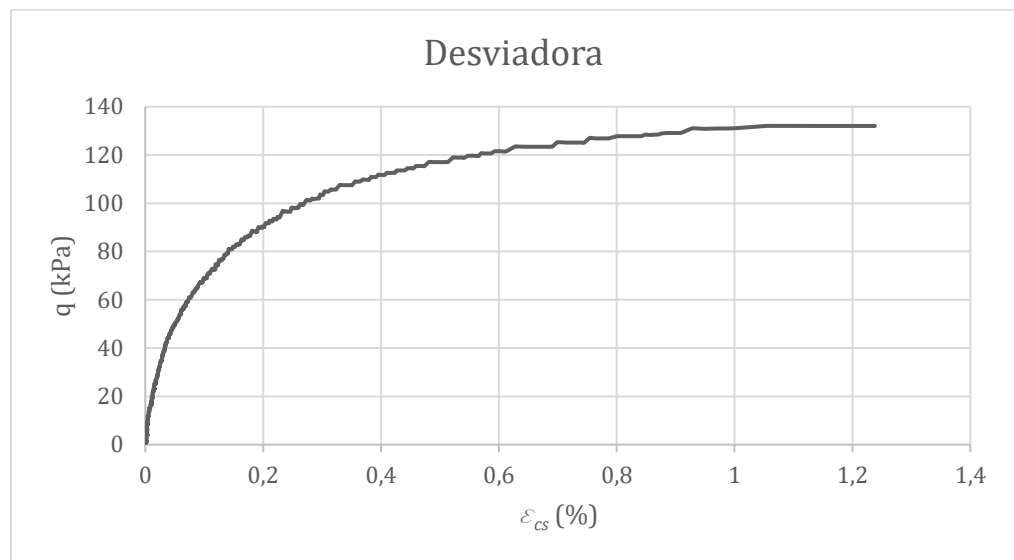


Figura 7-7 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-30°

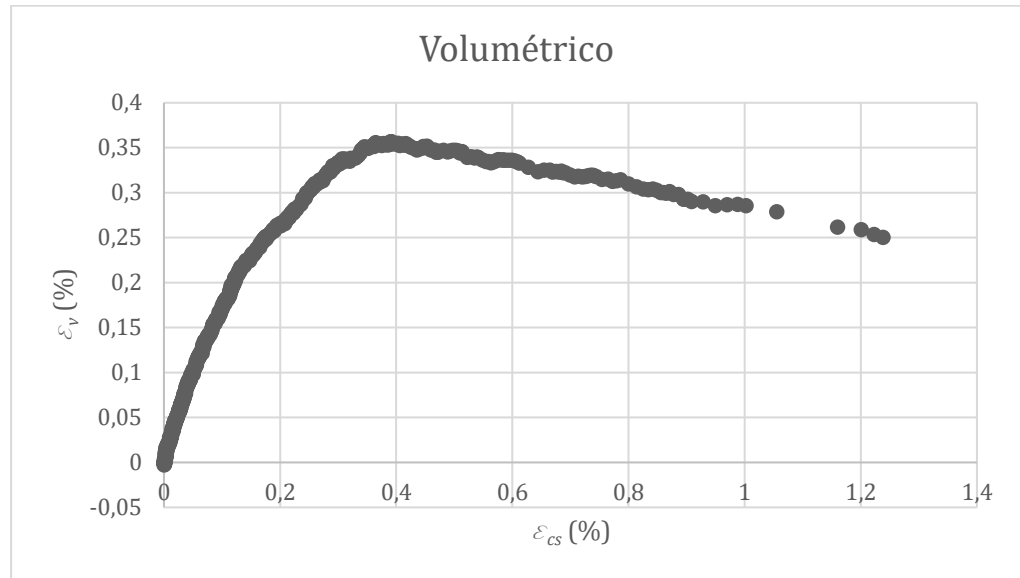


Figura 7-8 Comportamento volumétrico amostra aOnc-30°

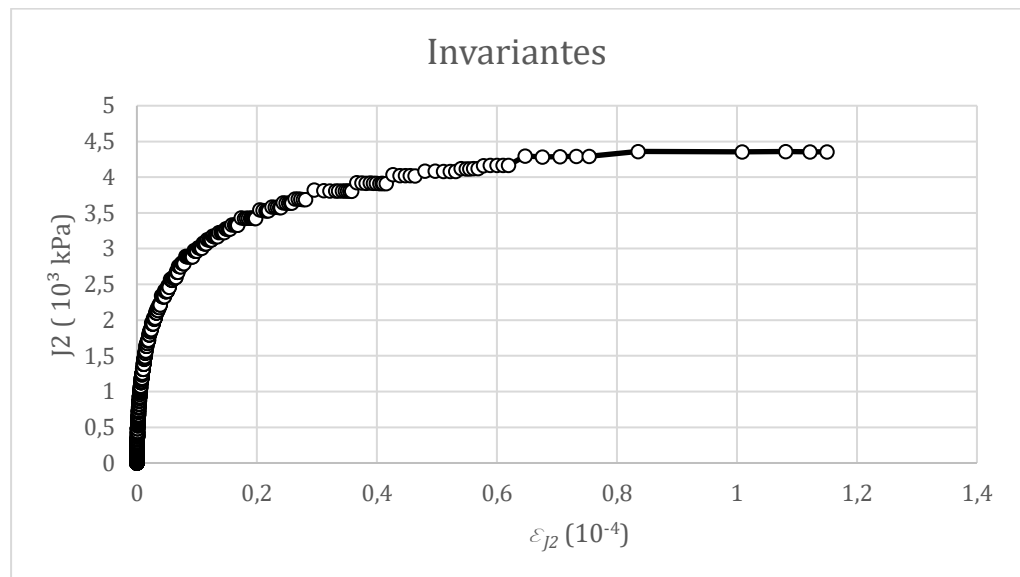


Figura 7-9 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-30°

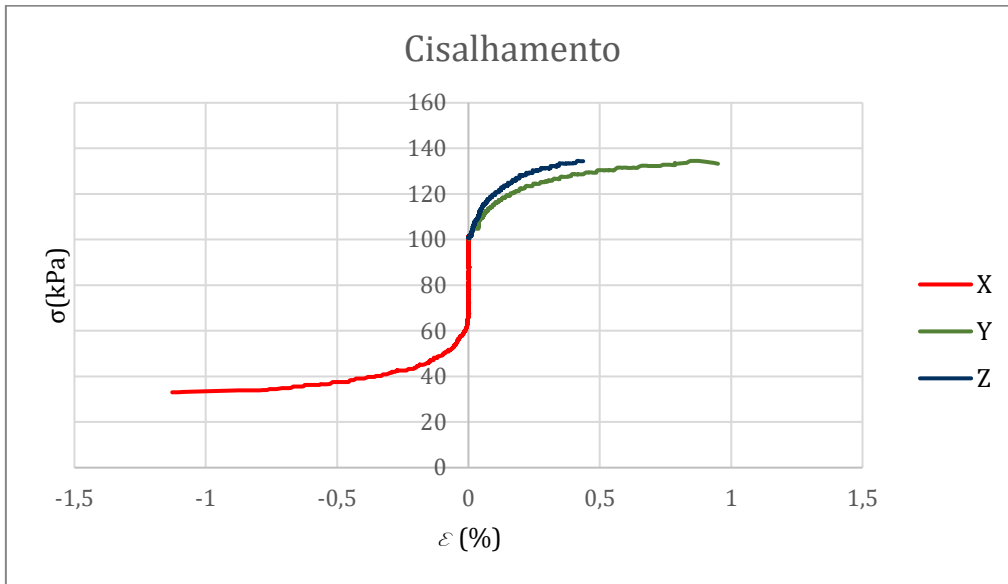


Figura 7-10 Tensão deformação amostra aOnc-60°

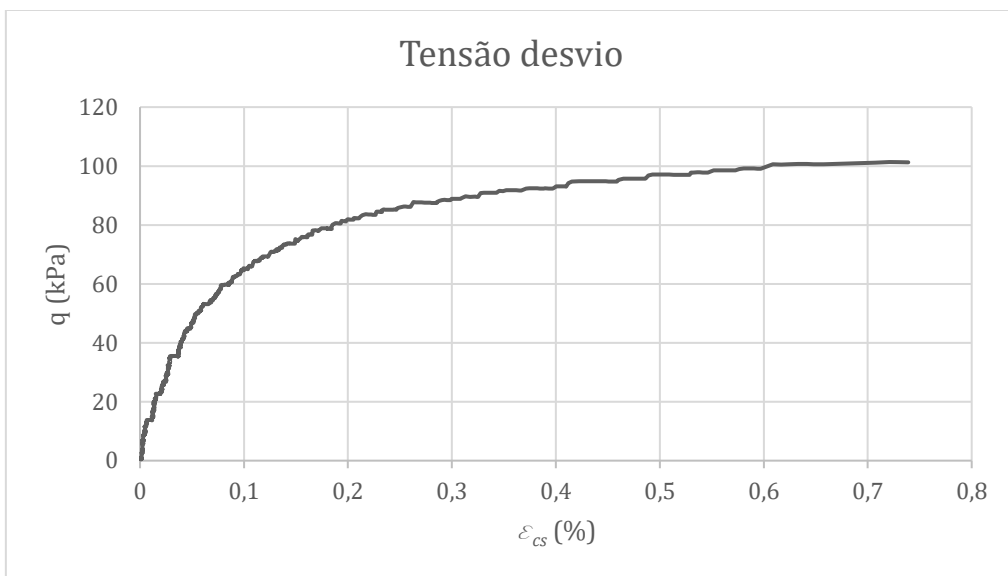


Figura 7-11 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-60°

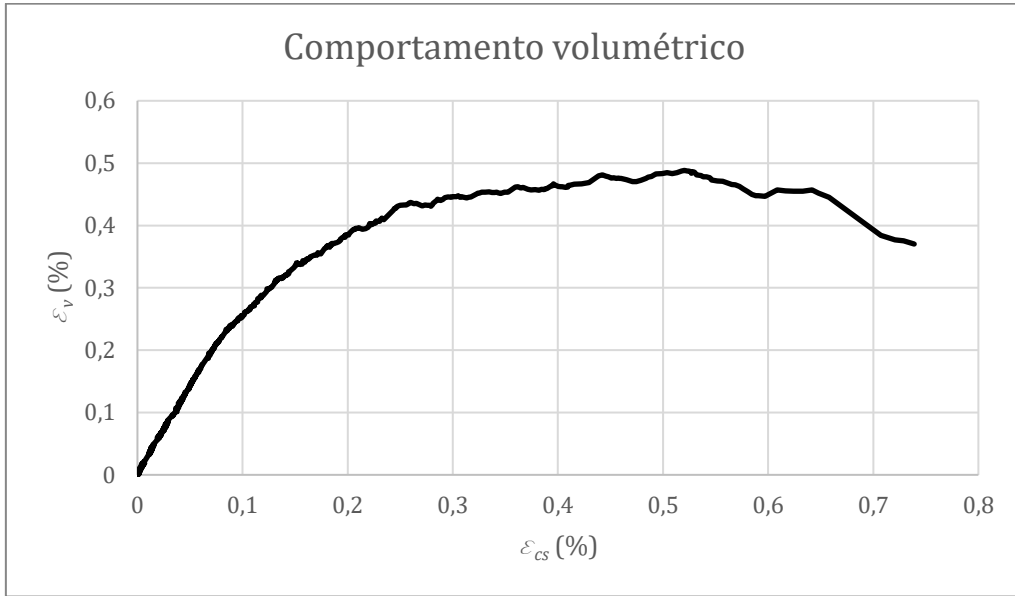


Figura 7-12 Comportamento volumétrico amostra aOnc-60°

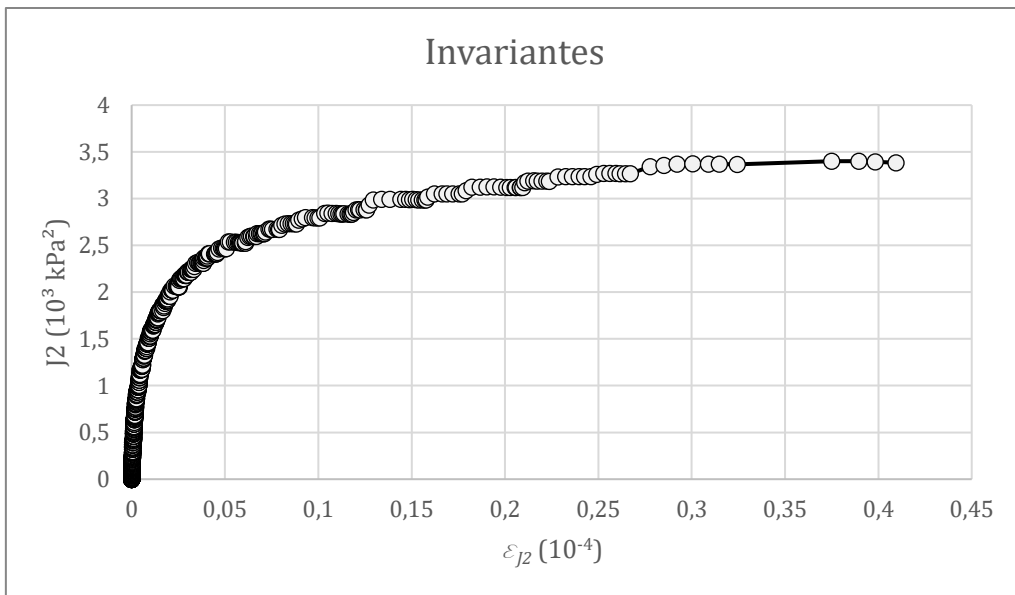


Figura 7-13 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-60°

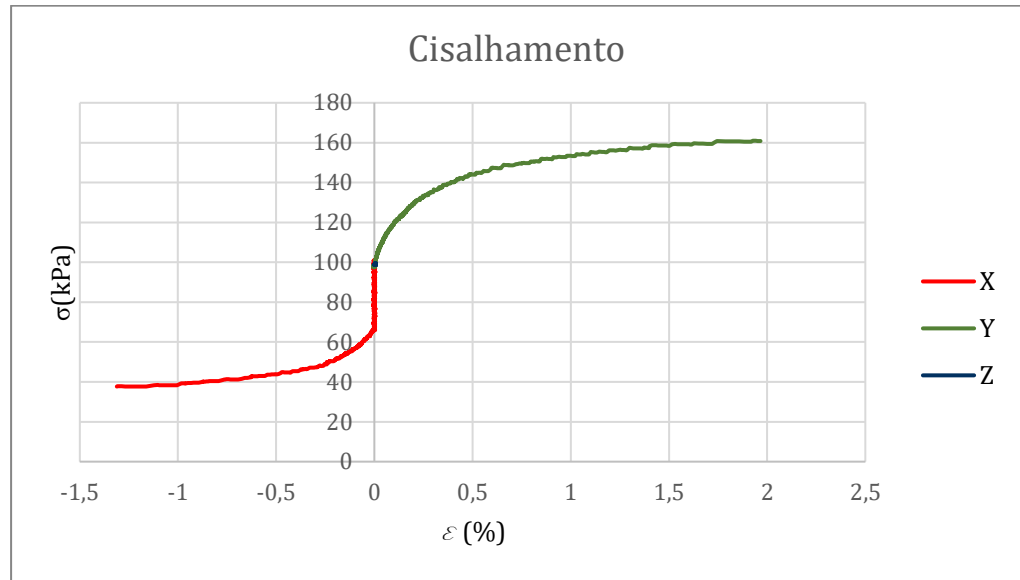


Figura 7-14 Tensão deformação amostra aOnc-90°

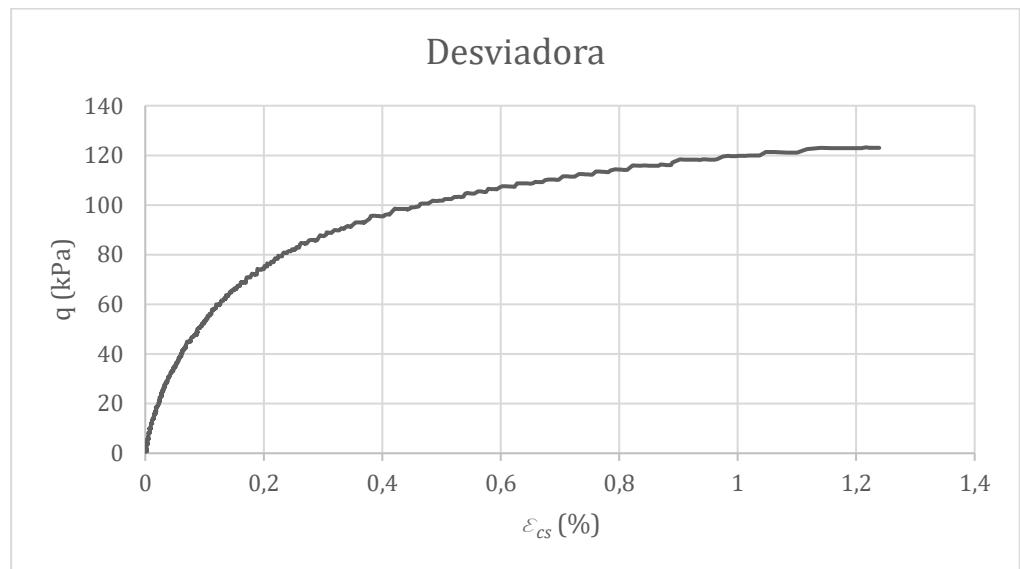


Figura 7-15 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-90°

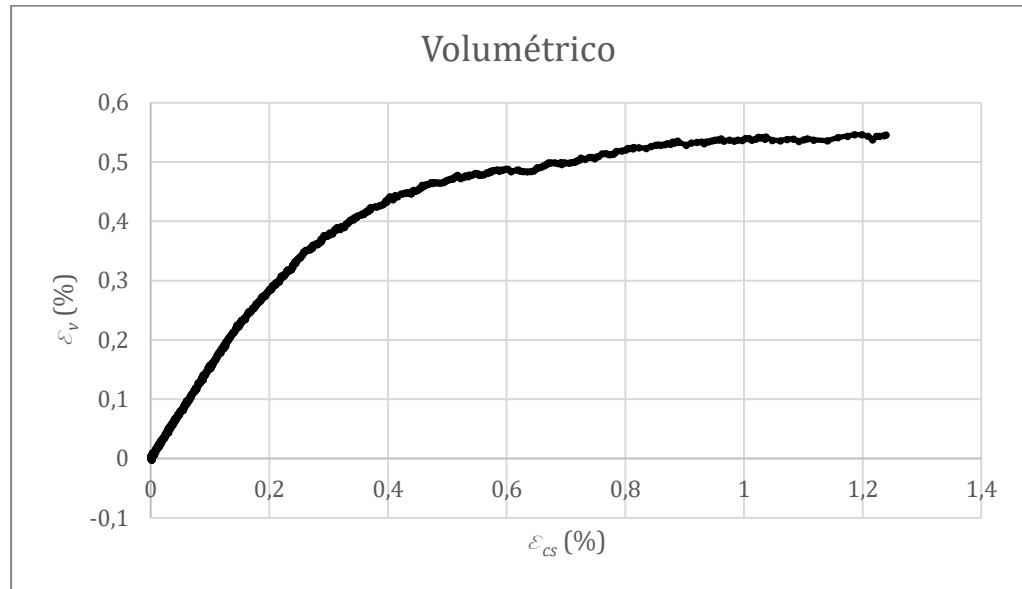


Figura 7-16 Comportamento volumétrico amostra aOnc-90°

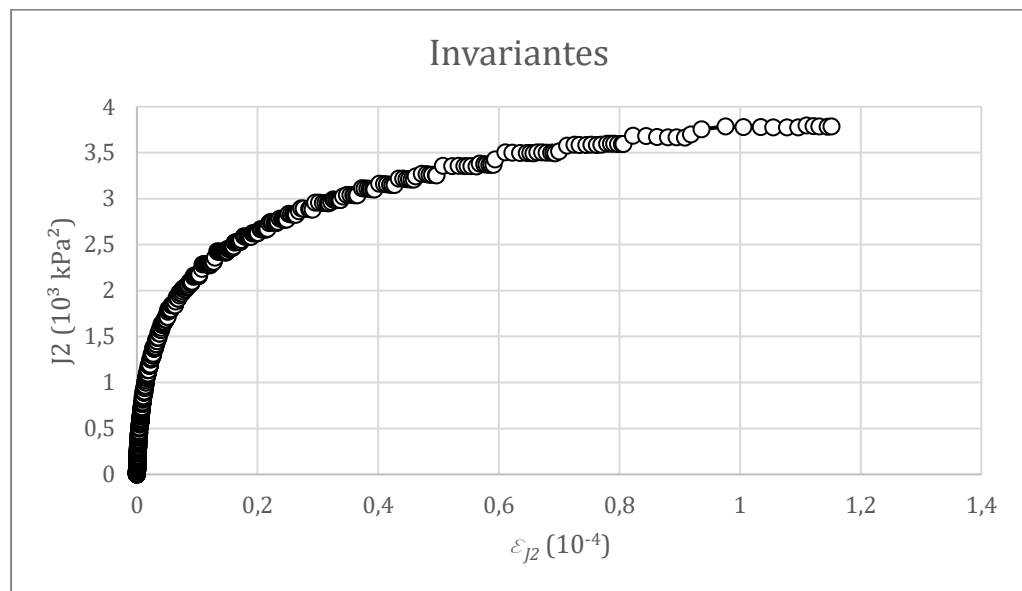


Figura 7-17 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-90°

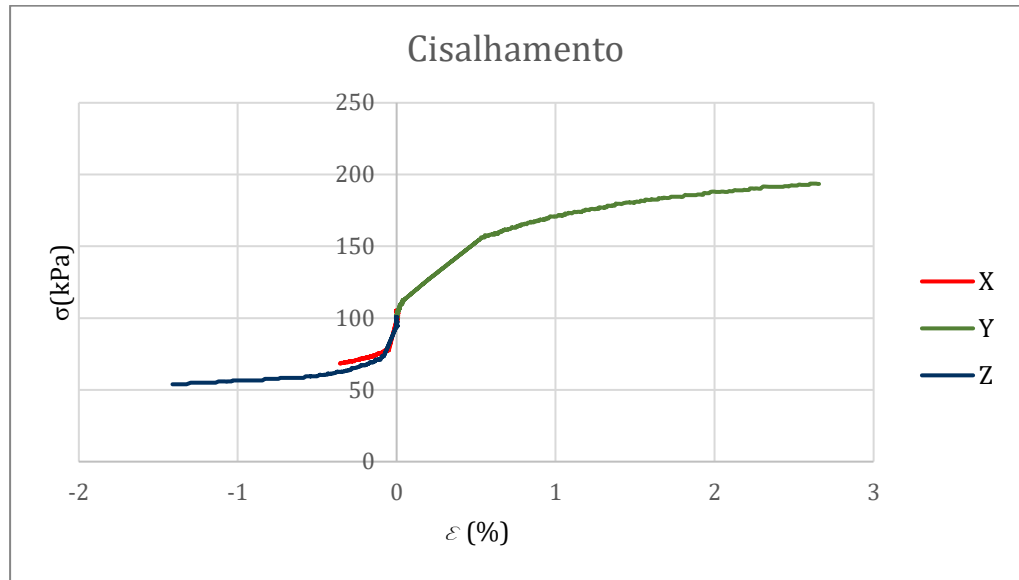


Figura 7-18 Tensão deformação amostra aOnc-120°

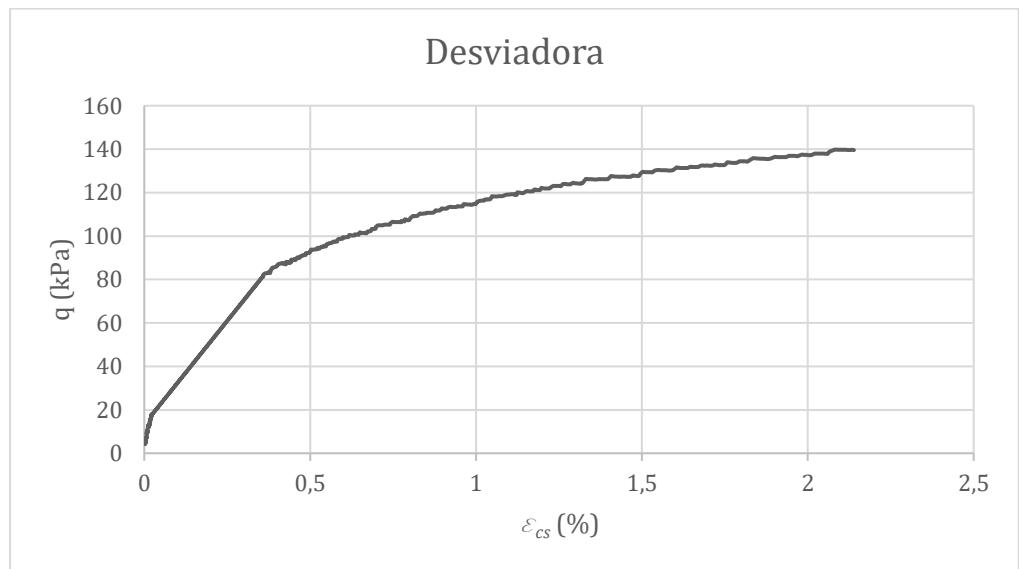


Figura 7-19 Tensão desviadora versus tensão cisalhante amostra aOnc-120°

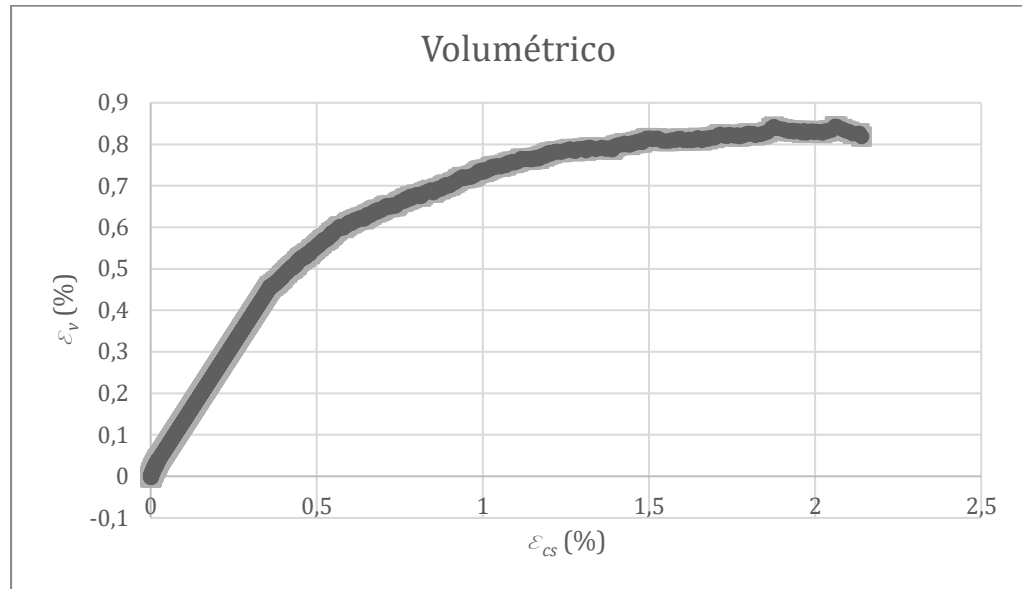


Figura 7-20 Comportamento volumétrico amostra aOnc-120°

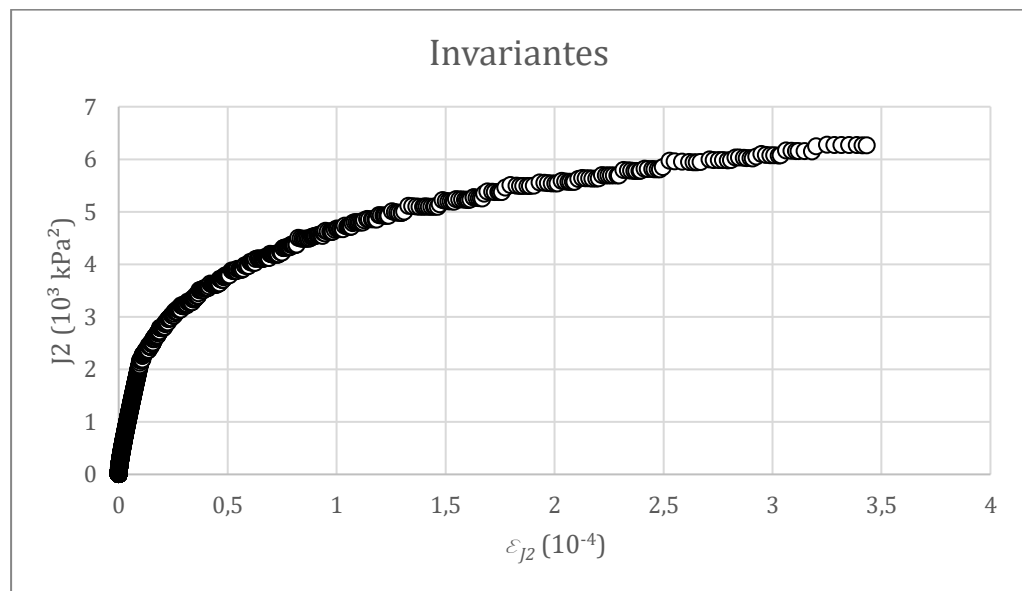


Figura 7-21 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-120°

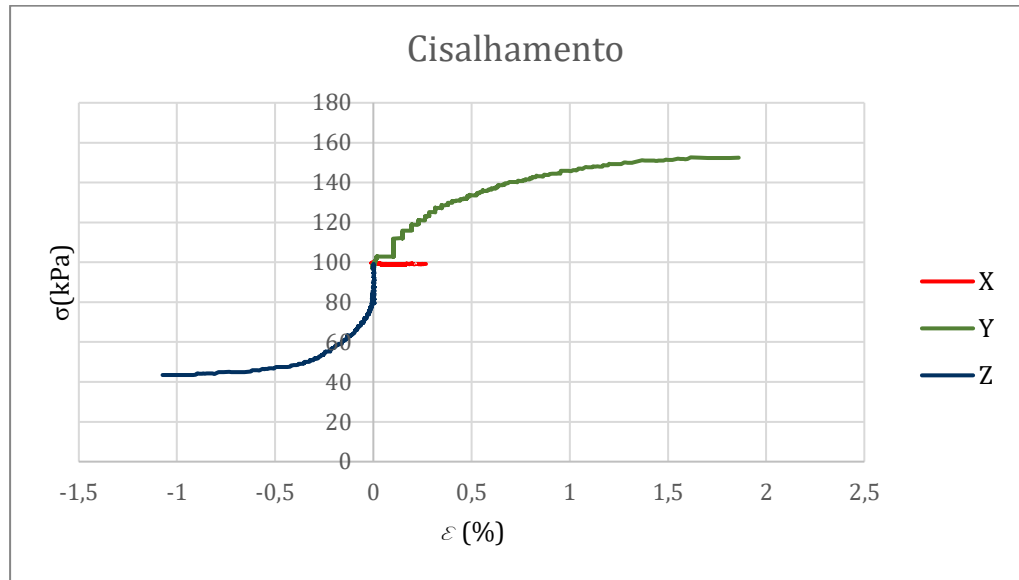


Figura 7-22 Tensão deformação amostra aOnc-150°

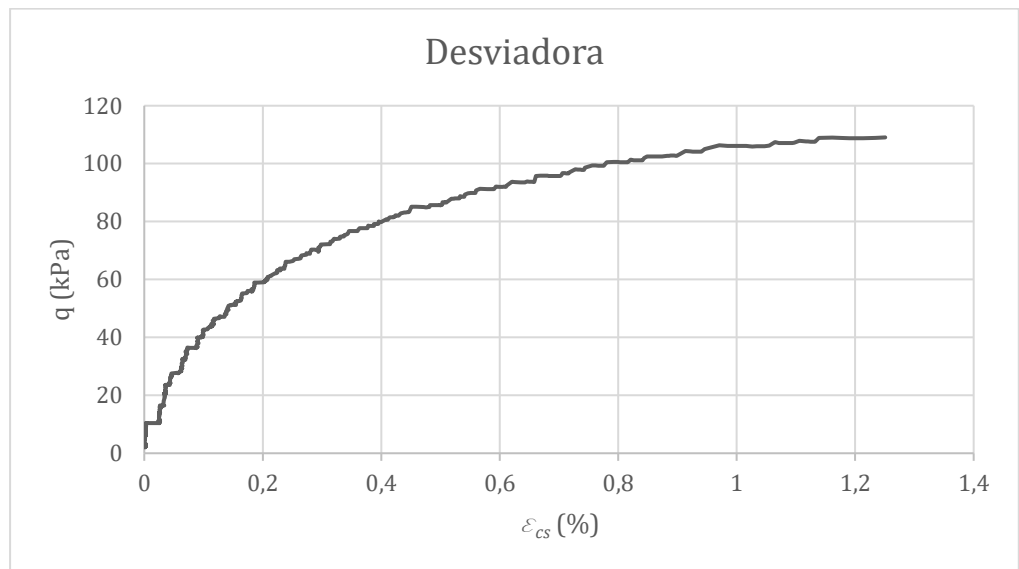


Figura 7-23 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-150°

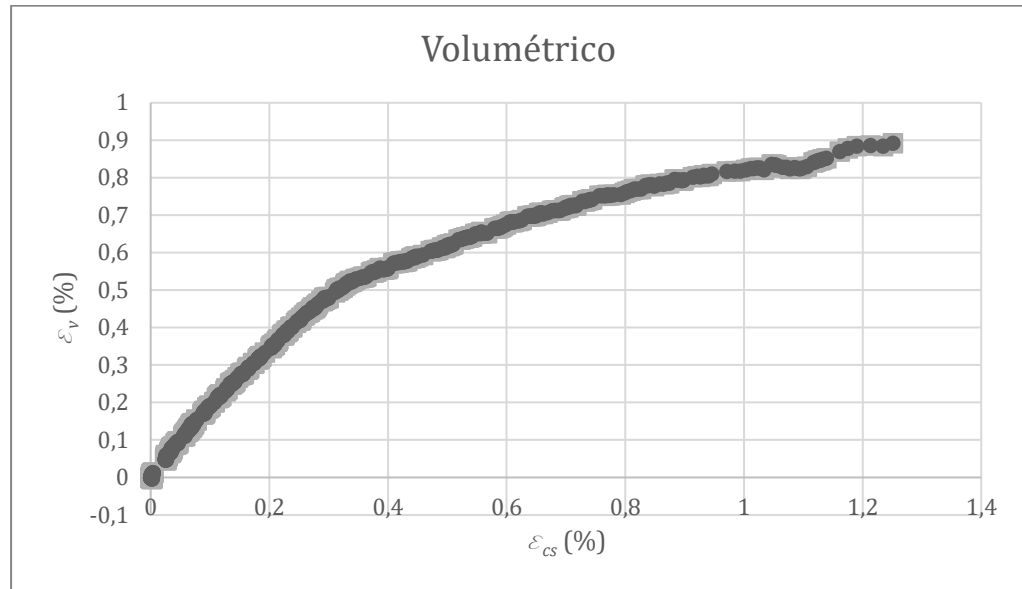


Figura 7-24 Comportamento volumétrico amostra aOnc-150°

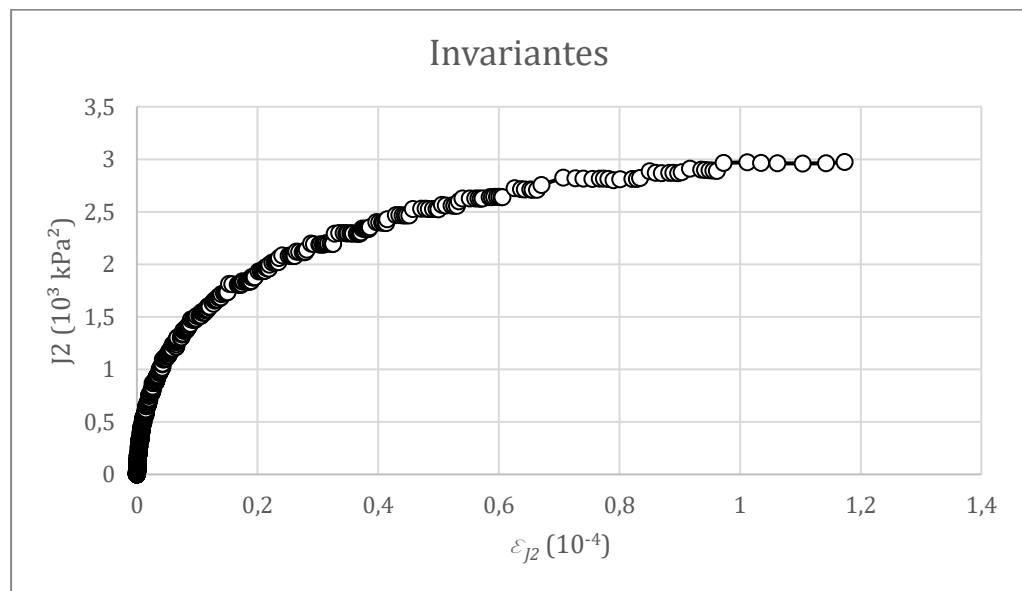


Figura 7-25 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-150°

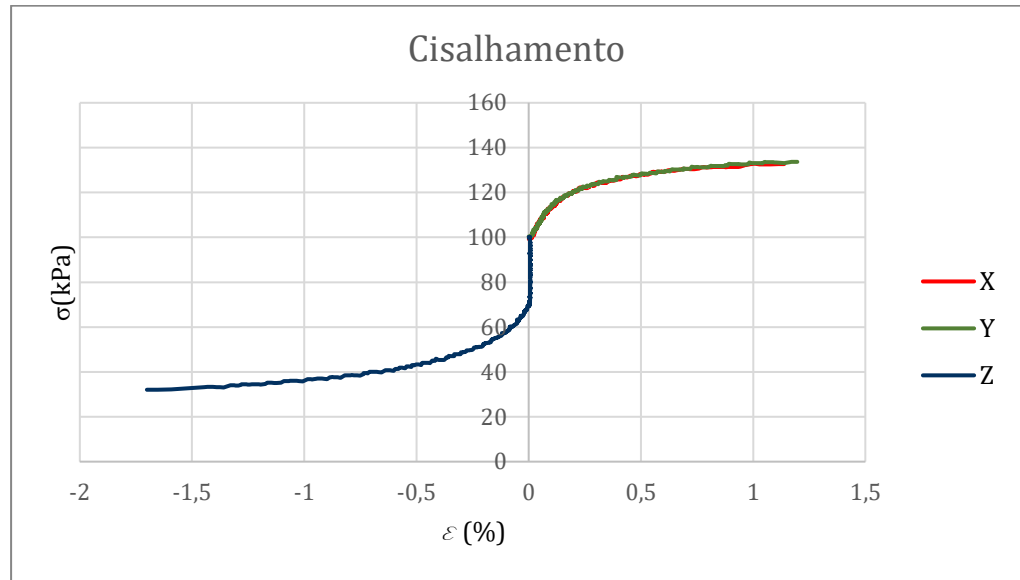


Figura 7-26 Tensão deformação amostra aOnc-180°

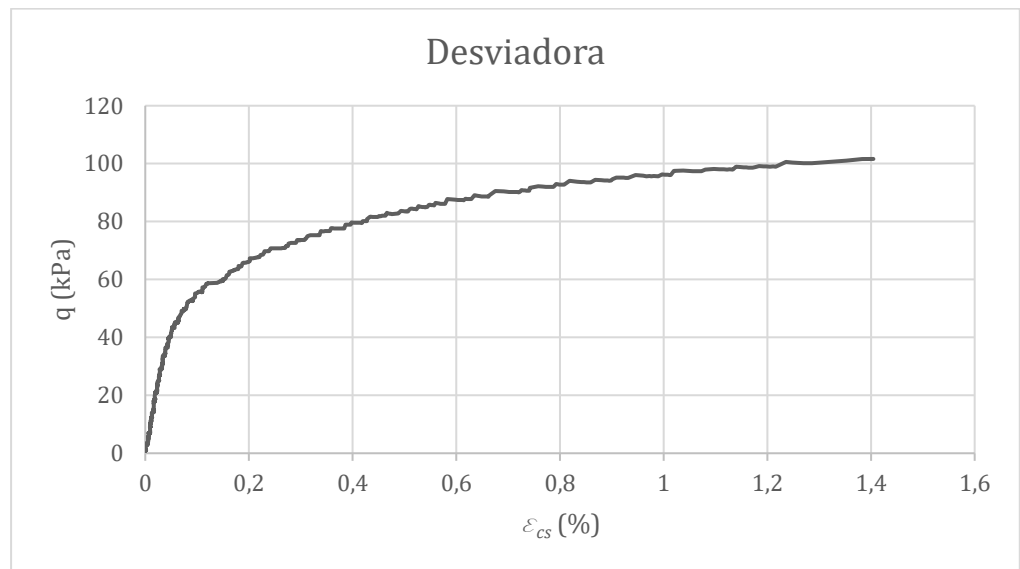


Figura 7-27 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aOnc-180°

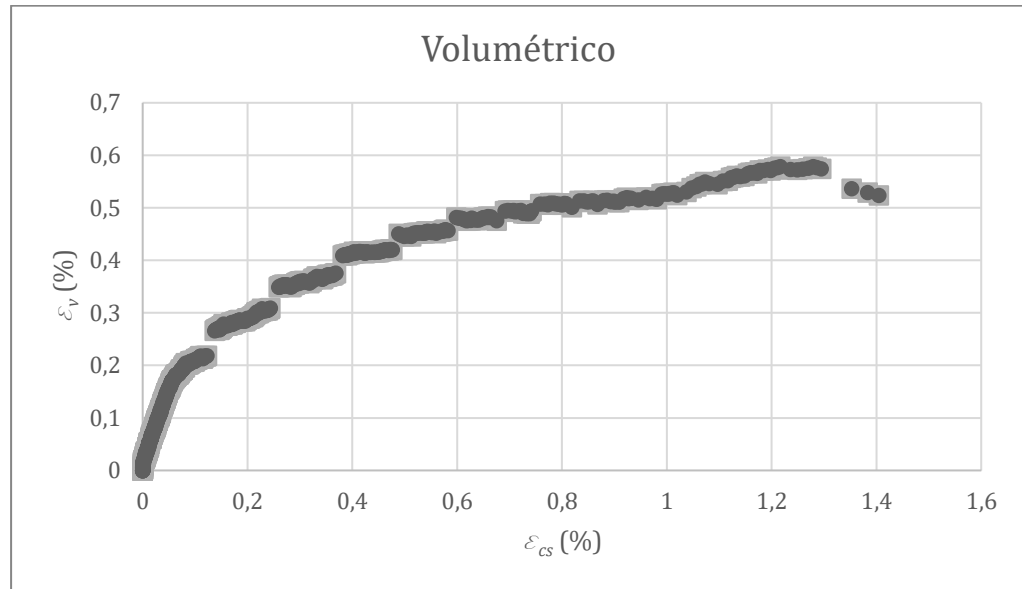


Figura 7-28 Comportamento volumétrico amostra aOnc-180°

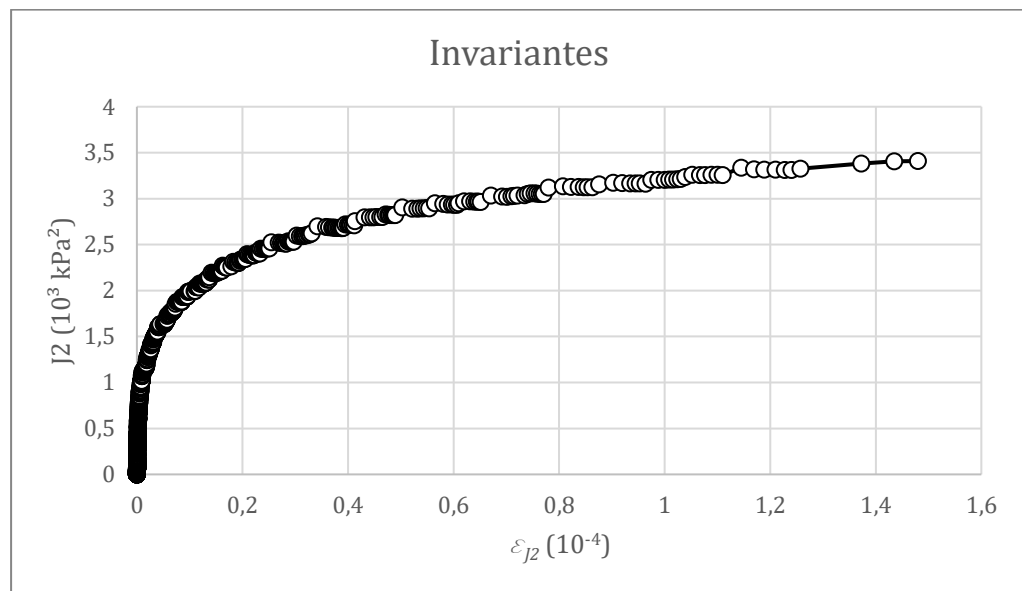


Figura 7-29 Comportamento sob invariantes amostra aOnc-180°

7.5.2 Triaxiais cúbicos de areia de Osório cimentada cura atmosférica cimentação menor sete dias de cura

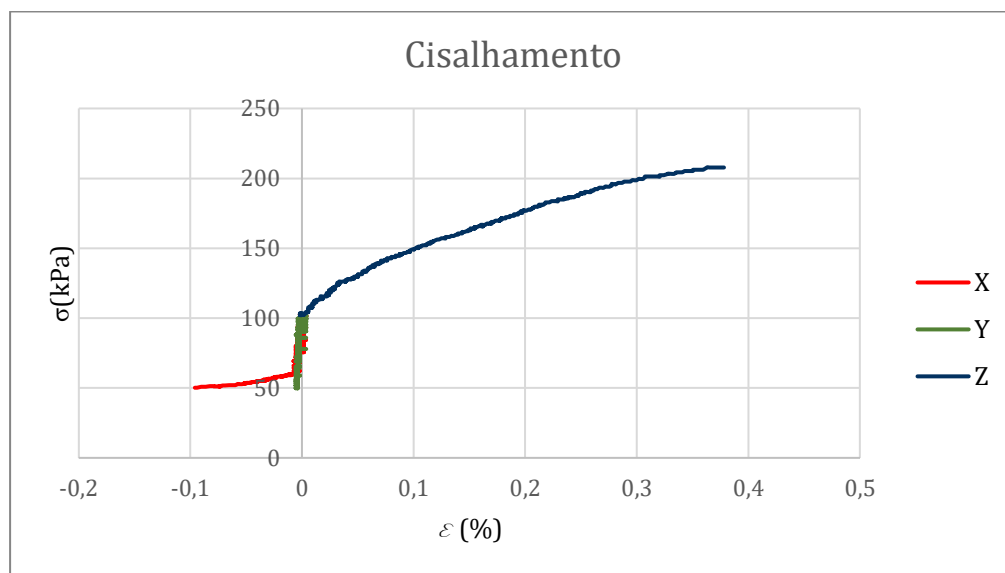


Figura 7-30 Tensão deformação amostra aO1c7d-0°

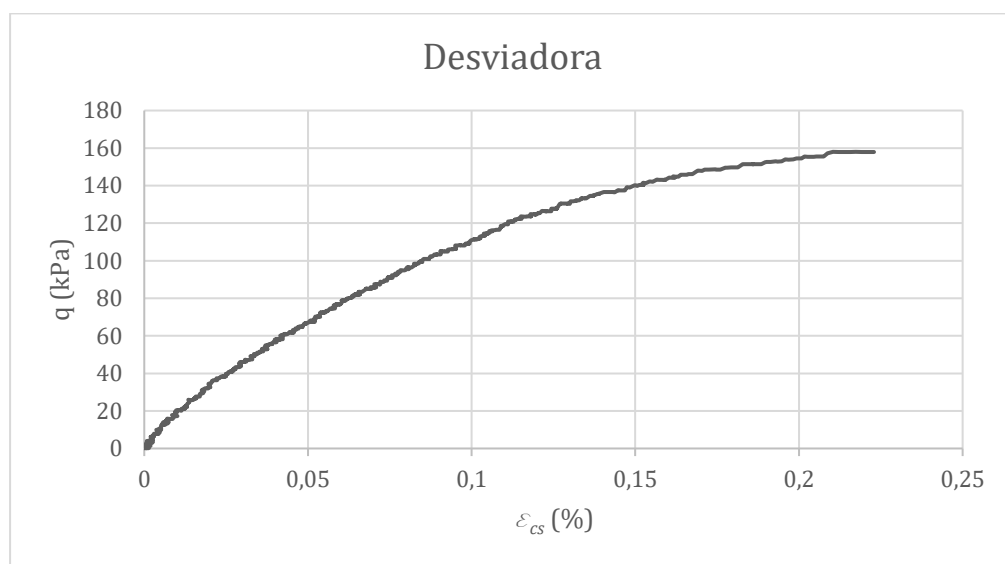


Figura 7-31 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-0°

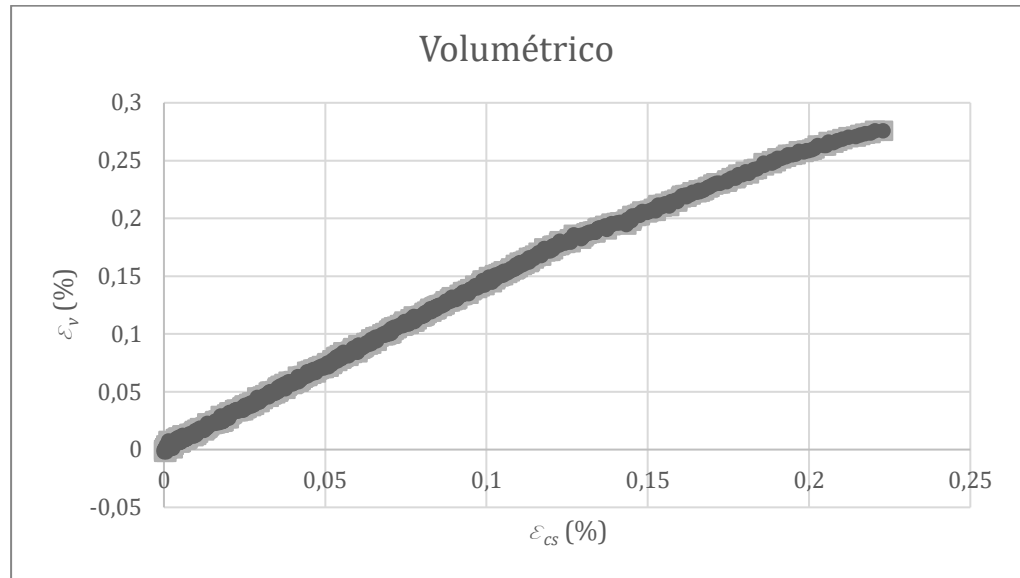


Figura 7-32 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-0°

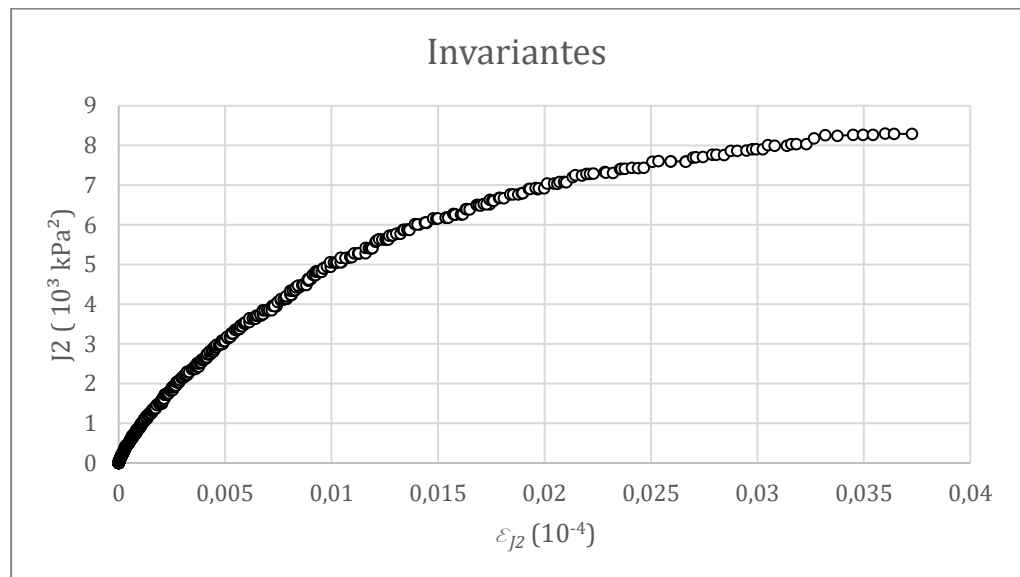


Figura 7-33 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-0°

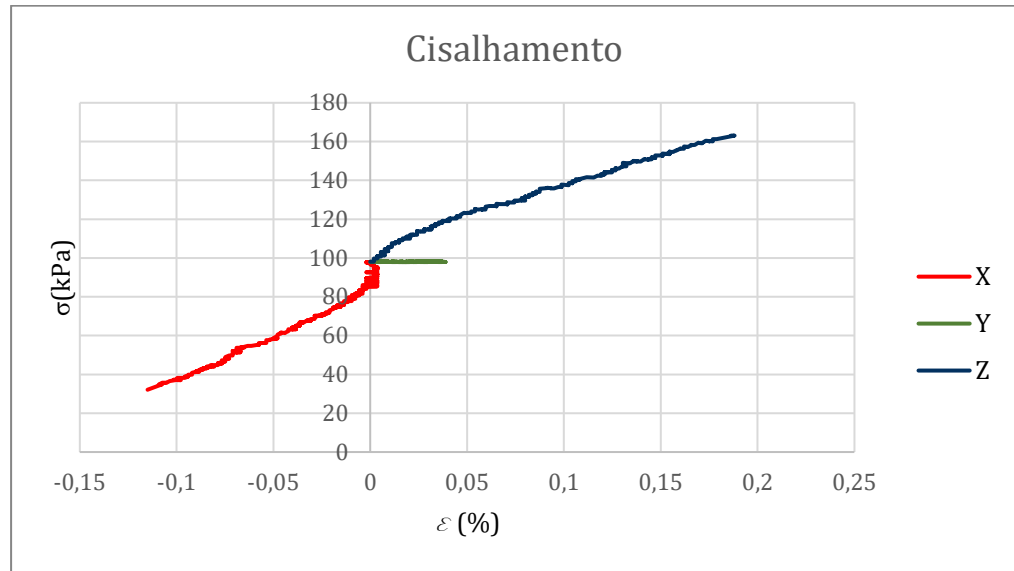


Figura 7-34 Tensão deformação amostra aO1c7d-30°

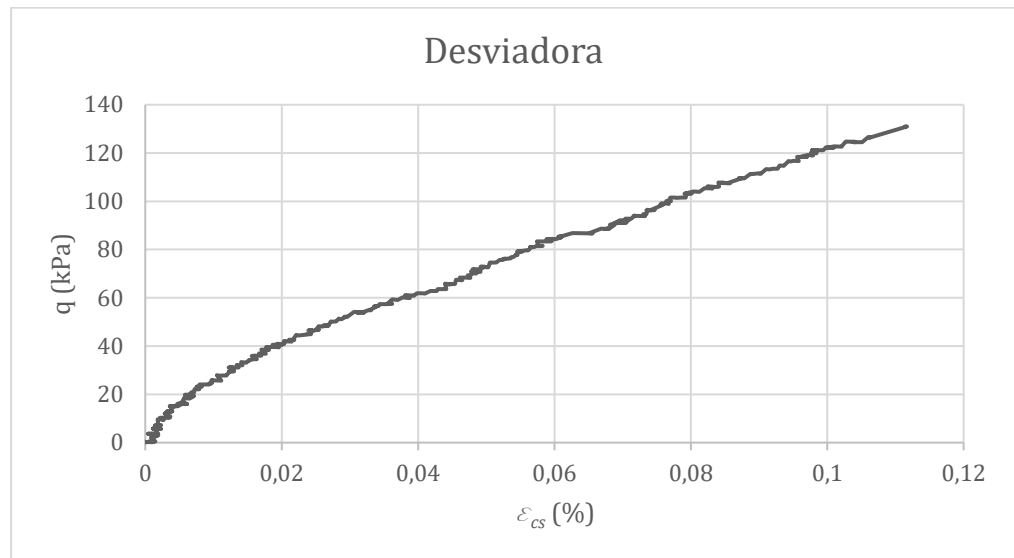


Figura 7-35 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-30°

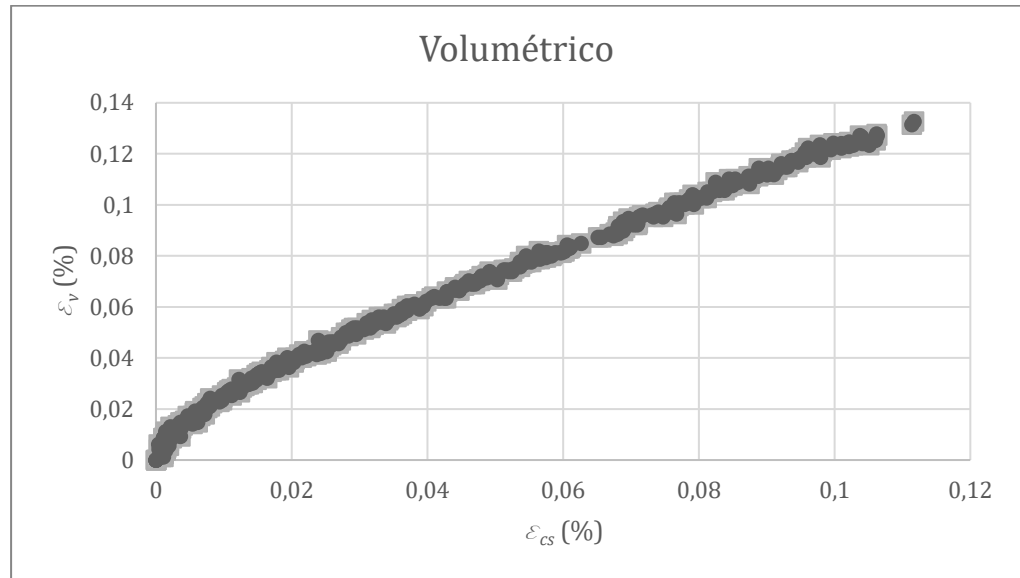


Figura 7-36 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-30°

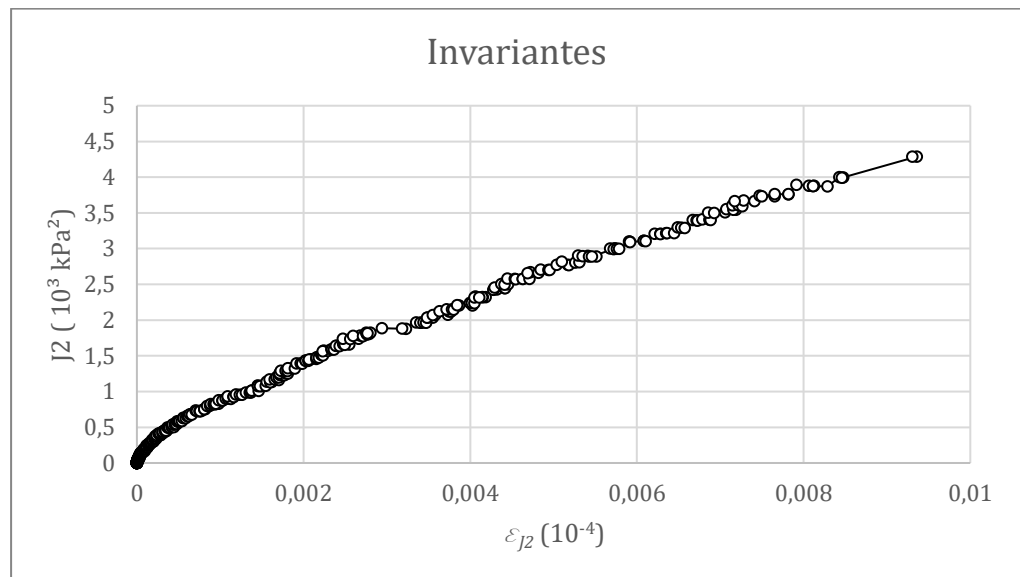


Figura 7-37 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-30°

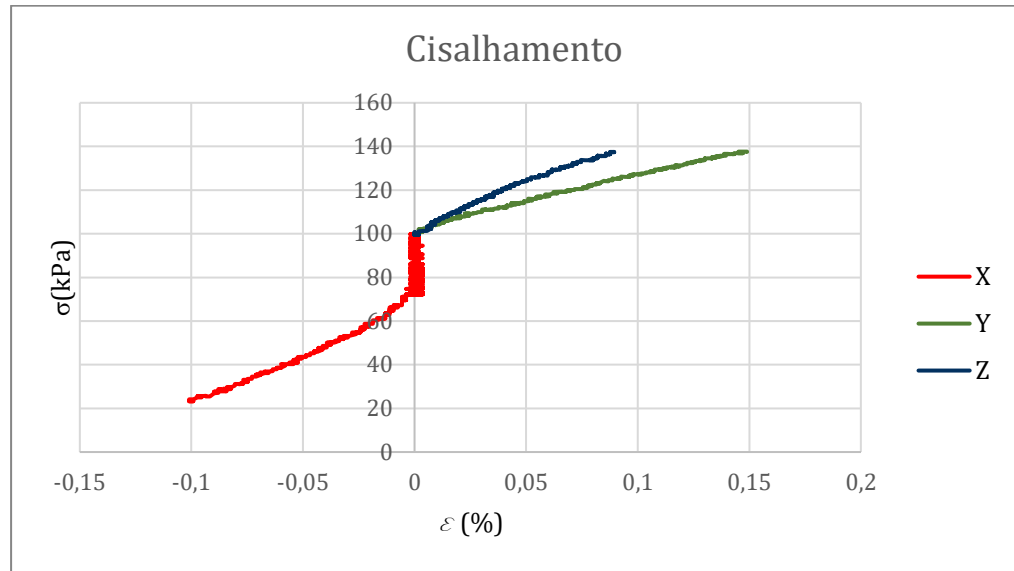


Figura 7-38 Tensão deformação amostra aO1c7d-60°

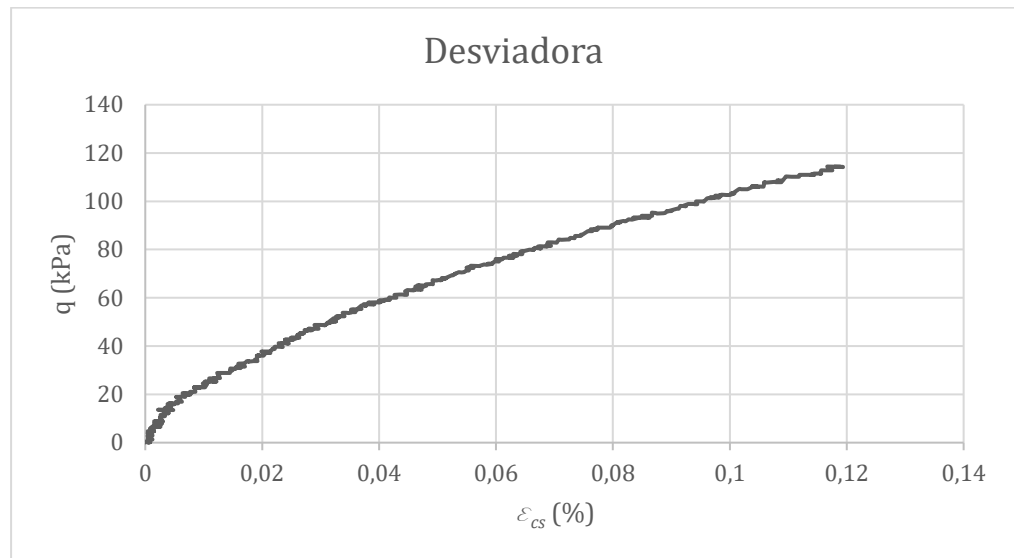


Figura 7-39 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-60°

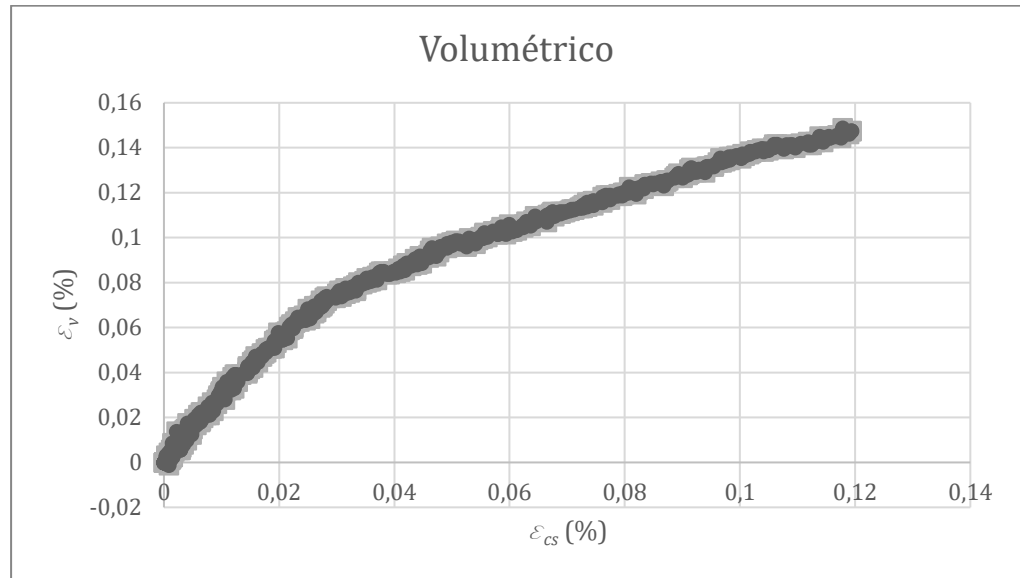


Figura 7-40 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-60°

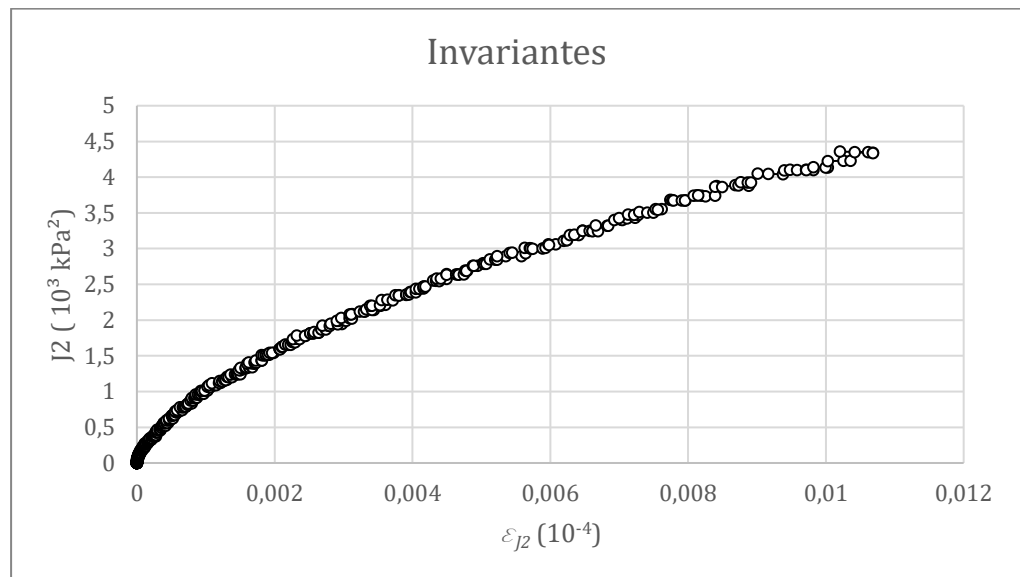


Figura 7-41 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-60°

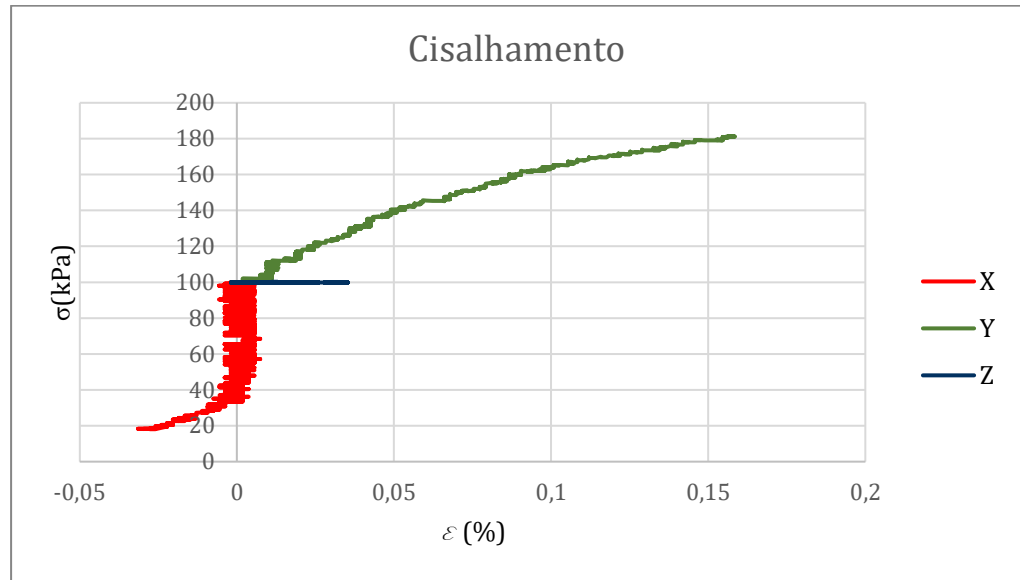


Figura 7-42 Tensão deformação amostra aO1c7d-90°

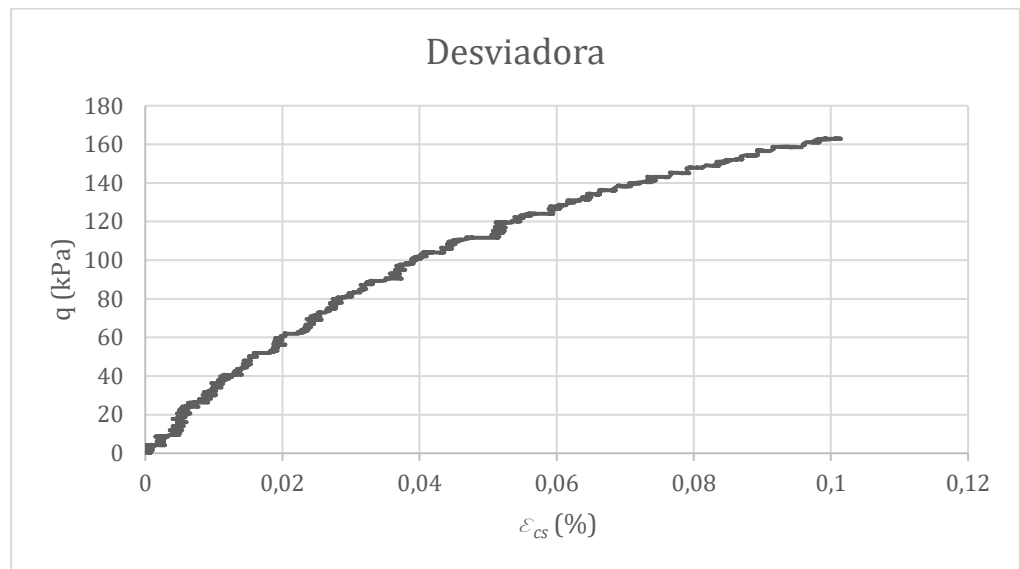


Figura 7-43 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-90°

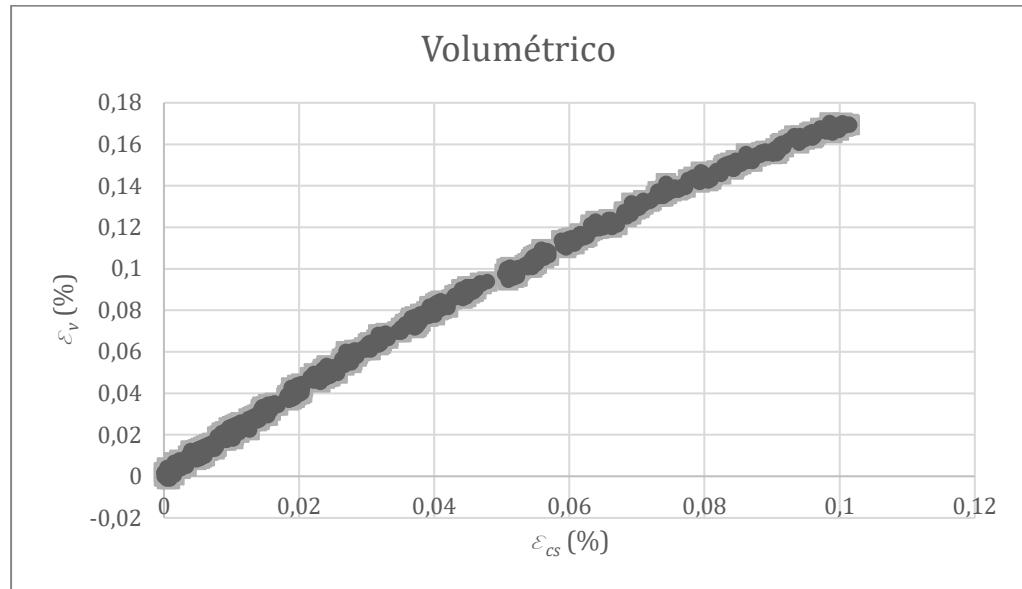


Figura 7-44 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-90°

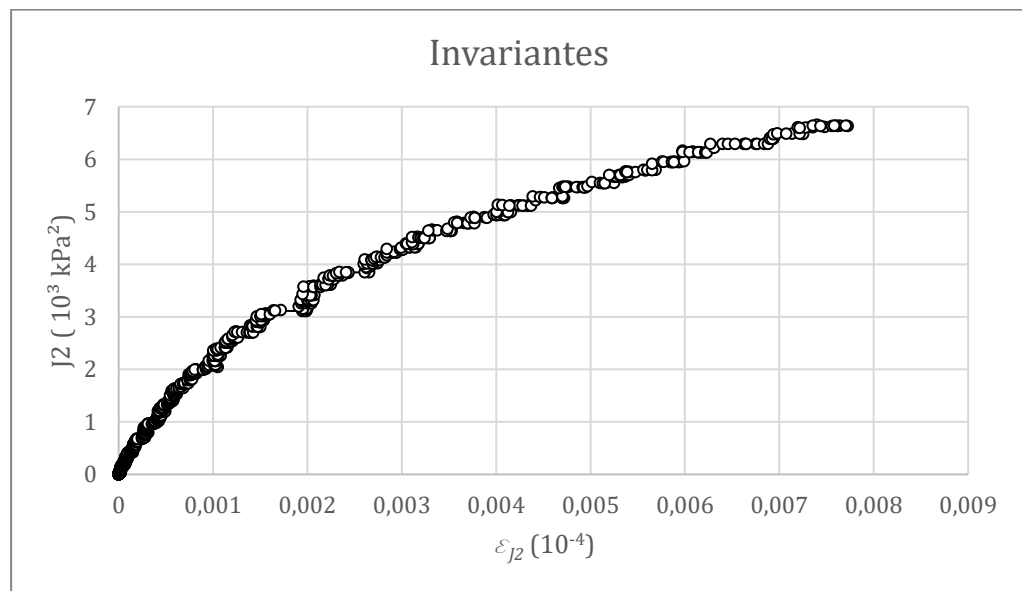


Figura 7-45 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-90°

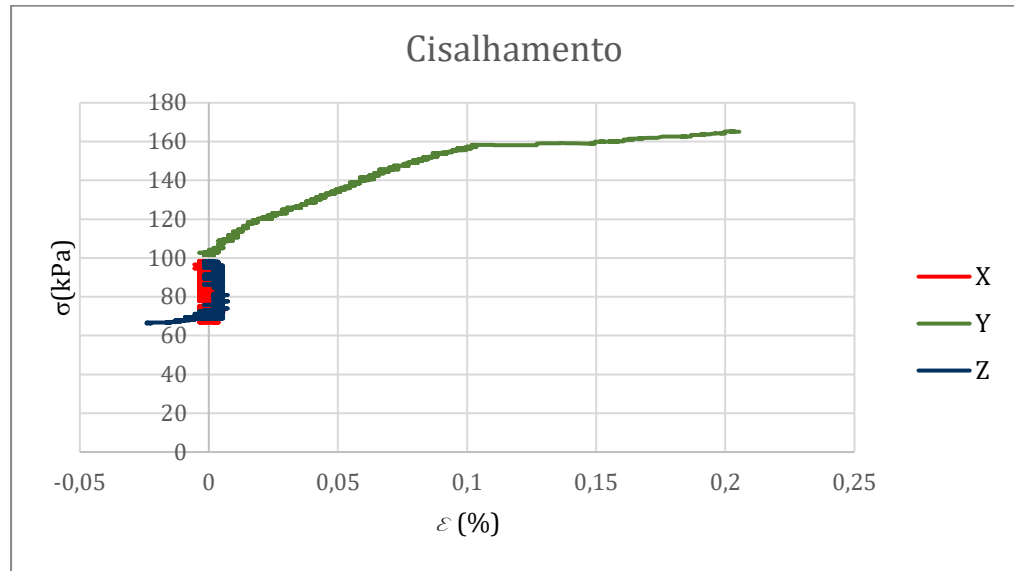


Figura 7-46 Tensão deformação amostra aO1c7d-120°

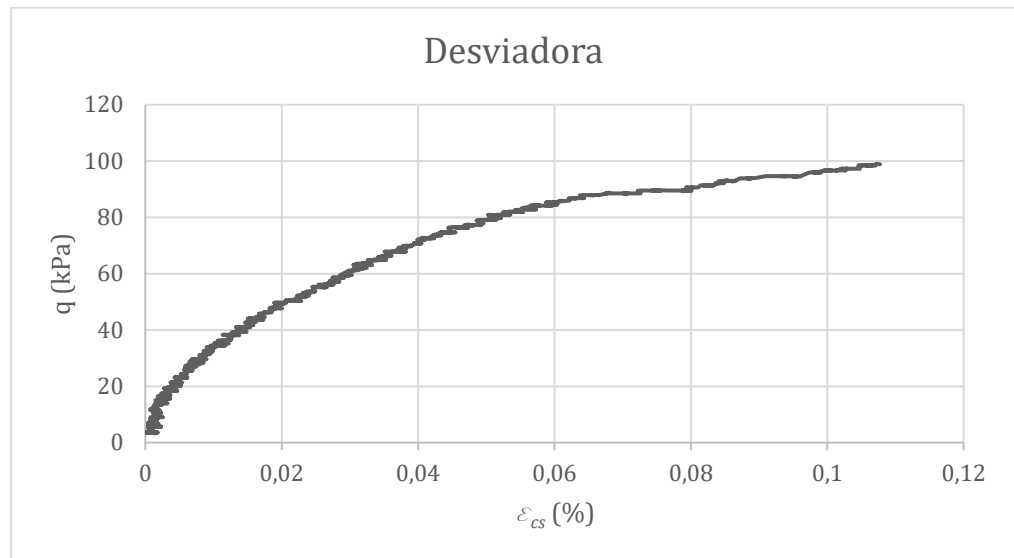


Figura 7-47 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-120°

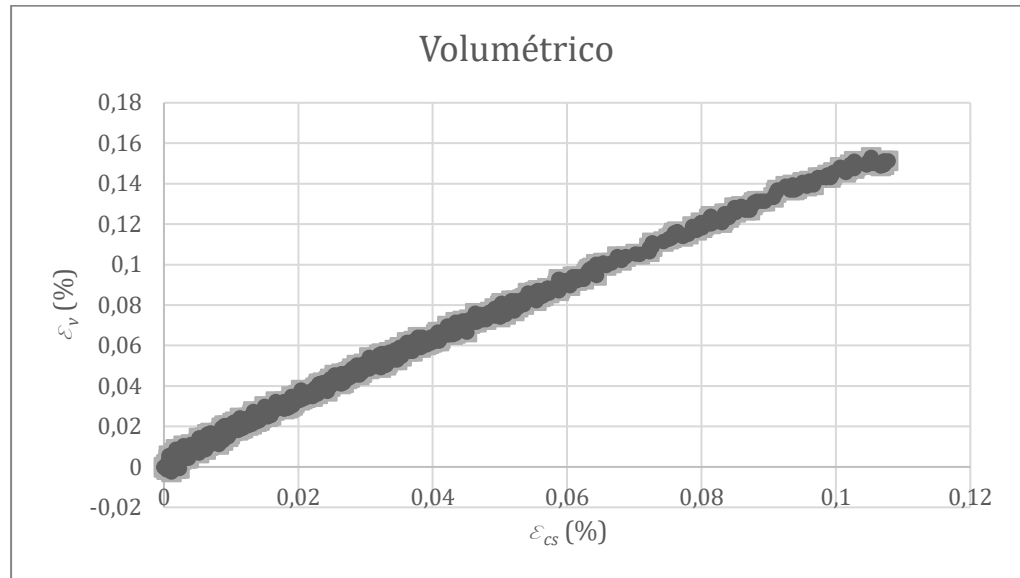


Figura 7-48 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-120°

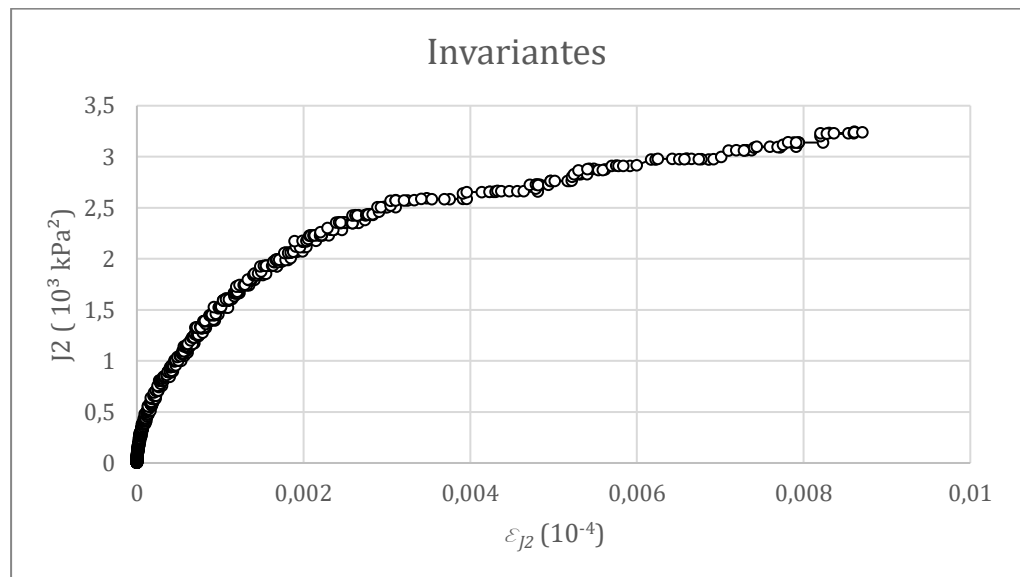


Figura 7-49 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-120°

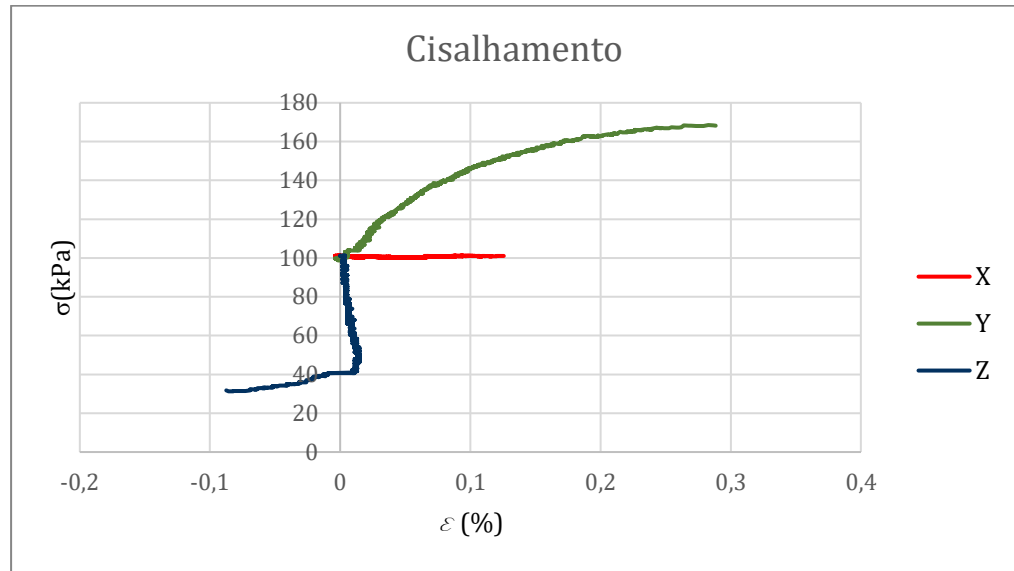


Figura 7-50 Tensão deformação amostra aO1c7d-150°

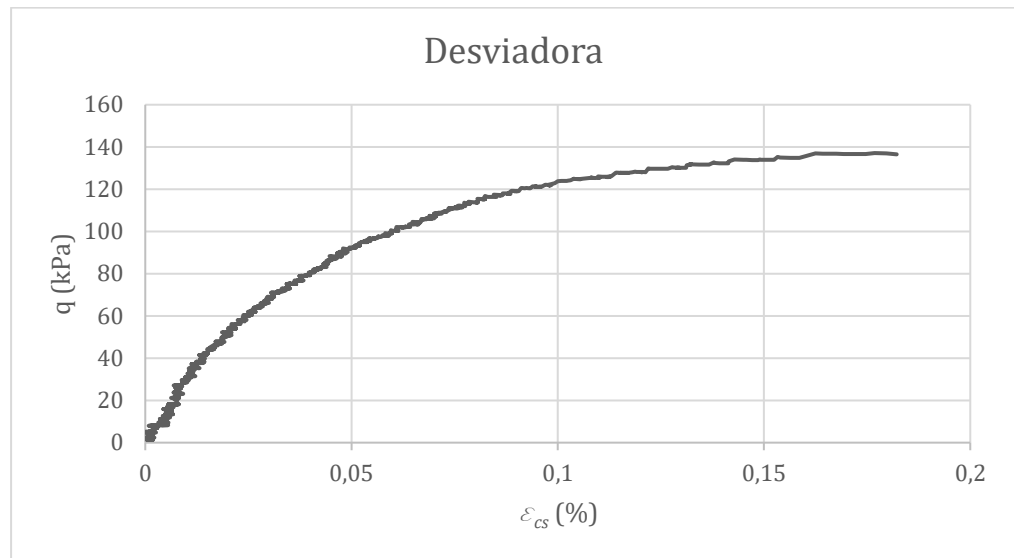


Figura 7-51 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-150°

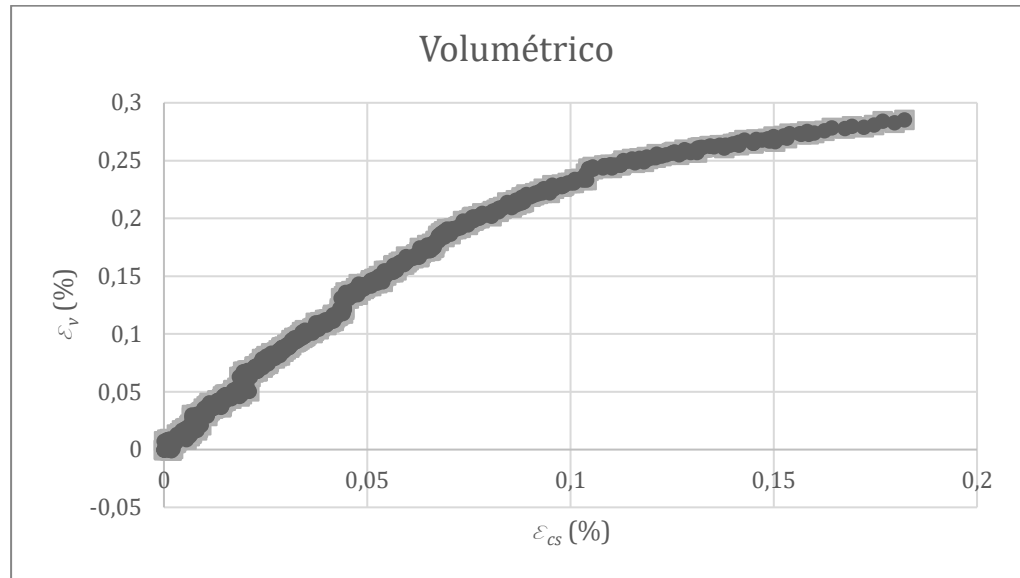


Figura 7-52 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-150°

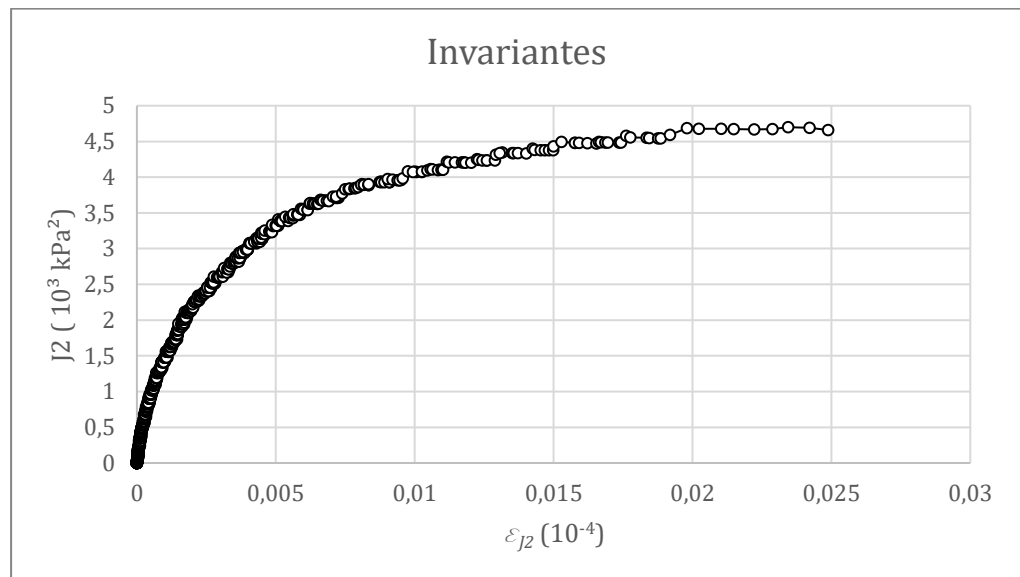


Figura 7-53 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-150°

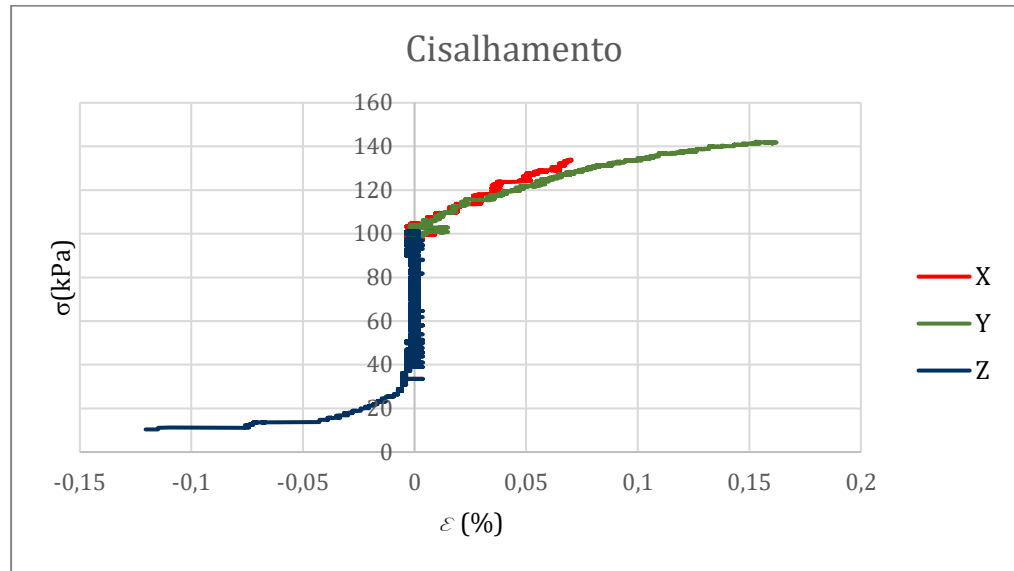


Figura 7-54 Tensão deformação amostra aO1c7d-180°

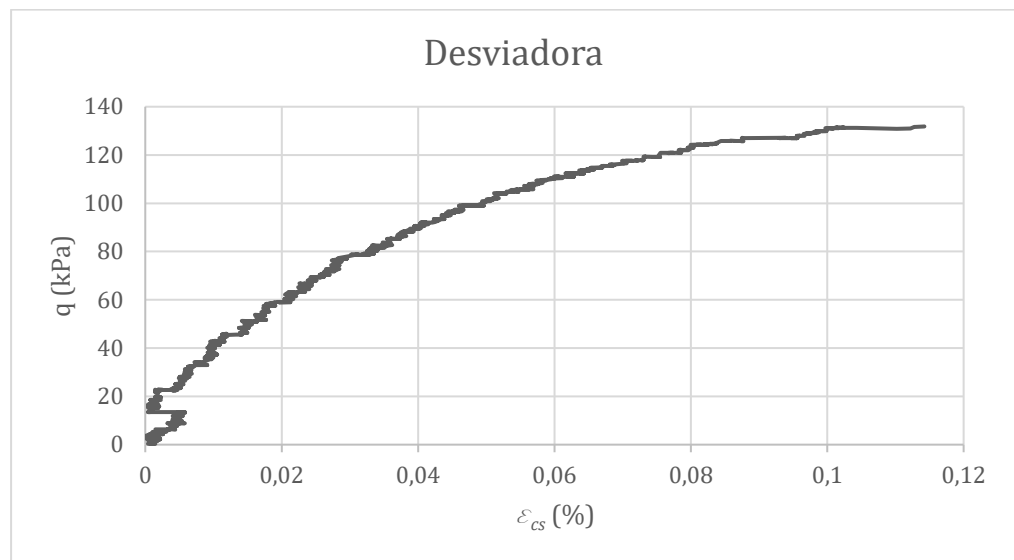


Figura 7-55 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c7d-180°

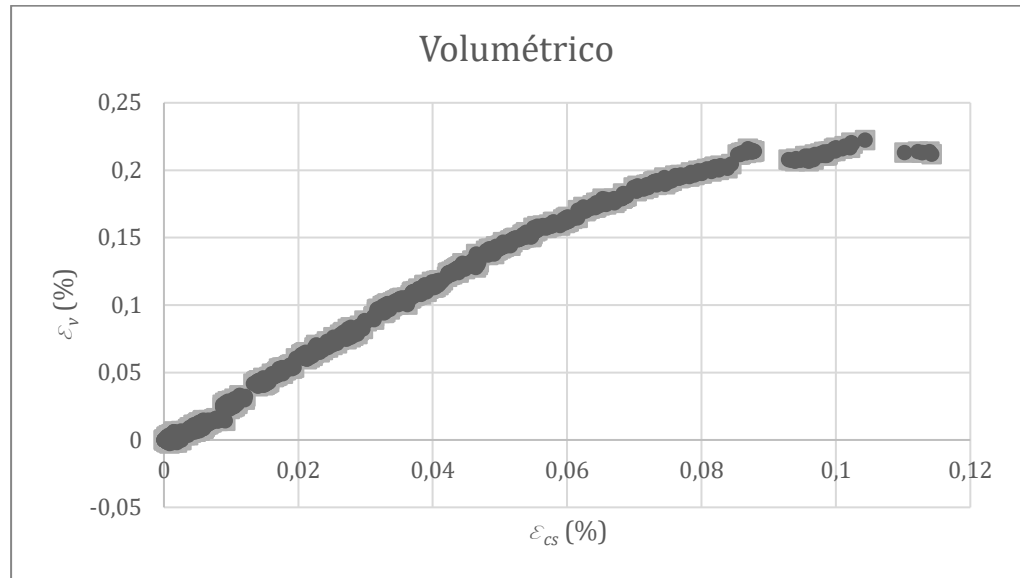


Figura 7-56 Comportamento volumétrico amostra aO1c7d-180°

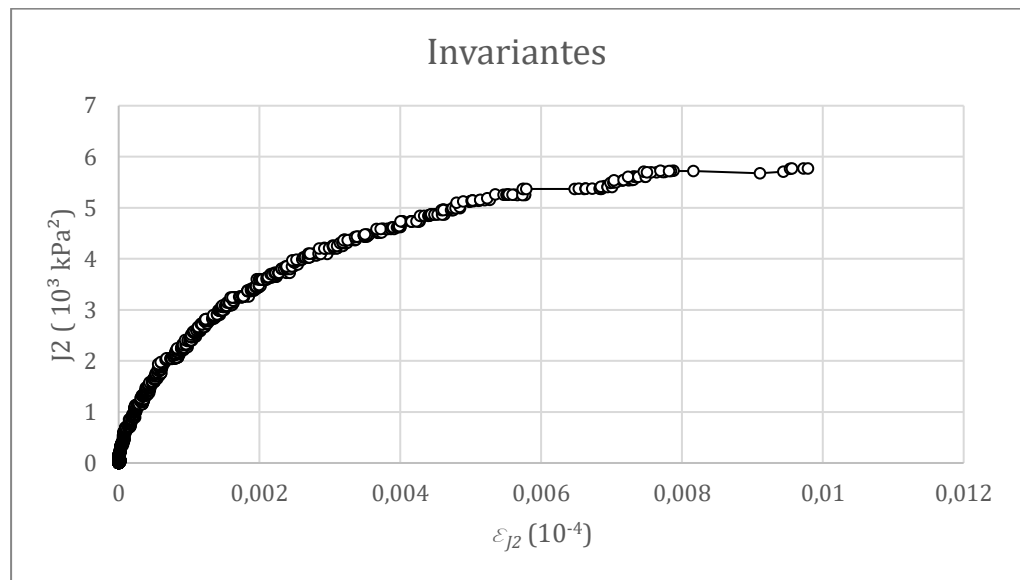


Figura 7-57 Comportamento sob invariantes amostra aO1c7d-180°

7.5.3 Triaxiais cúbicos de areia de Osório cimentada cura atmosférica cimentação menor três dias de cura

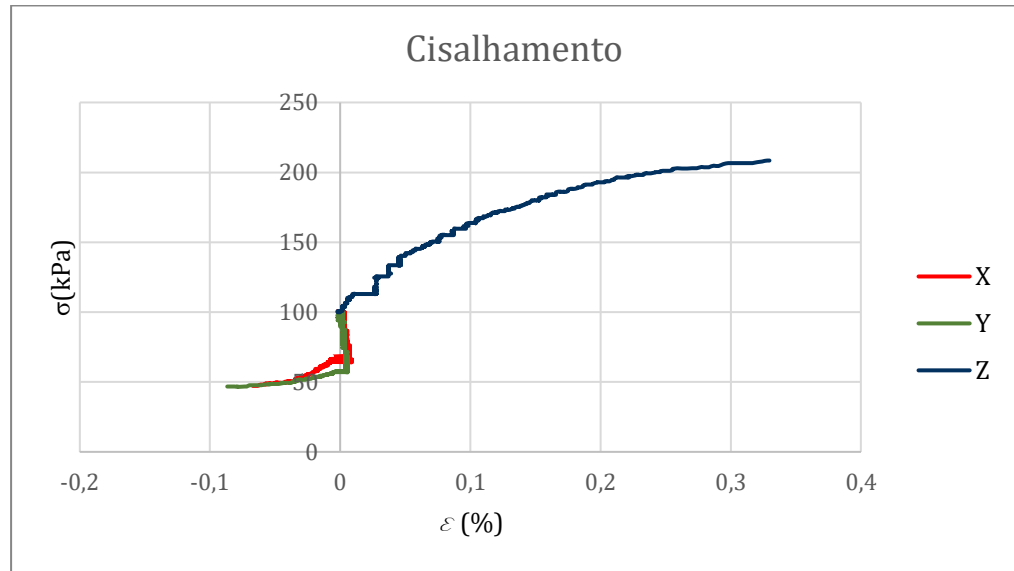


Figura 7-58 Tensão deformação da amostra aO1c3d-0°

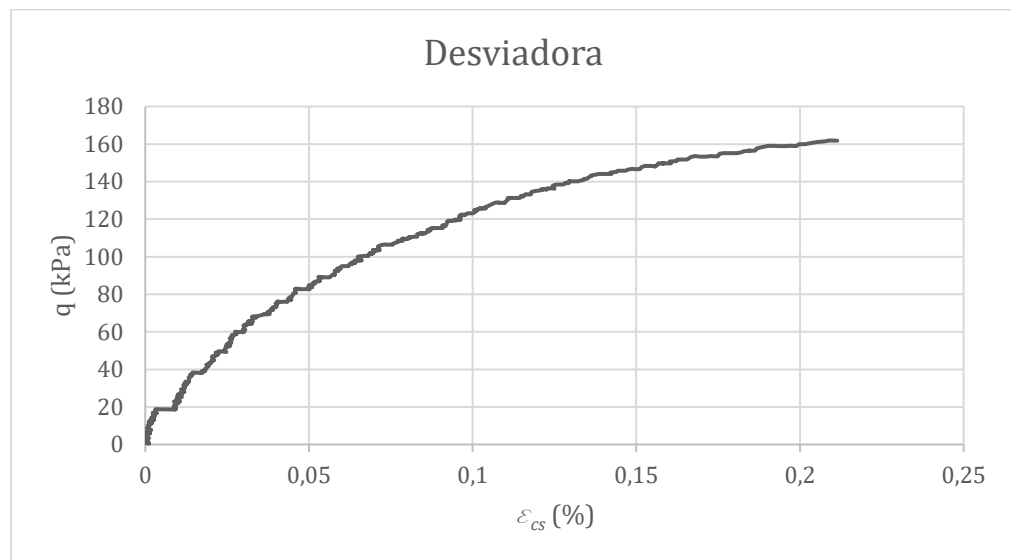


Figura 7-59 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-0°

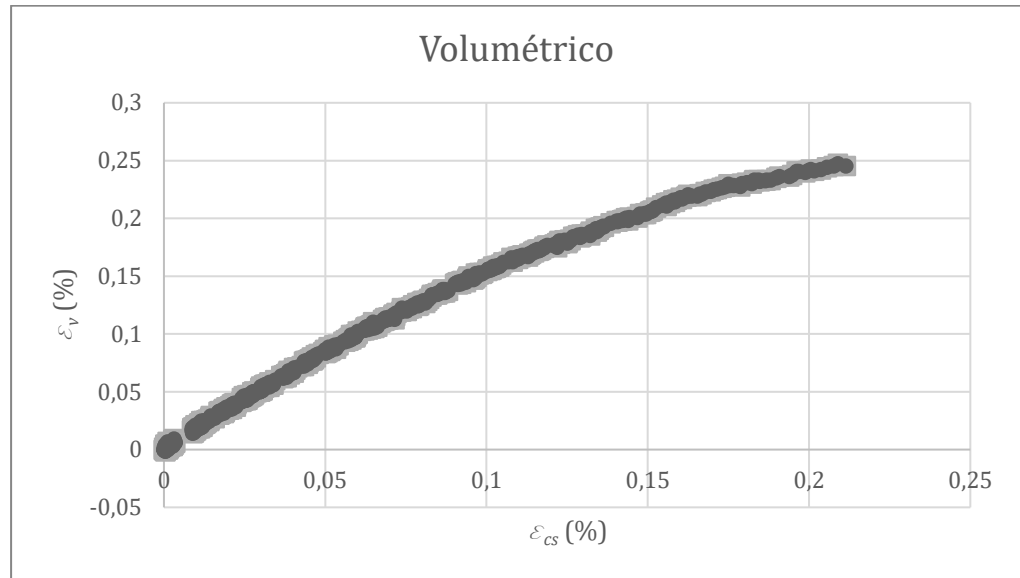


Figura 7-60 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-0°

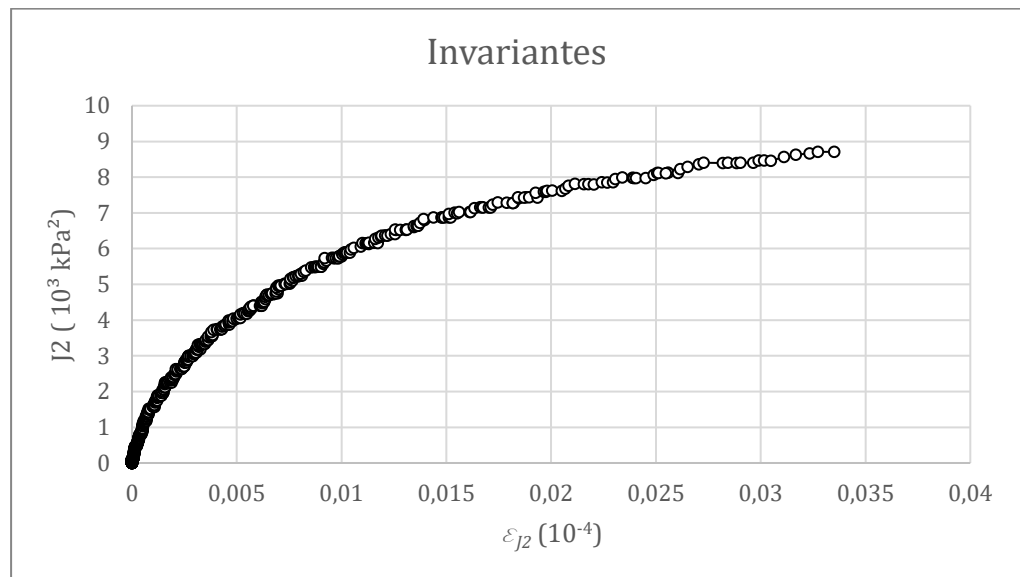


Figura 7-61 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-0°

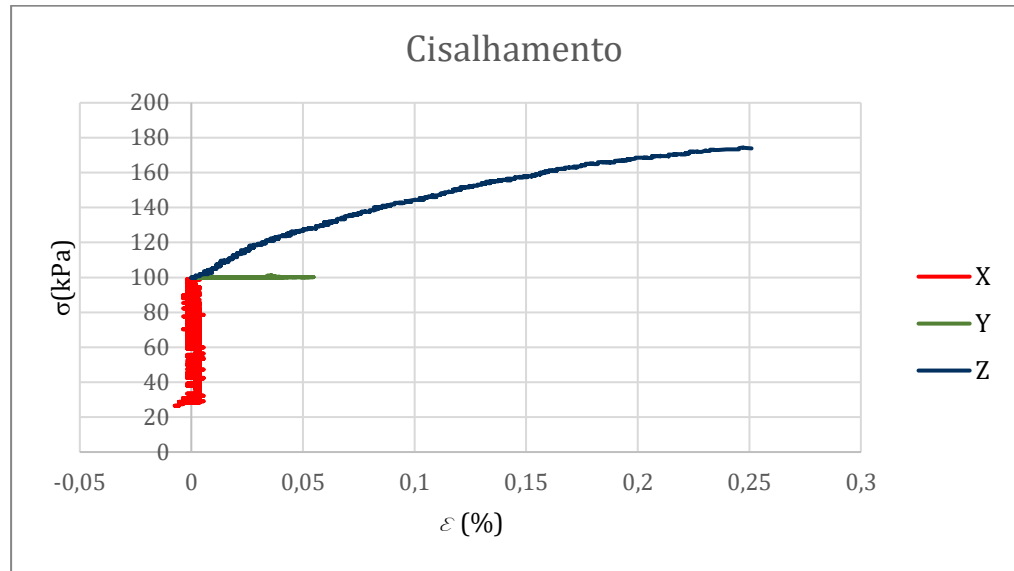


Figura 7-62 Tensão deformação amostra aO1c3d-30°

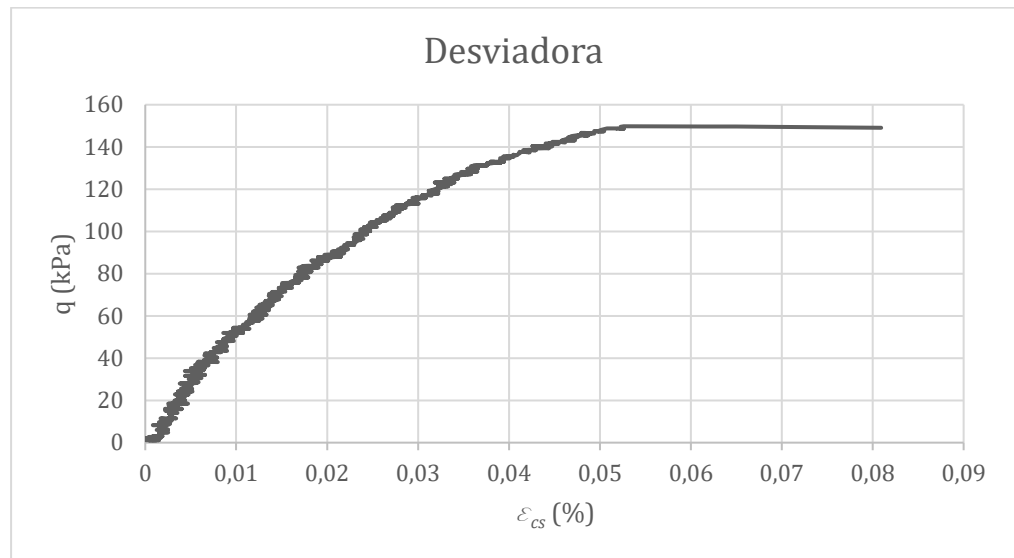


Figura 7-63 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-30°

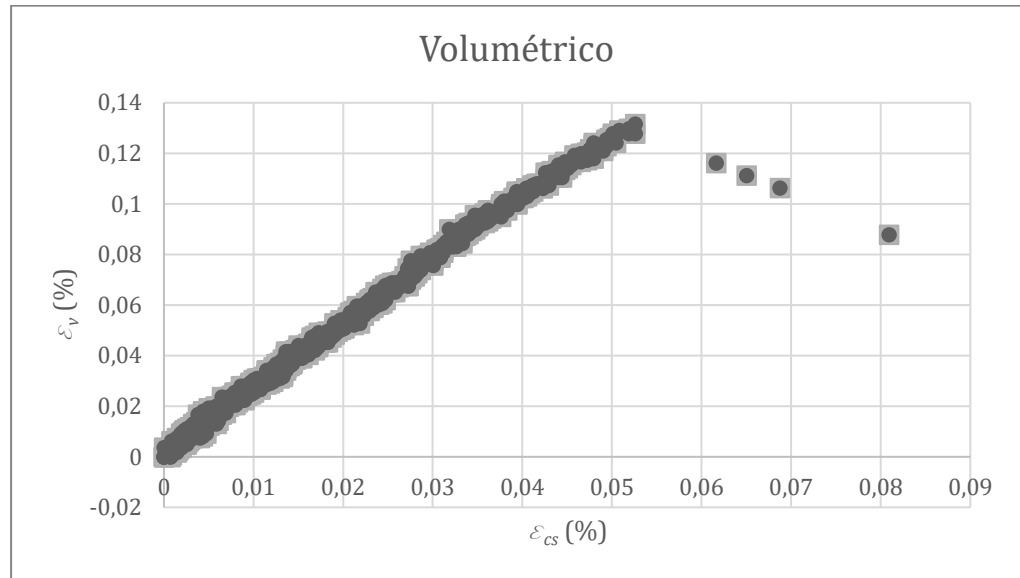


Figura 7-64 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-30°

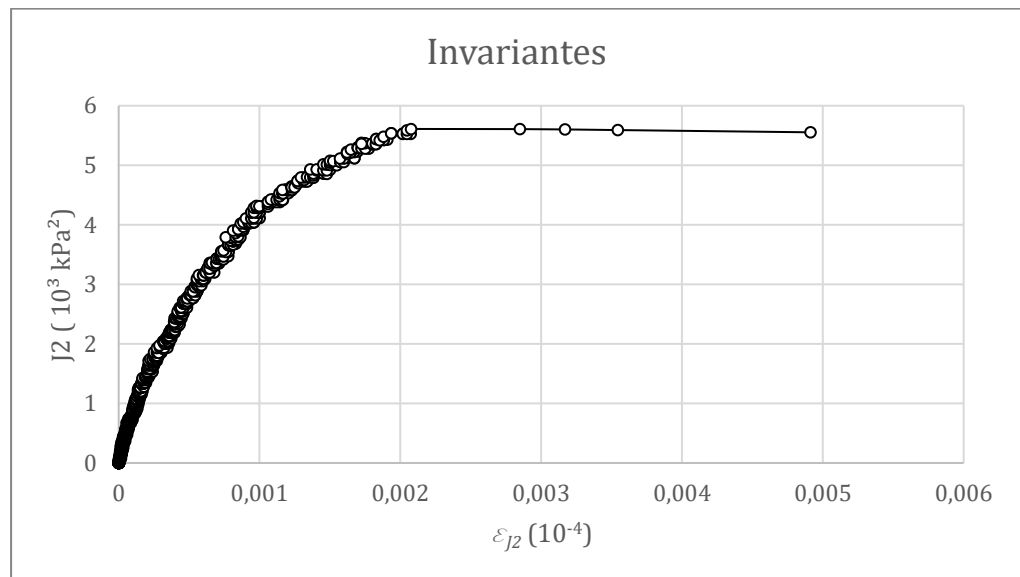


Figura 7-65 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-30°

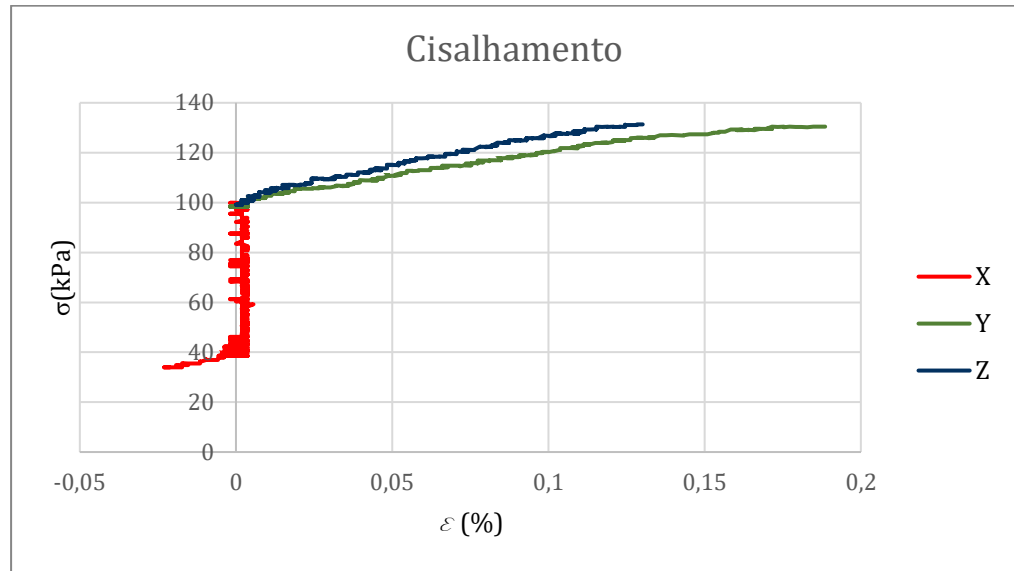


Figura 7-66 Tensão deformação amostra aO1c3d-60°

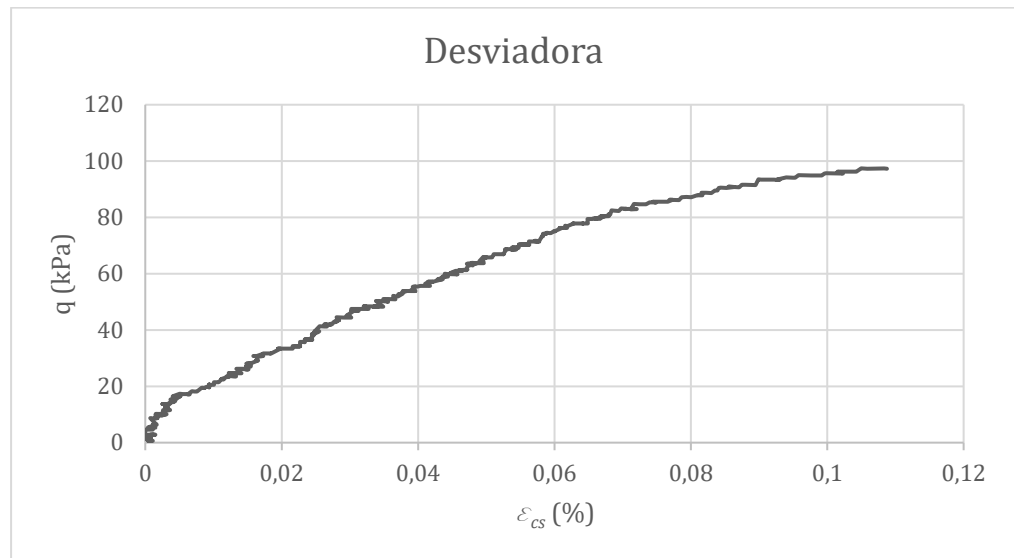


Figura 7-67 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-60°

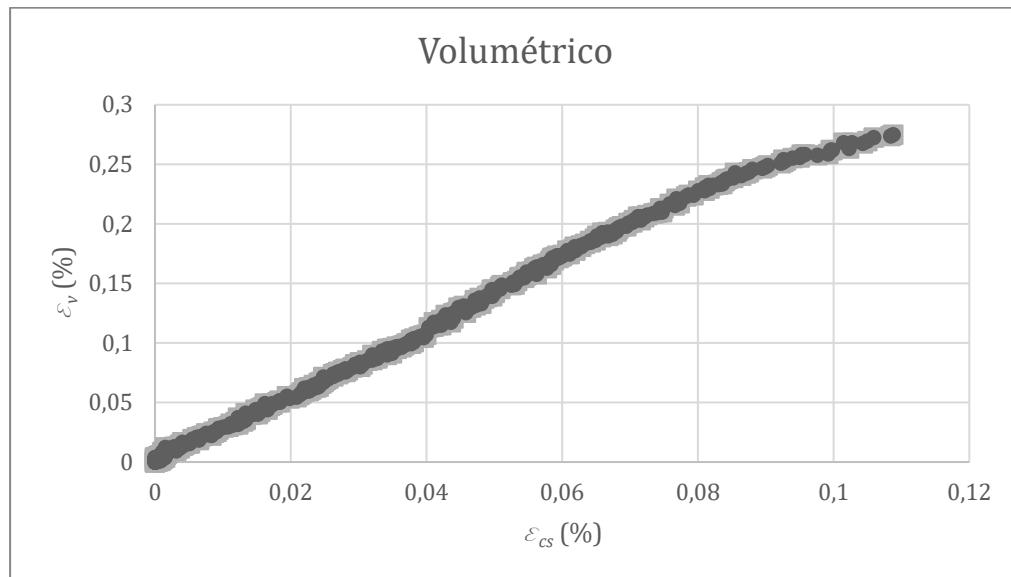


Figura 7-68 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-60°

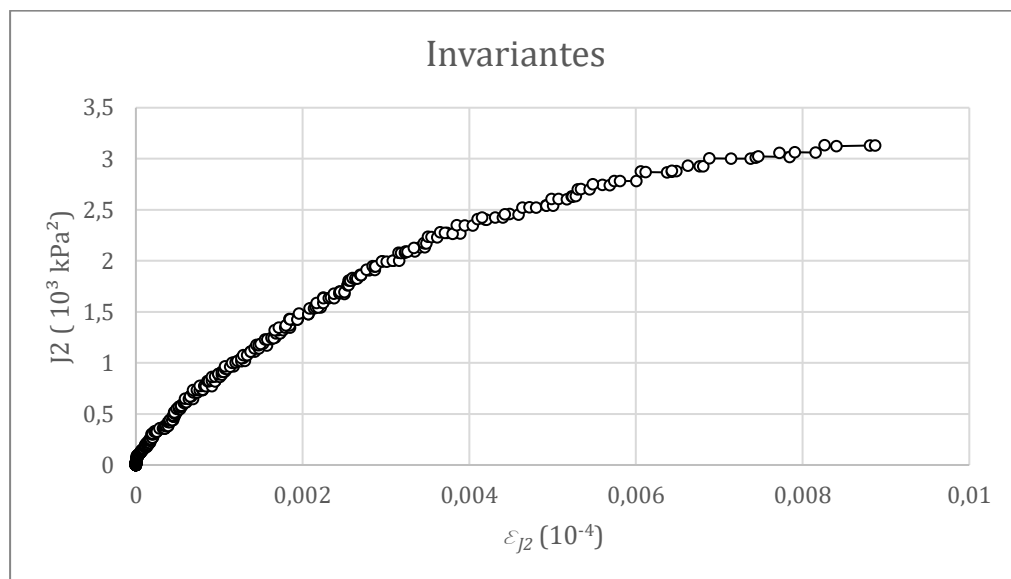


Figura 7-69 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-60°

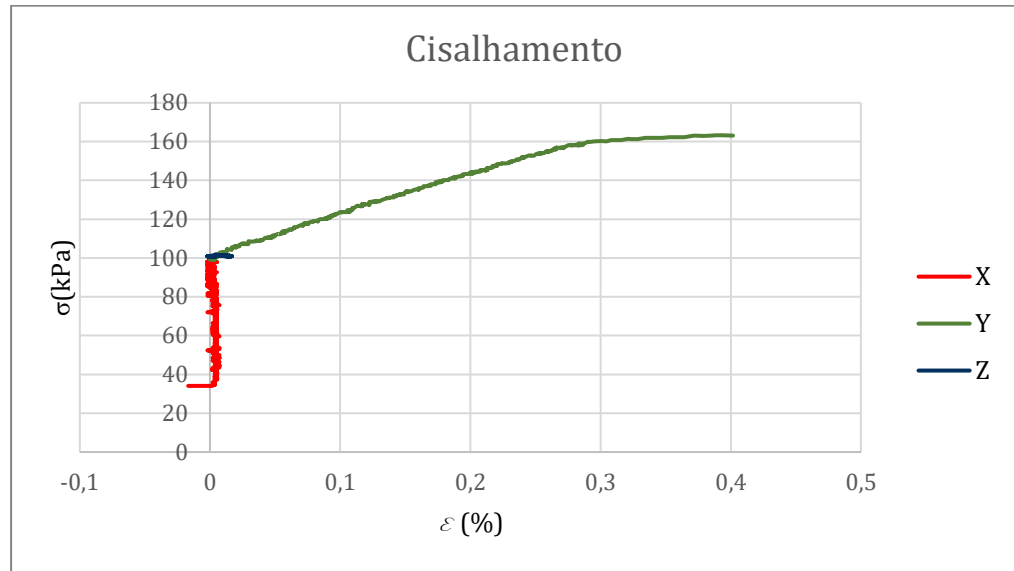


Figura 7-70 Tensão deformação amostra aO1c3d-90°

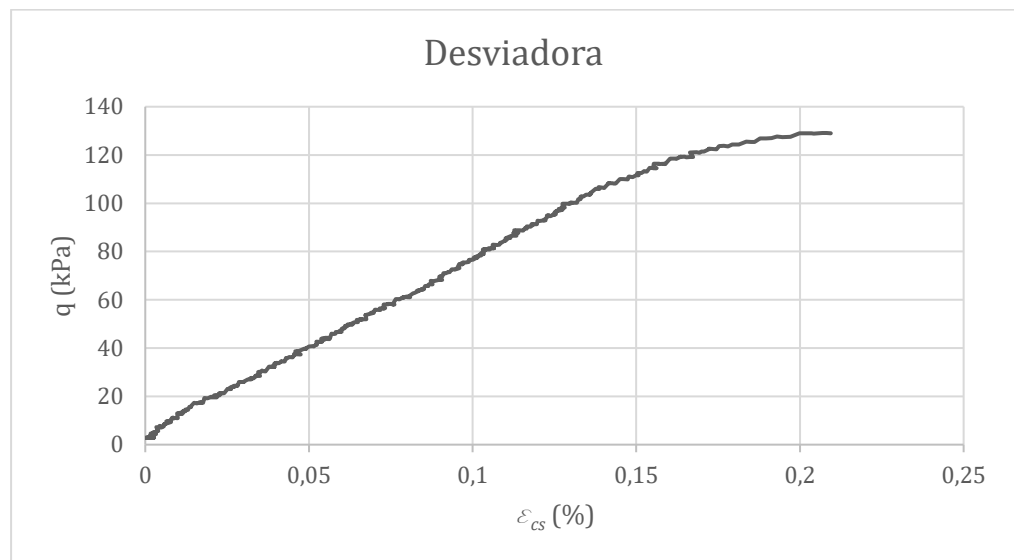


Figura 7-71 deformação desviadora vs deformação cisalhante amostra aO1c3d-90°

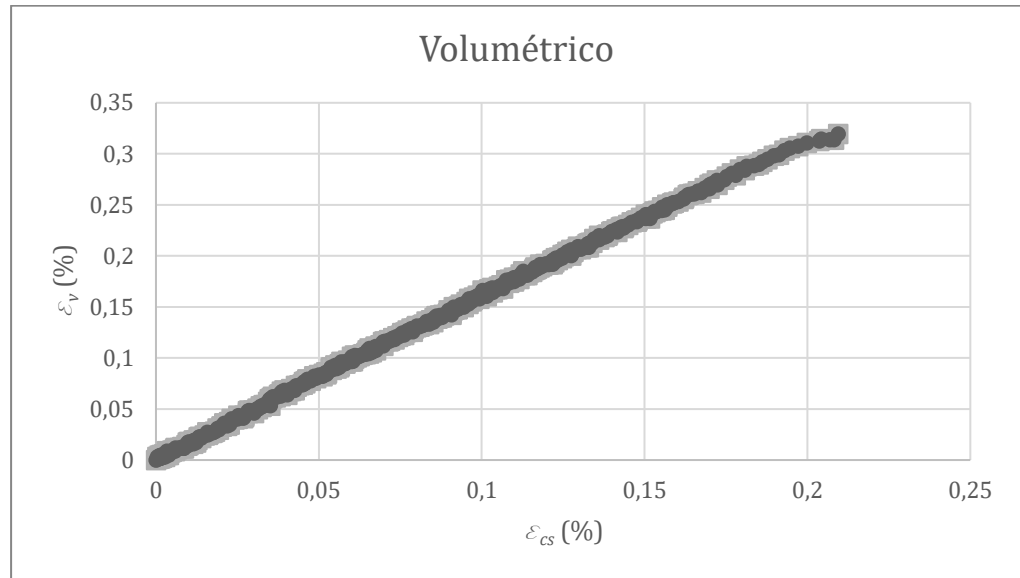


Figura 7-72 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-90°

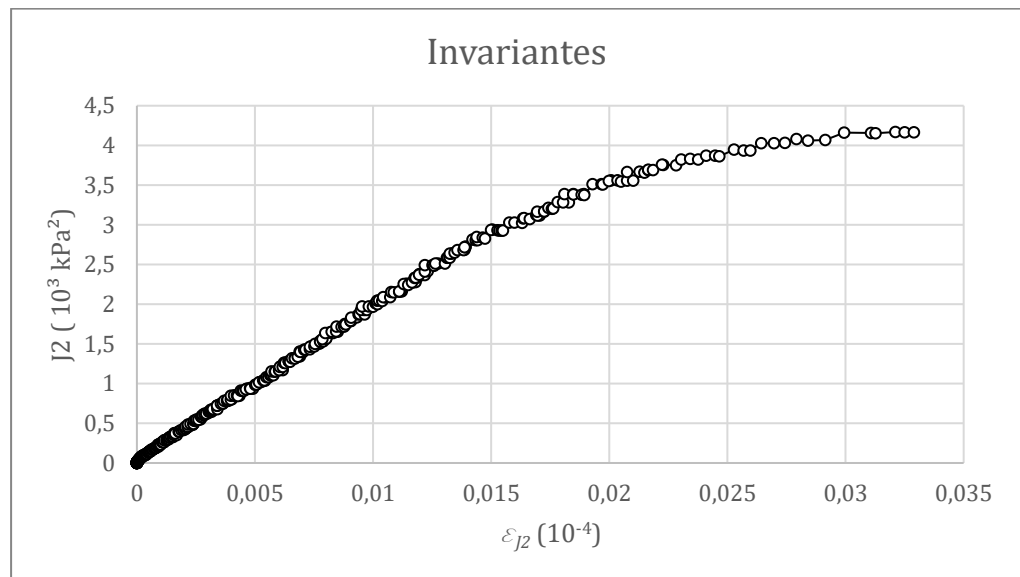


Figura 7-73 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-90°

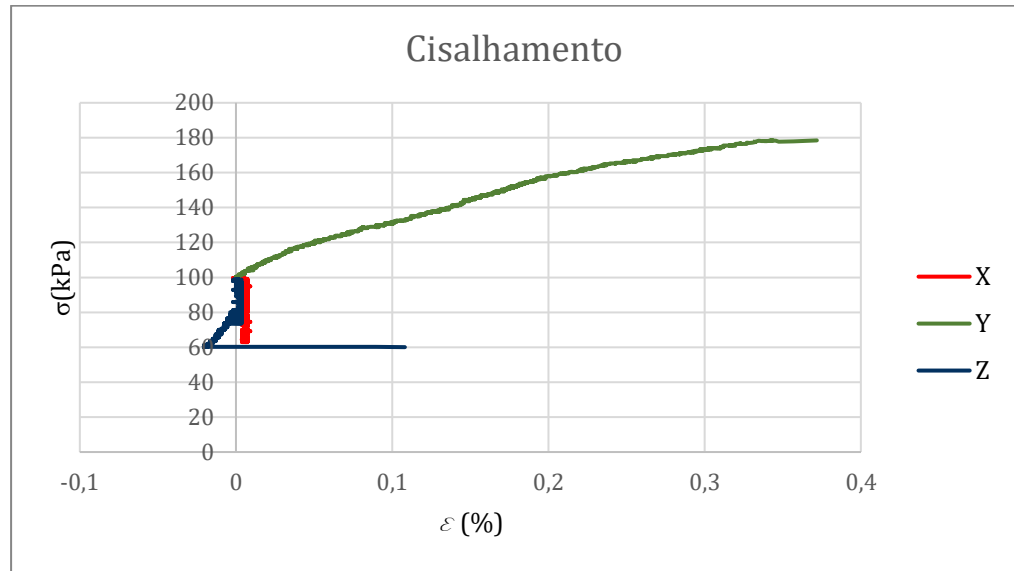


Figura 7-74 Tensão deformação amostra aO1c3d-120°

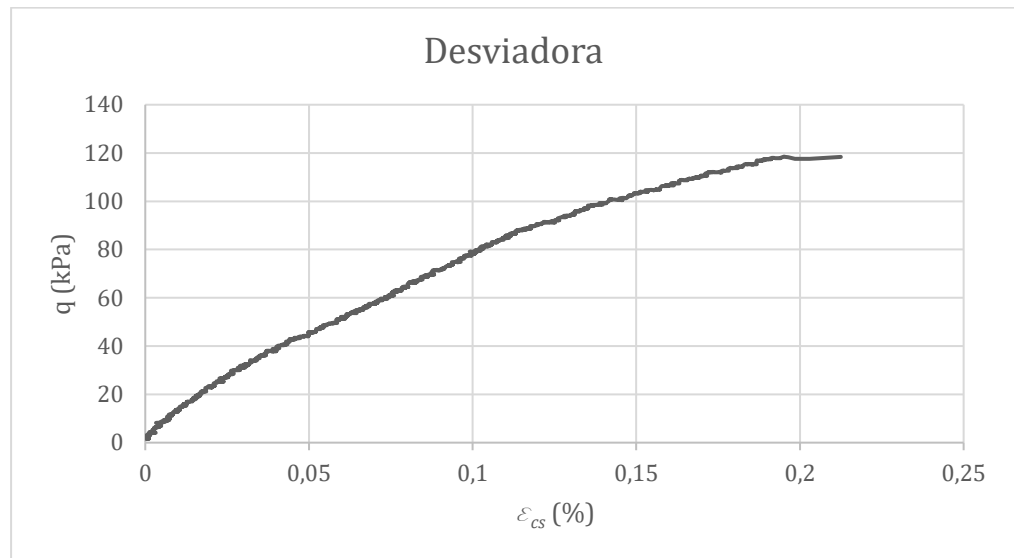


Figura 7-75 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-120°

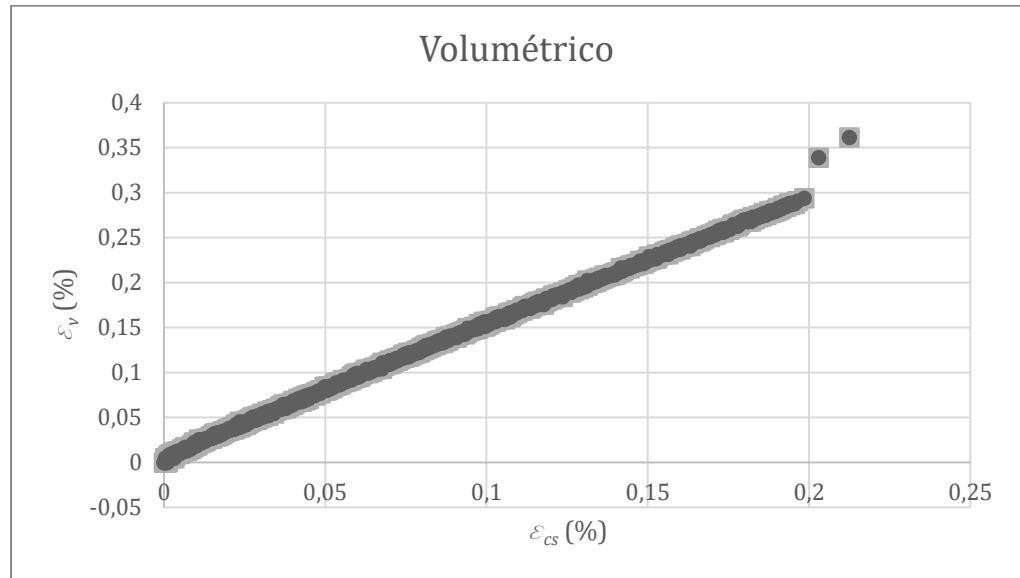


Figura 7-76 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-120°

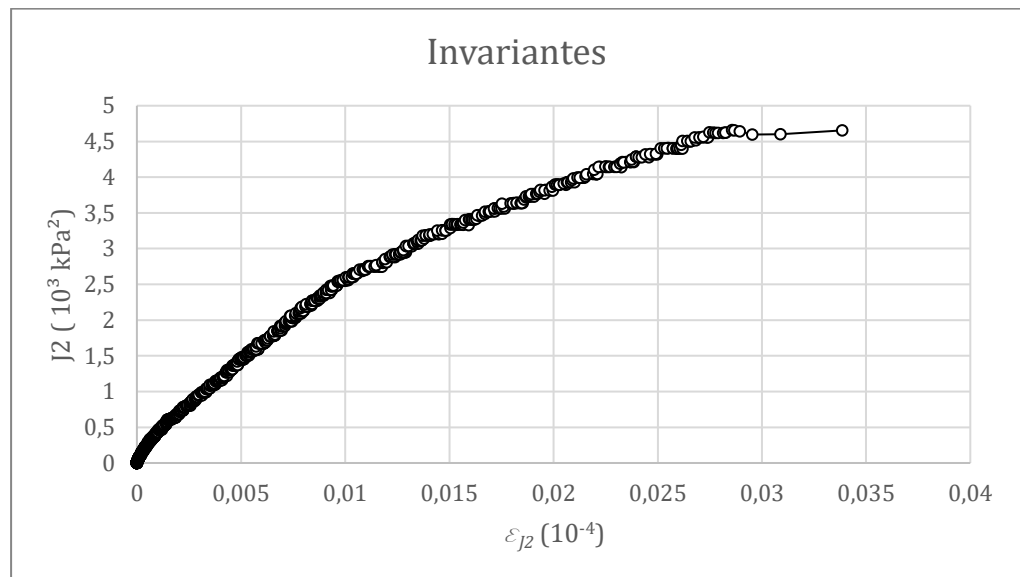


Figura 7-77 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-120°

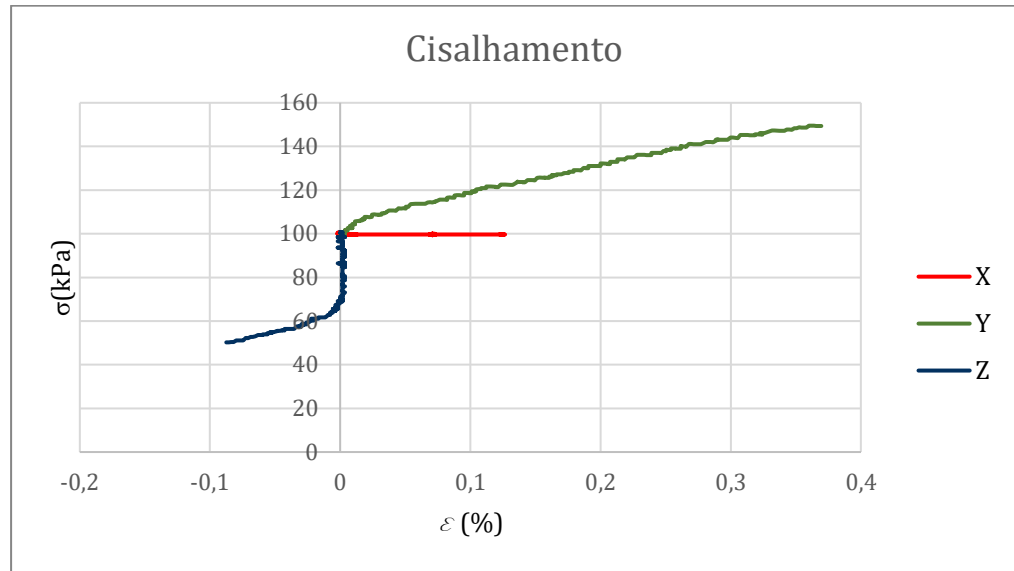


Figura 7-78 Tensão deformação amostra aO1c3d-150°

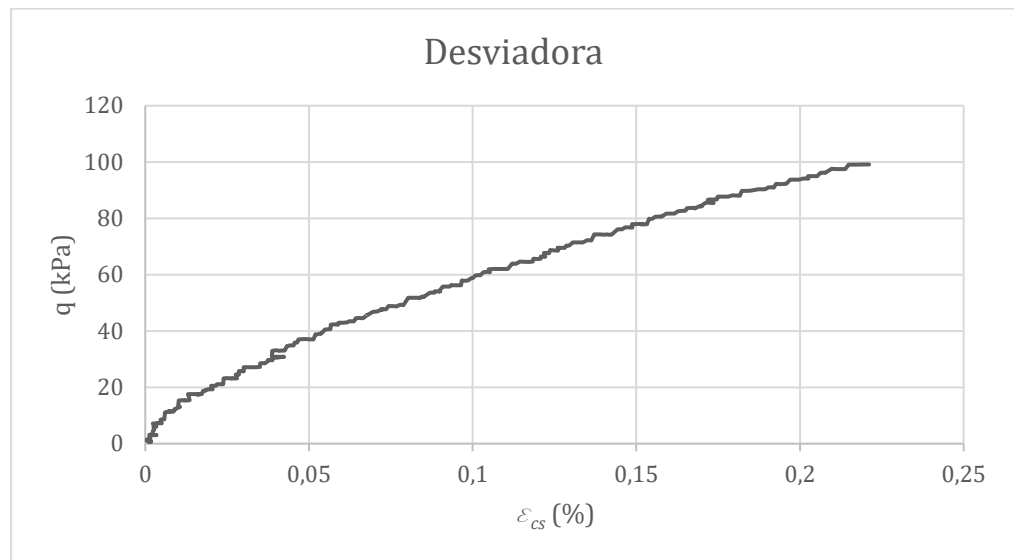


Figura 7-79 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-150°

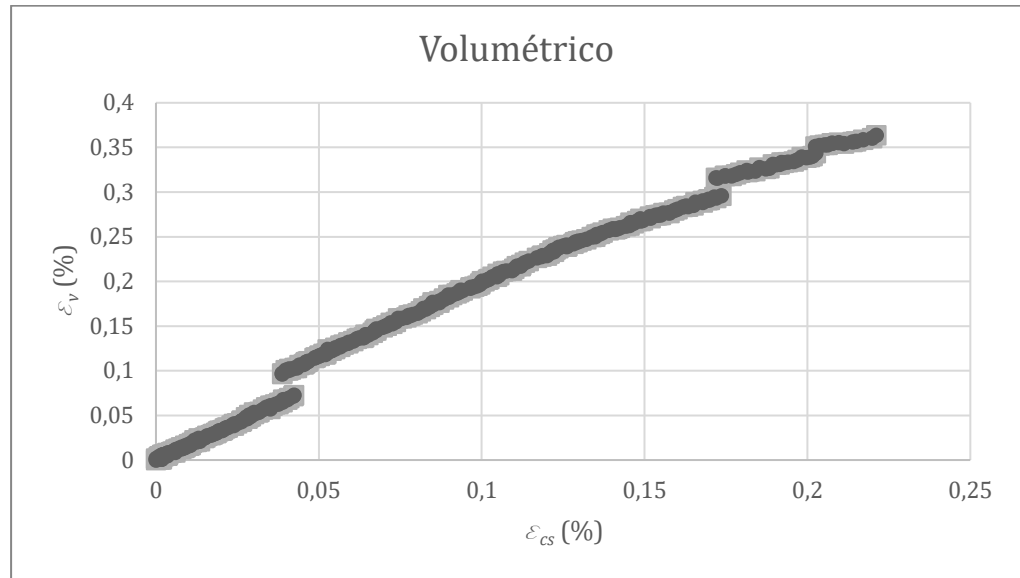


Figura 7-80 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-150°

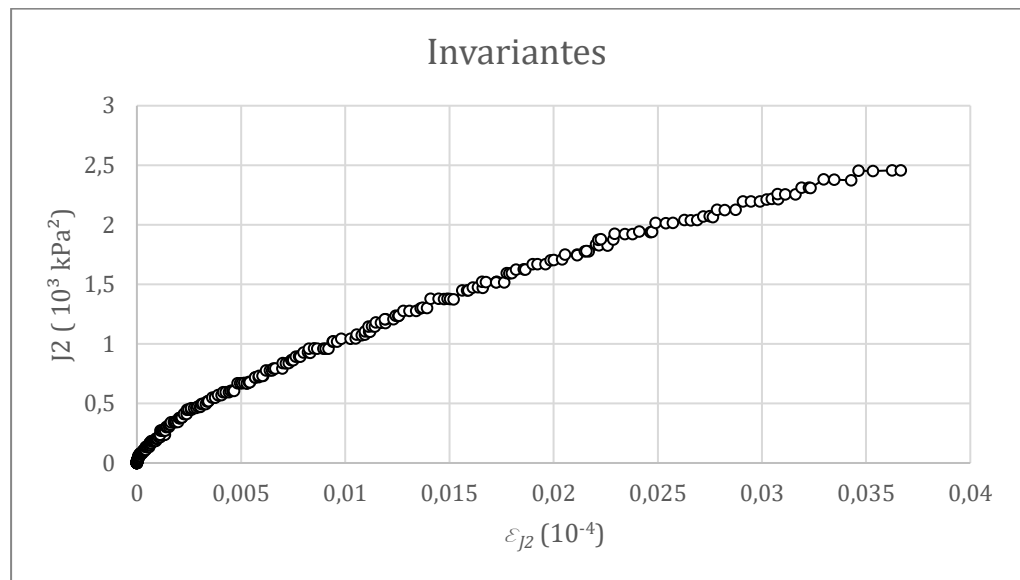


Figura 7-81 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-150°

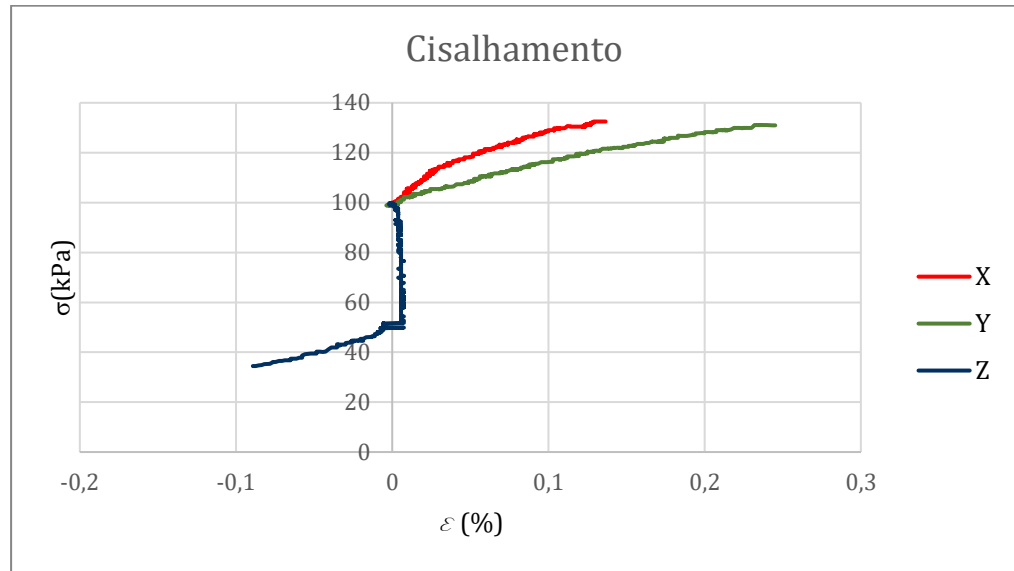


Figura 7-82 Tensão deformação amostra aO1c3d-180°

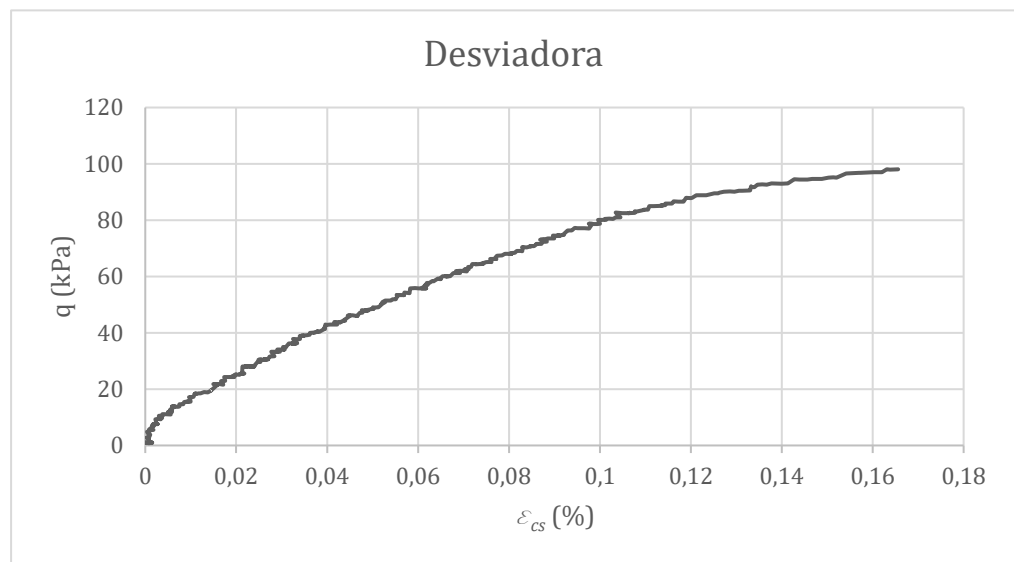


Figura 7-83 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO1c3d-180°

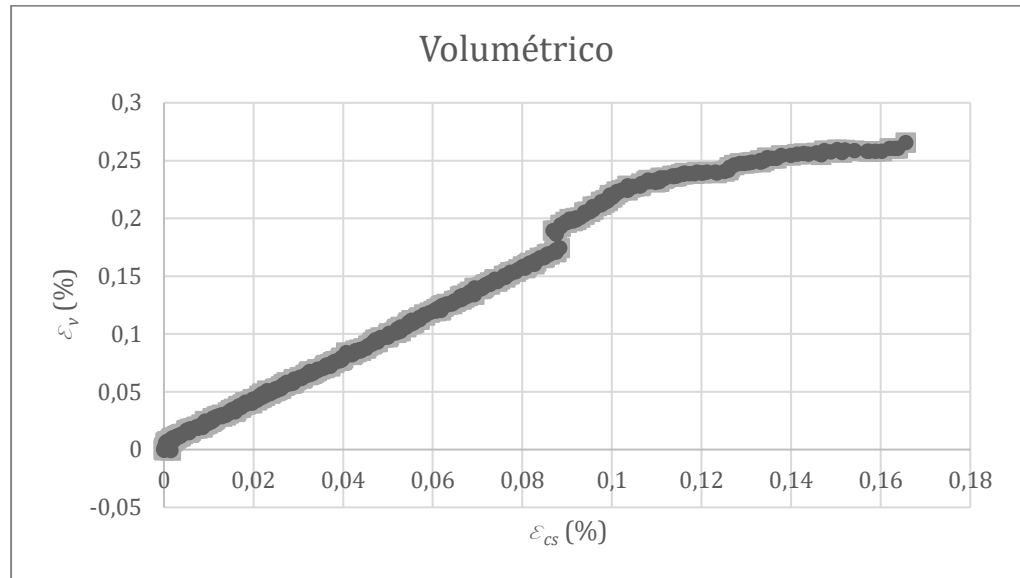


Figura 7-84 Comportamento volumétrico amostra aO1c3d-180°

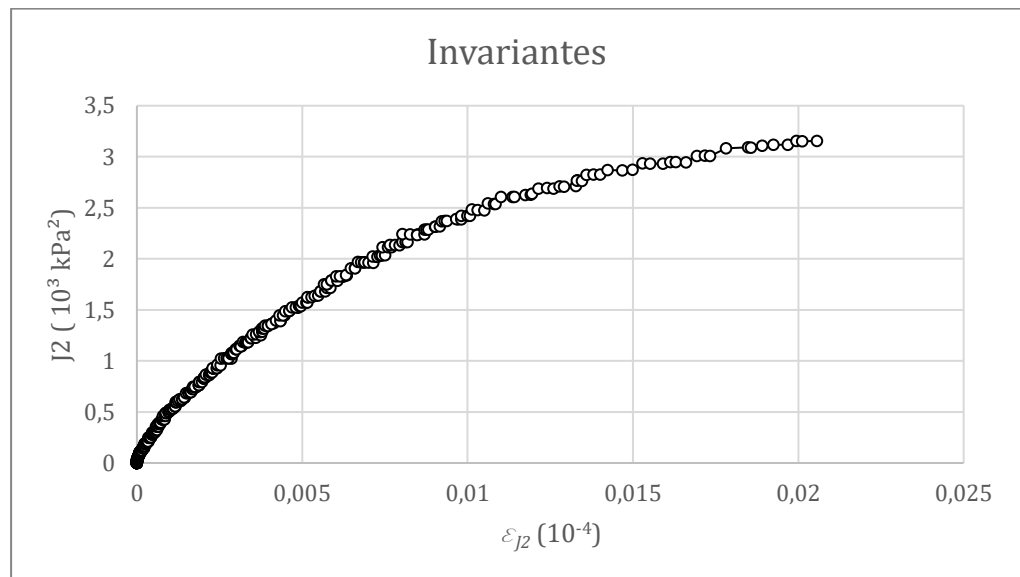


Figura 7-85 Comportamento sob invariantes amostra aO1c3d-180°

7.5.4 Triaxiais cúbicos de areia de Osório cimentada cura atmosférica
cimentação maior e três dias de cura

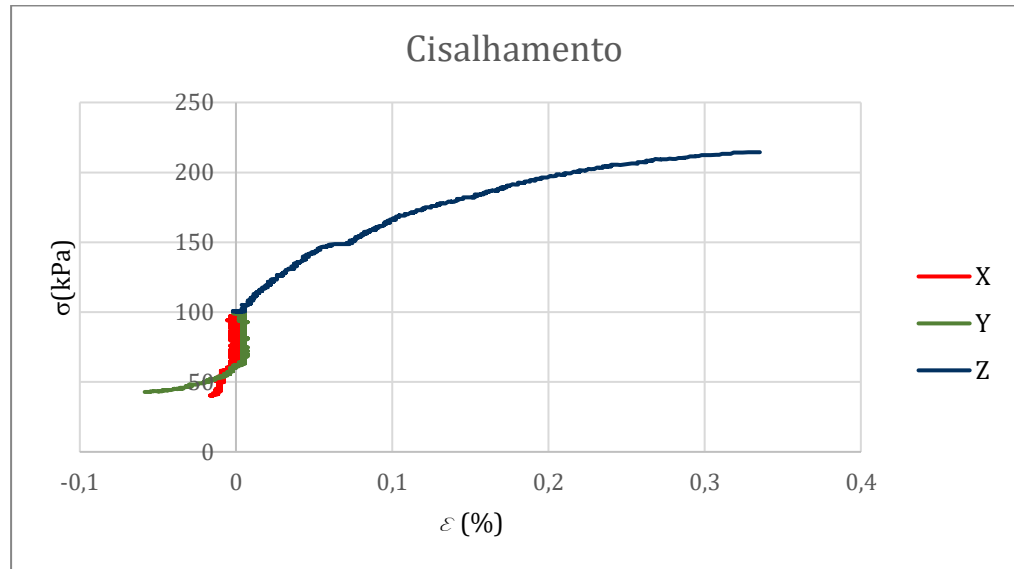


Figura 7-86 Tensão deformação amostra aO2c3d-0°

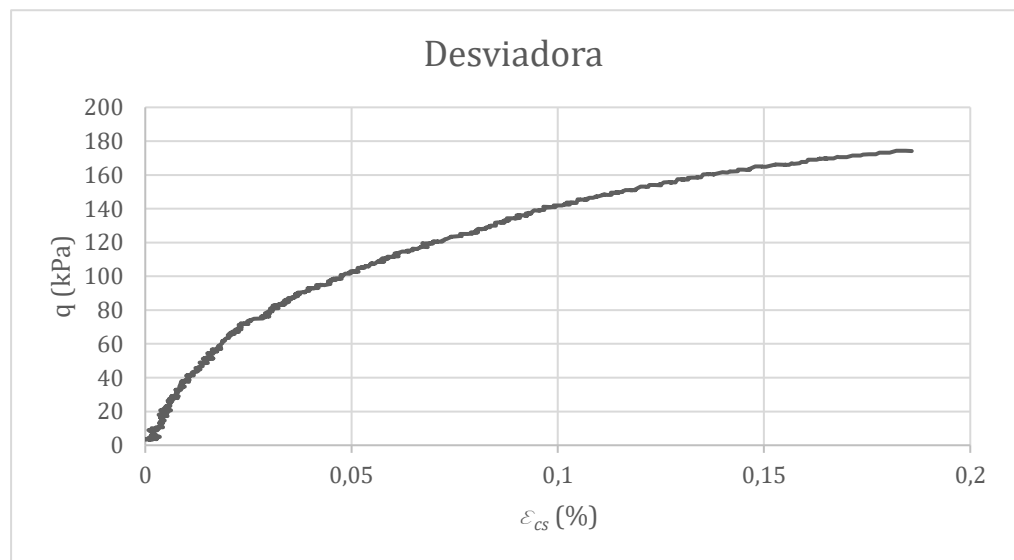


Figura 7-87 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra
aO2c3d-0°

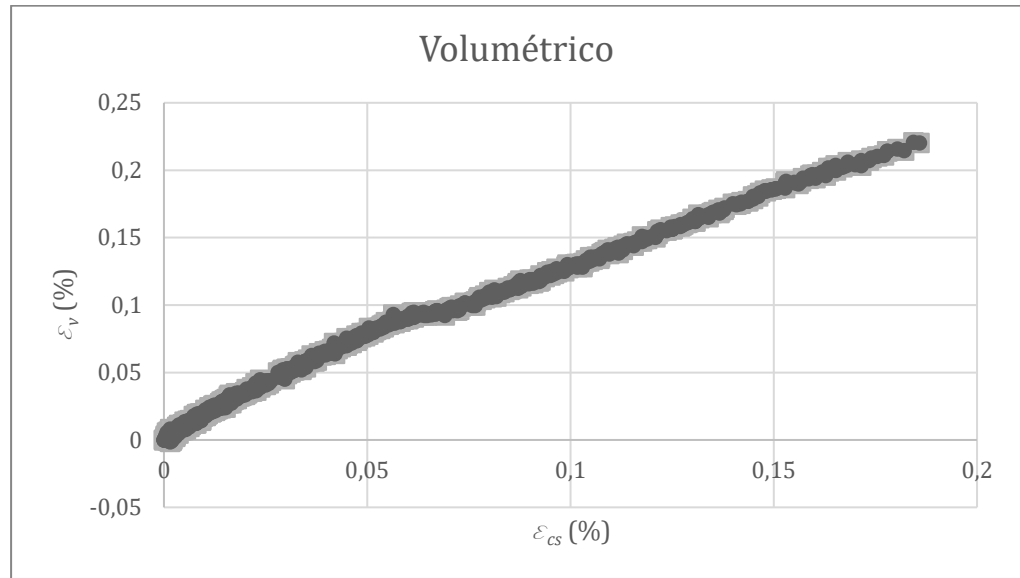


Figura 7-88 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-0°

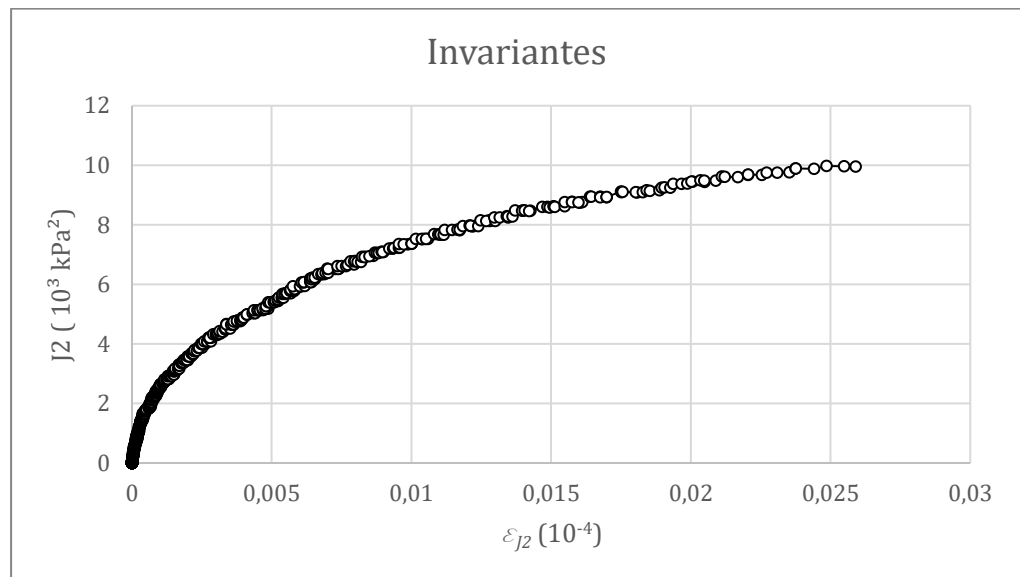


Figura 7-89 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-0°

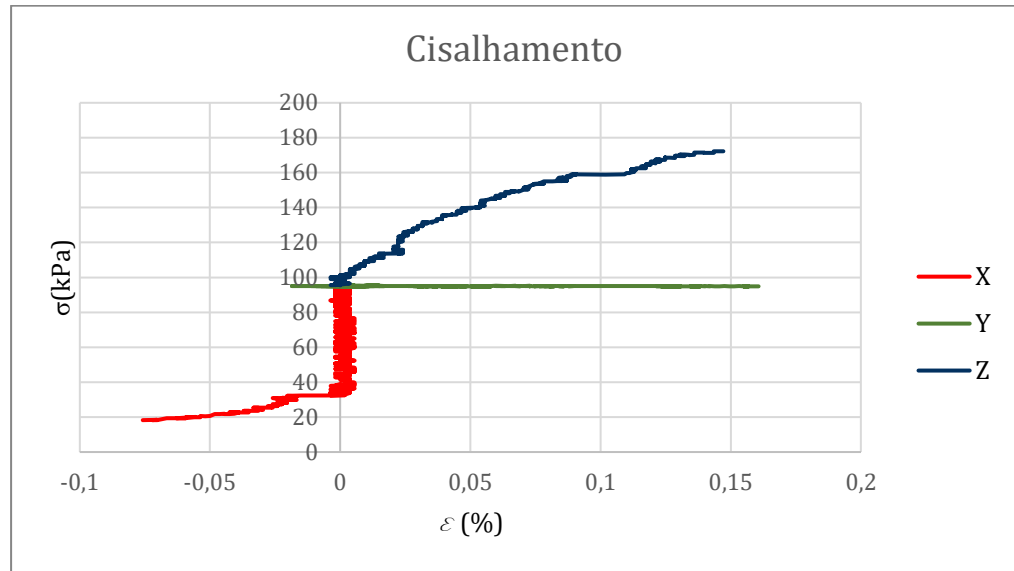


Figura 7-90 Tensão deformação amostra aO2c3d-30°

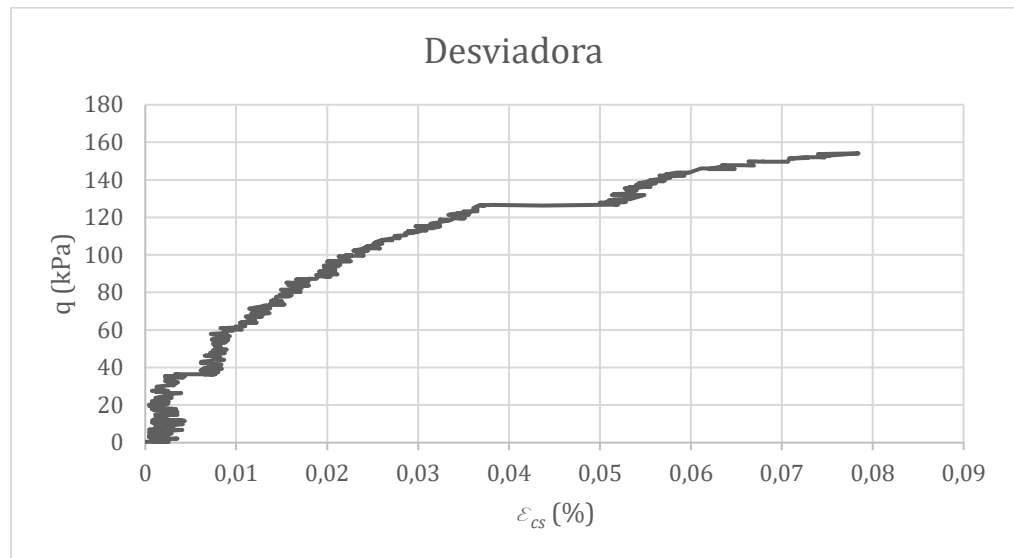


Figura 7-91 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-30°

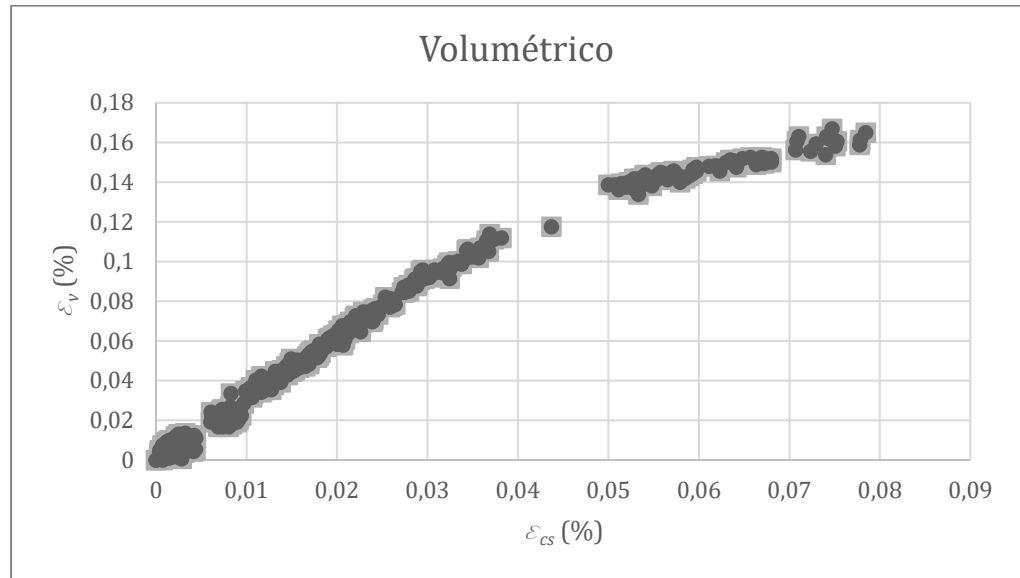


Figura 7-92 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-30°

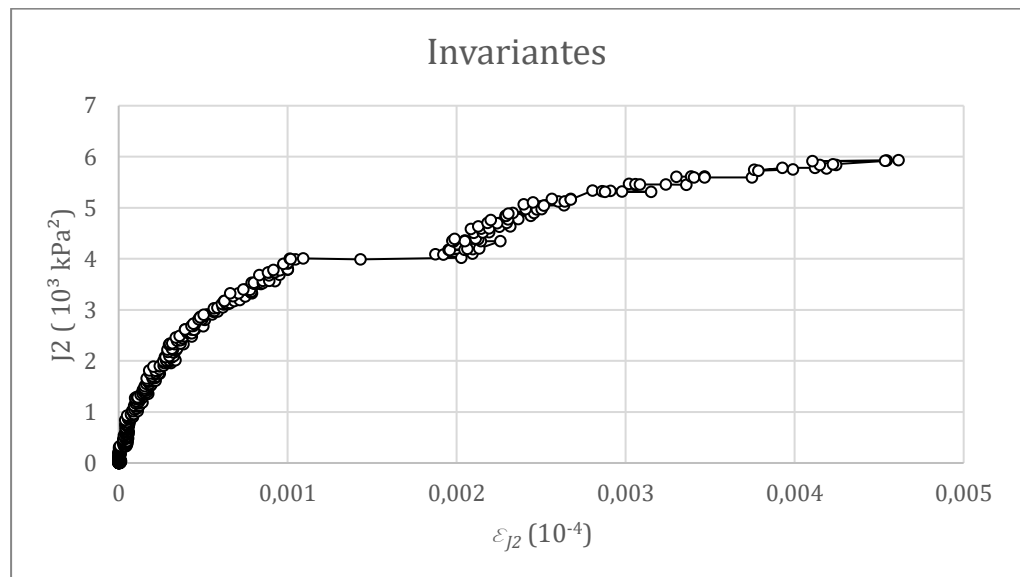


Figura 7-93 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-30°

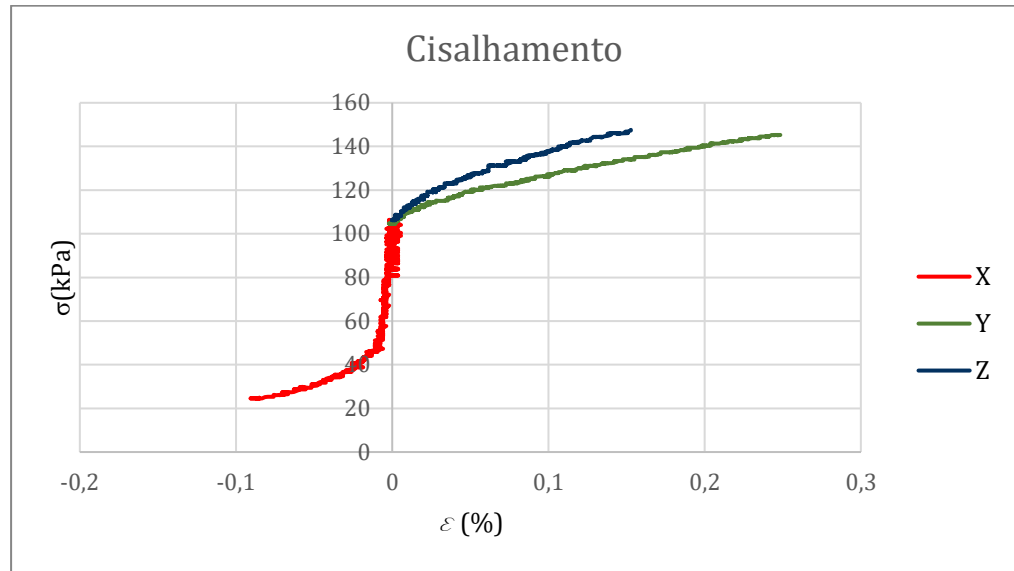


Figura 7-94 Tensão deformação amostra aO2c3d-60°

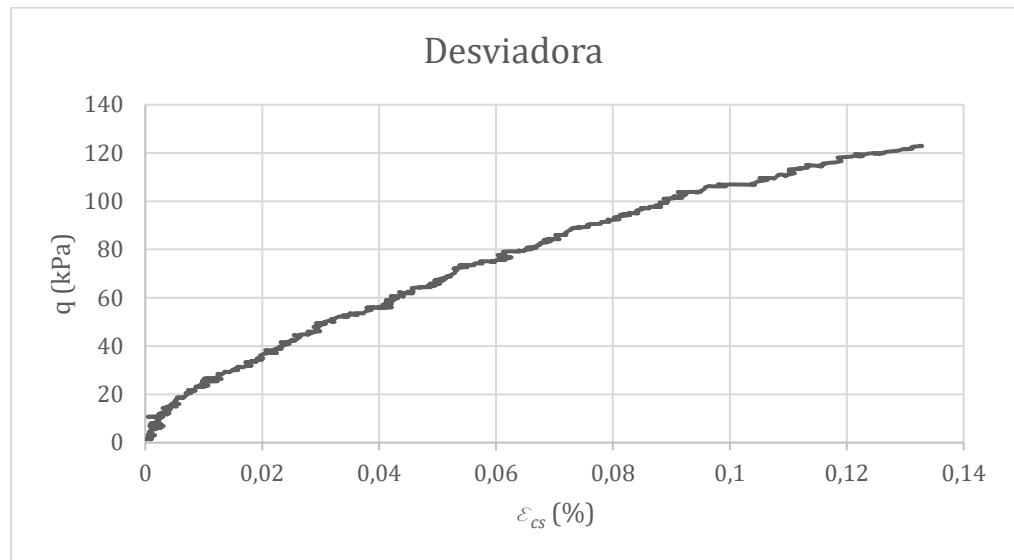


Figura 7-95 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-60°

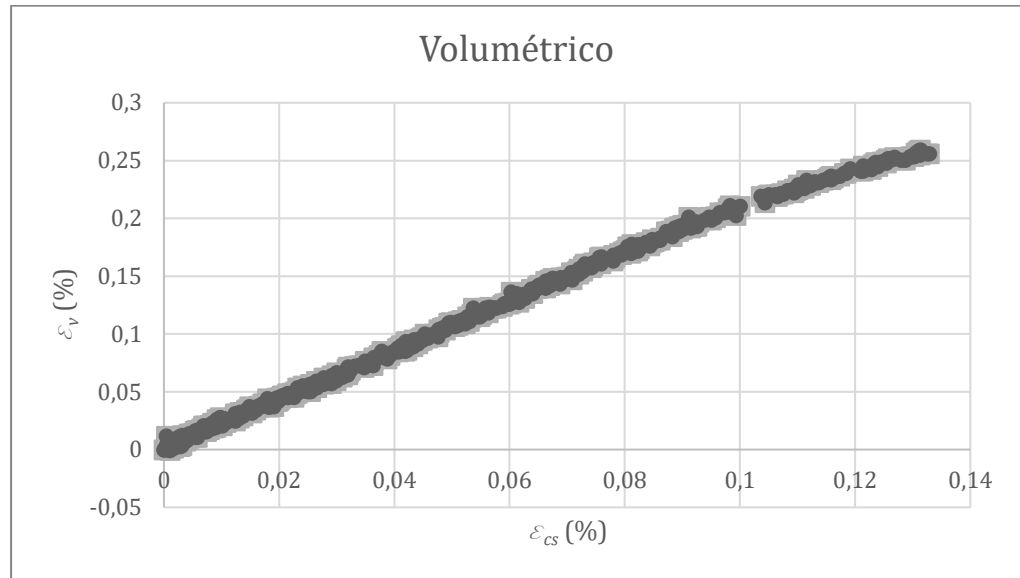


Figura 7-96 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-60°

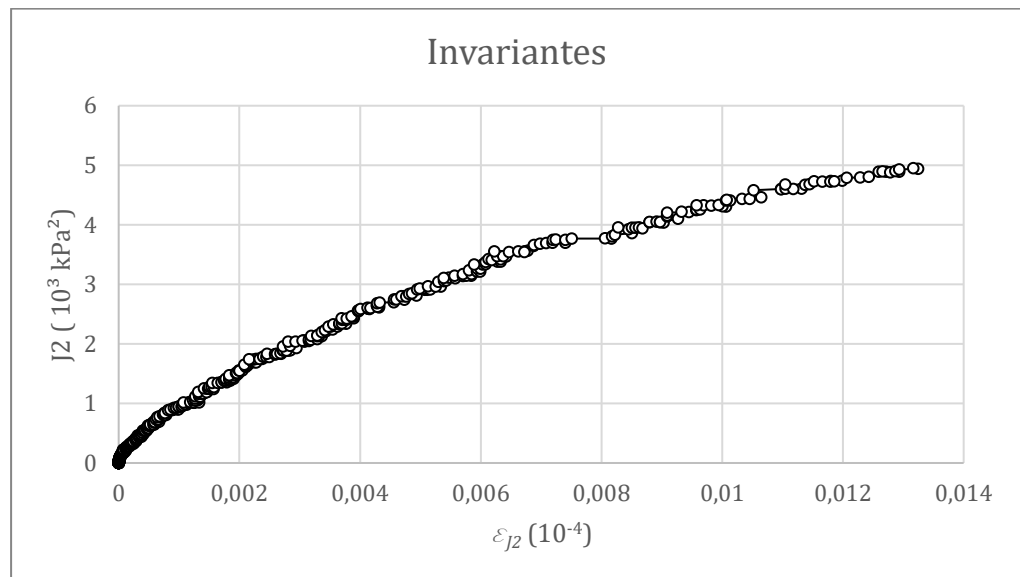


Figura 7-97 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-60°

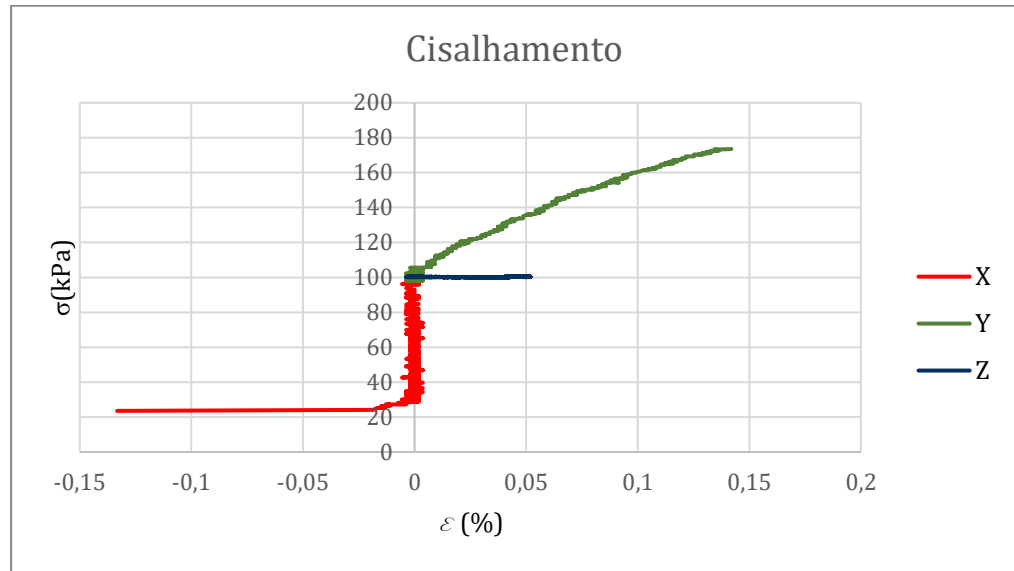


Figura 7-98 Tensão deformação amostra aO2c3d-90°

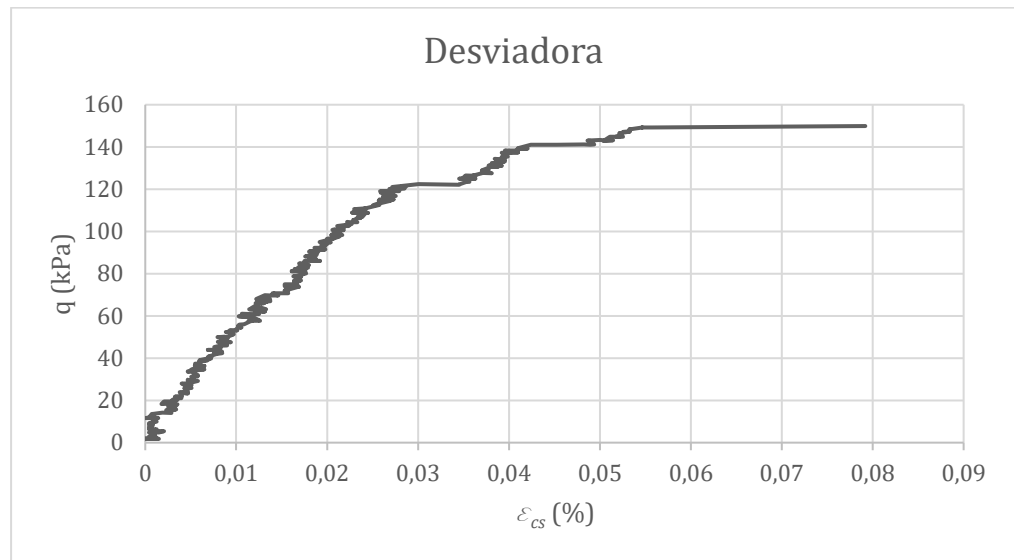


Figura 7-99 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-90°

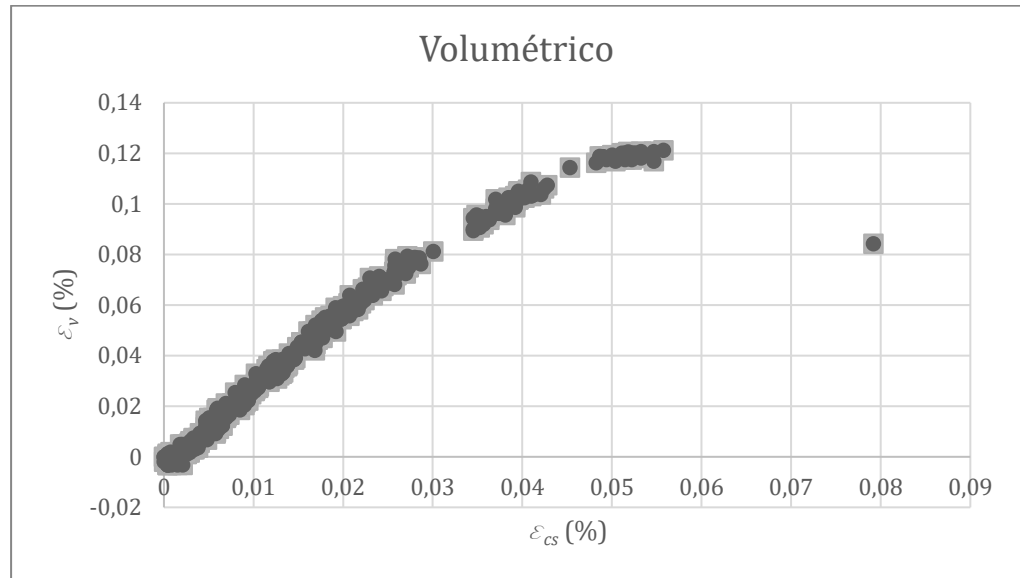


Figura 7-100 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-90°

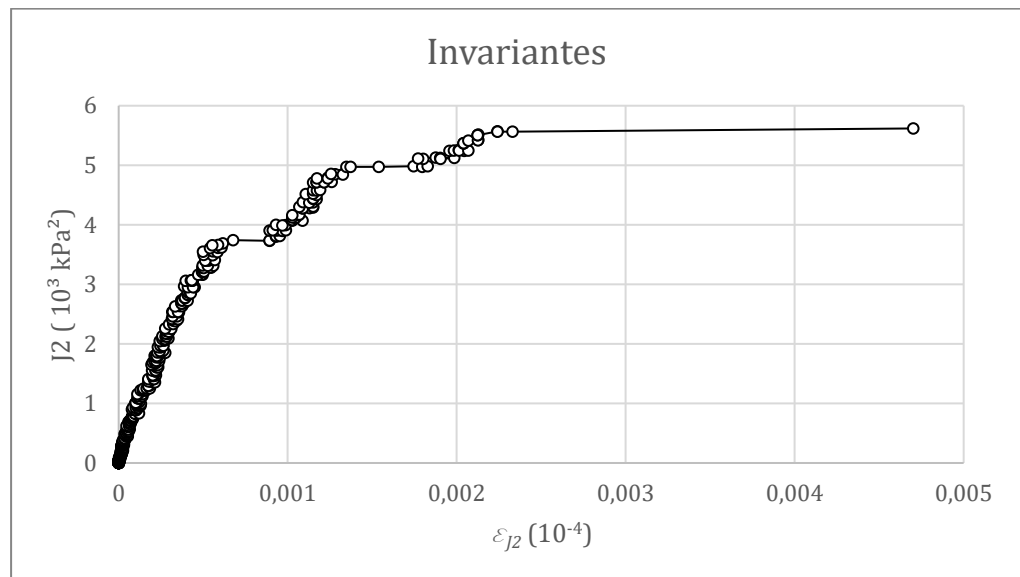


Figura 7-101 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-90°

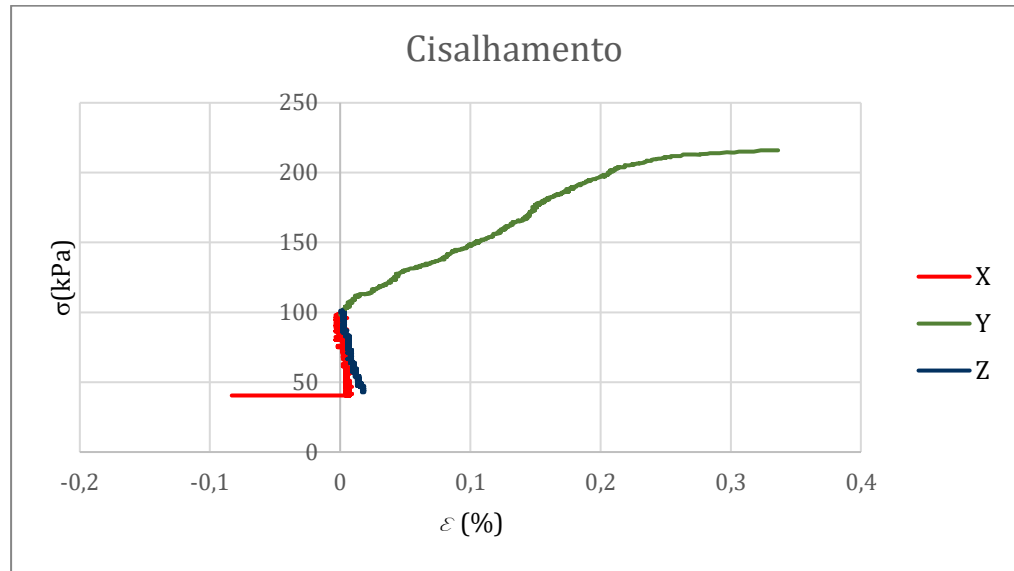


Figura 7-102 Tensão deformação amostra aO2c3d-120°

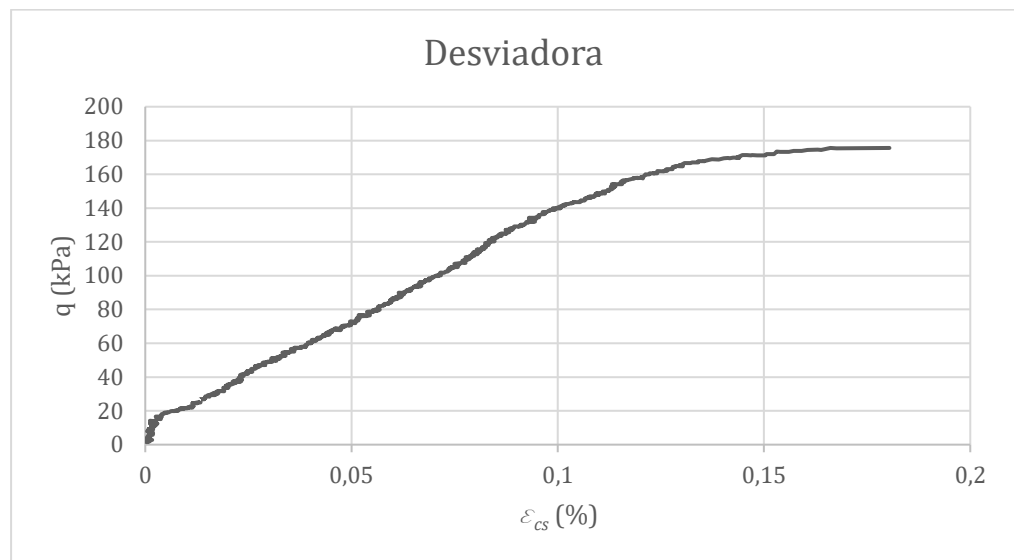


Figura 7-103 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-120°

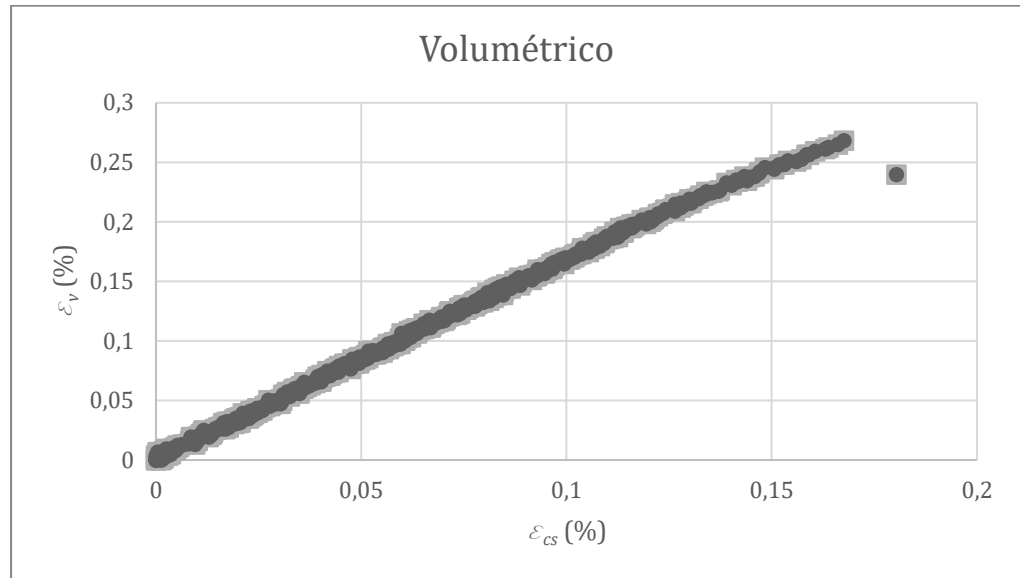


Figura 7-104 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-120°

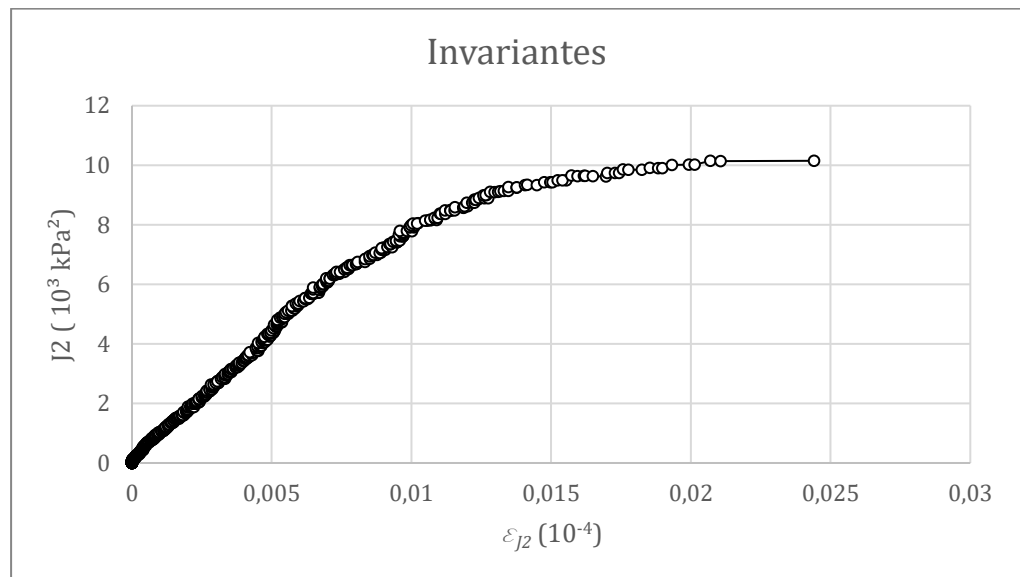


Figura 7-105 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-120°

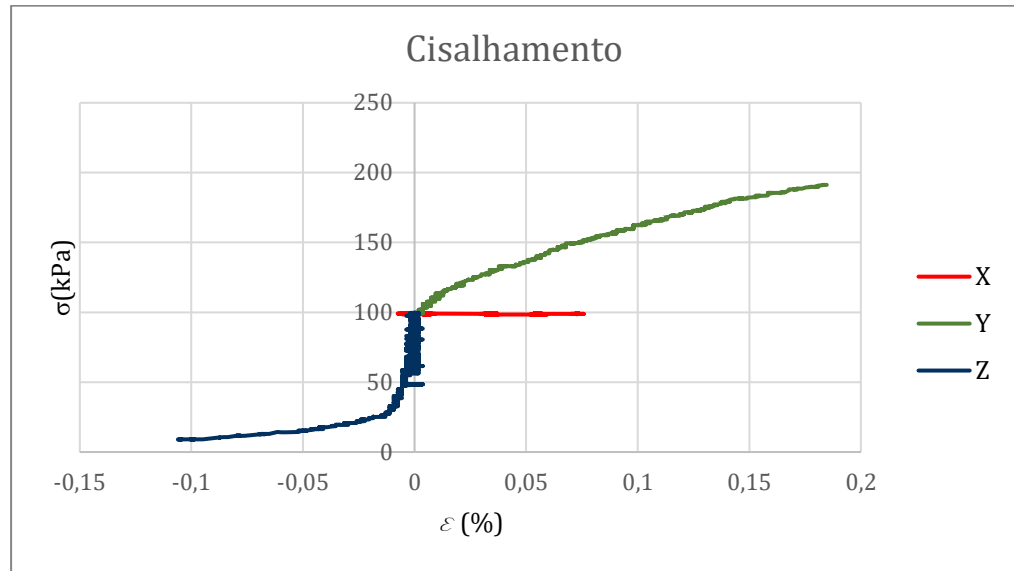


Figura 7-106 Tensão deformação amostra aO2c3d-150°

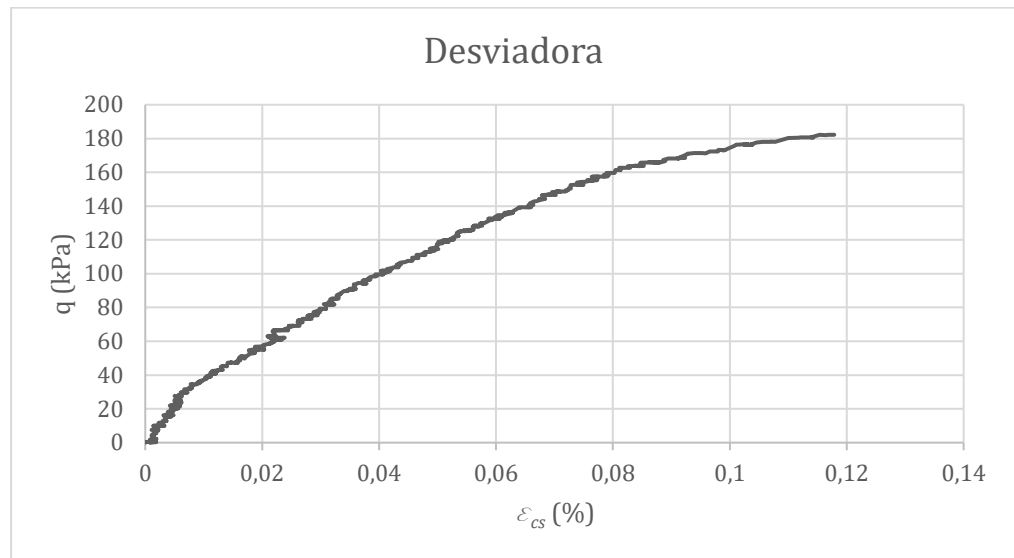


Figura 7-107 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-150°

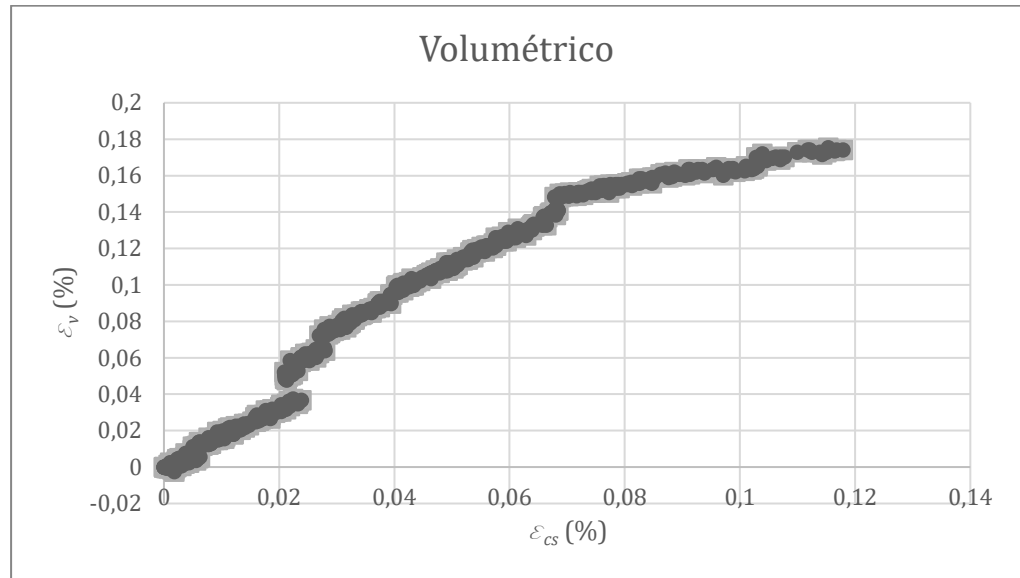


Figura 7-108 Comportamento volumétrica amostra aO2c3d-150°

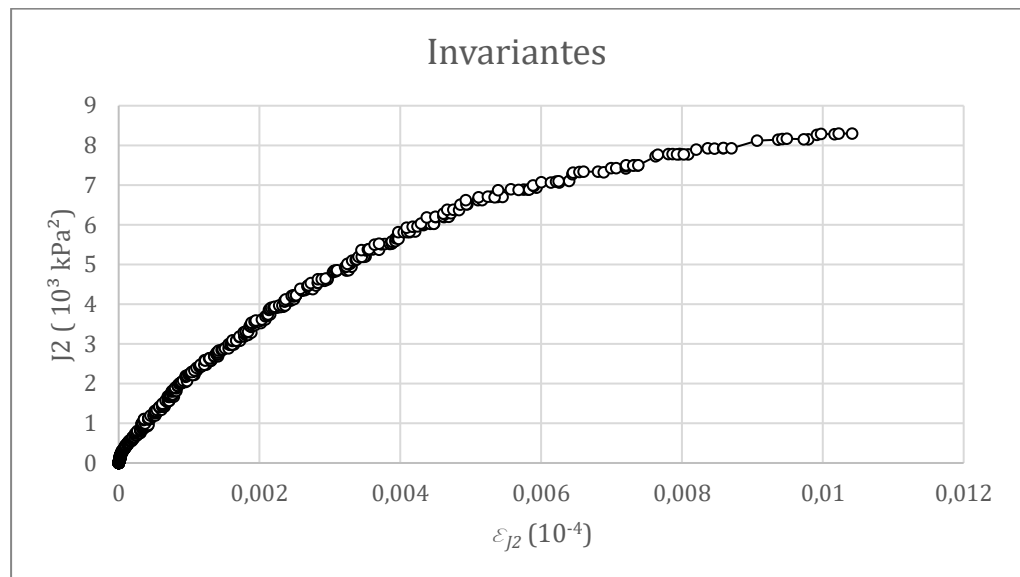


Figura 7-109 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-150°

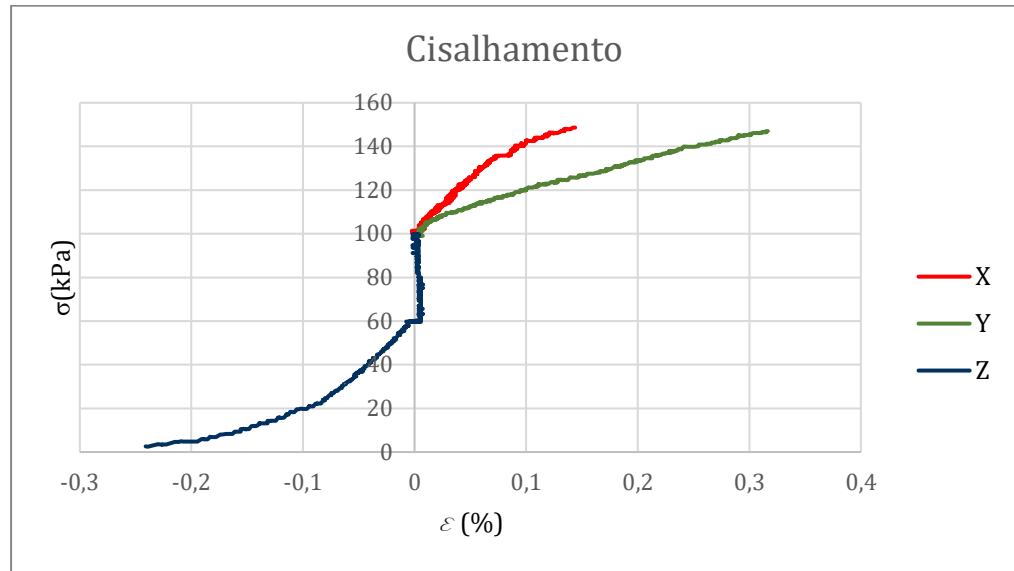


Figura 7-110 Tensão deformação amostra aO2c3d-180°

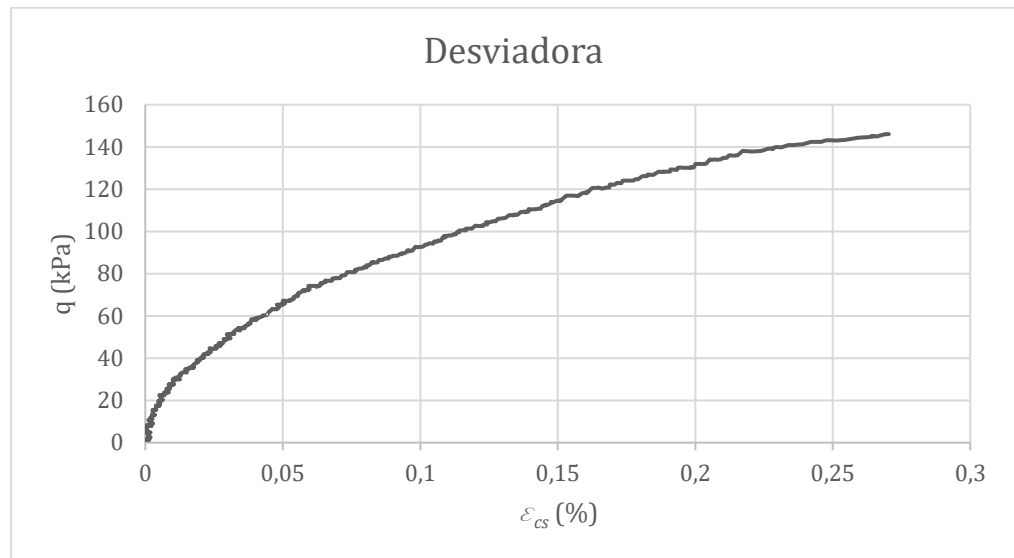


Figura 7-111 Tensão desviadora versus deformação cisalhante amostra aO2c3d-180°

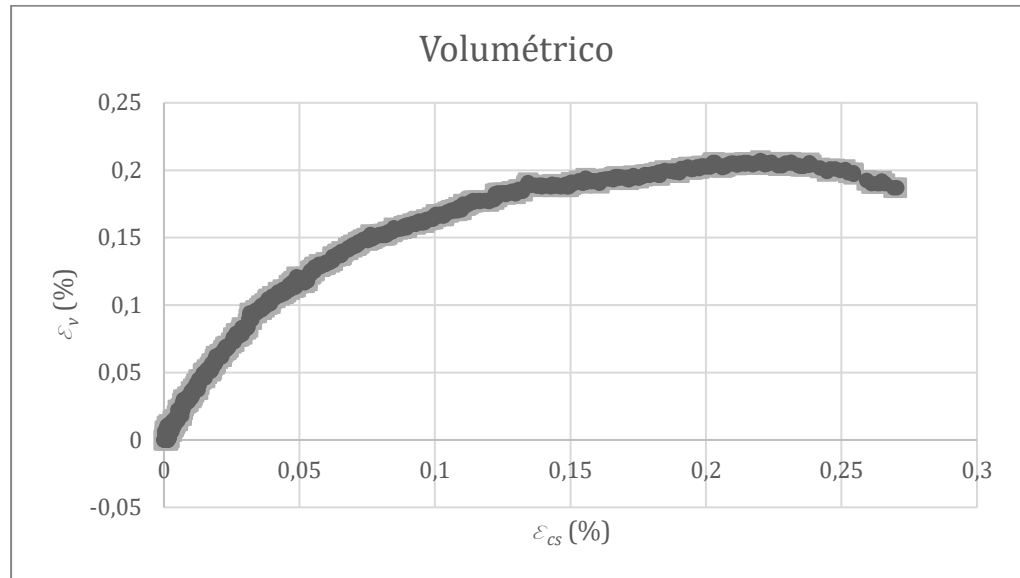


Figura 7-112 Comportamento volumétrico amostra aO2c3d-180°

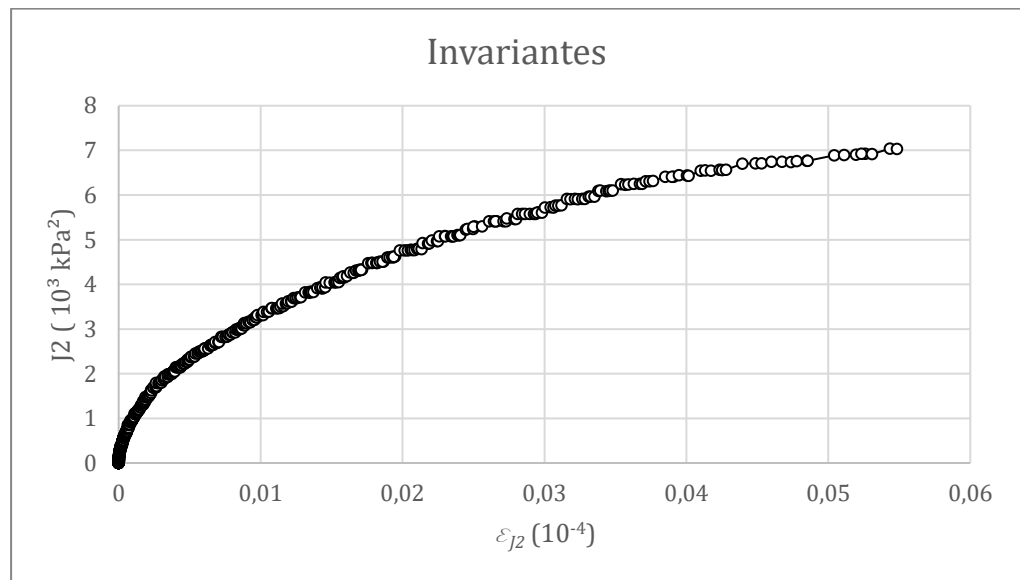


Figura 7-113 Comportamento sob invariantes amostra aO2c3d-180°