

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Efeito da adição de fibras no comportamento de uma areia sob carregamentos cíclicos

Jorge Hernán Flórez Gálvez

Porto Alegre
2018

JORGE HERNÁN FLÓREZ GÁLVEZ

**EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS NO COMPORTAMENTO
DE UMA ÁREA SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS**

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

2018

CIP - Catalogação na Publicação

Flórez-Gálvez, Jorge Hernán

Efeito da adição de fibras no comportamento de uma areia sob carregamentos cíclicos / Jorge Hernán Flórez-Gálvez. -- 2018.

262 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Coorientador: 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, 2018.

1. Areia-fibra. 2. Areias reforçadas com fibras.
3. Melhoramento de solos. 4. Carregamentos cíclicos.
5. Triaxial cíclico. I. Consoli, Nilo Cesar, orient.
II. Festugato, Lucas, coorient. III. Título.

JORGE HERNÁN FLÓREZ GÁLVEZ

**EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS NO COMPORTAMENTO
DE UMA AREIA SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS**

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, 5 de janeiro de 2018

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph. D. pela Concordia University
Orientador

Prof. Lucas Festugato
D. Sc. pela Univ Federal do Rio Grande do Sul
Co - Orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Pedro Domingos Marques Prietto (UPF)
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Cesar Alberto Ruver (UFRGS)
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Certamente, neste curto espaço serão várias as pessoas cujo nome poderei não mencionar, mas que de uma ou de outra maneira foram importantes para este processo que se vê plasmado neste documento. A todos eles peço as mais sinceras desculpas, e espero poder demonstrar a minha gratidão de uma forma justa.

Após quase sete anos no país, não posso deixar de expressar minha gratidão à República Federativa do Brasil, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e claro, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela ótima experiência de vida, e pela parte deles que fica na minha história de forma perene.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual esta experiência provavelmente não teria sido possível, inicialmente para mim e para minha esposa, e depois para nossa filha que teve a boa ventura de chegar neste mundo no Brasil.

Dentro da UFRGS, agradeço ao corpo docente, discente e administrativo do PPGEC pela sincera amizade e ensinamentos. Ao pessoal da Biblioteca da Escola de Engenharia, por sempre ter me ajudado e ter uma contínua disposição de colaboração.

Enfatizo meus agradecimentos aos Professores Nilo Cesar Consoli e Lucas Festugato, por ter me guiado ao longo deste processo, por ser referentes de respeito, admiração, e principalmente amizade. Agradeço o constante impulso para não desistir, para não perder a vontade, para manter nossas condições de trabalho, mesmo com as dificuldades atuais da universidade e do país. Considero que não poderia ter tido melhor orientação, e sinto que estive no melhor lugar em que poderia ter chegado.

Às pessoas que me motivam a cada minuto a ser melhor, a perseverar e crescer, e que são a fonte da minha felicidade: Adriana e Letícia, as duas pessoas que tem me mostrado as coisas mais belas da vida, com quem espero poder compartilhar por muitos anos.

Minha família, que ainda durante a longa ausência não deixaram de me apoiar sem hesitar um momento. Minha mãe, que junto com meu pai teve a força para que pudéssemos viver de uma forma digna e feliz. Não deixo de pensar em meu pai, quem embora não tenha conseguido me acompanhar em boa parte da minha vida, continua sendo um referente para mim em todos os aspectos. Meus irmãos, que sempre tem estado aí para mim, e tem me dado força em muitos

momentos difíceis.

Dentro do espaço de convívio no LEGG, gostaria agradecer a todas as pessoas que, juntas, fazem de aquele lugar uma experiência acadêmica e de vida exemplar. Seu João Diniz, quem de alguma maneira conseguia resolver as situações que para muitos de nós significavam atrasos na execução de nossos trabalhos. Aos amigos, mais que colegas, dentro do laboratório: Lucas Festugato, Sérgio Marques, David Lourenço, Vitor Faro, Marina Bellaver, Marina Bortolotto, Mozara Benetti, Lidiane Ibeiro, Daniel Winter, Naloan Sampa, Alejandro Quiñonez, Eduardo Bittar, Ricardo Born, Carina Silvani, Gonçalo Sonaglio, João Linch, Estéfano Menger, Eduardo Braun, Lucas Obino, Ricardo Menezes. Todos eles são, de uma forma, coautores deste trabalho, seja desde o compartilhamento de informação acadêmica, ou também pelo convívio. O café dentro do laboratório sempre foi uma das melhores desculpas para aprender uns dos outros.

À Professora Nadia Benahmed agradeço o compartilhamento da informação dos seus ensaios para a complementação das minhas análises.

Aos amigos na Colômbia e no Brasil, e também aos que estão espalhados ao redor do globo, os quais ao longo destes anos têm sido mestres para mim, e motivos de sorrisos.

Finalmente, esta fase do processo que culmina neste momento, não teria sido possível sem o acolhimento do povo do Brasil, para eles minha sincera gratidão.

RESUMO

FLÓREZ-GÁLVEZ, J.H. Efeito da adição de fibras no comportamento de uma areia sob carregamentos cíclicos. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O avanço das técnicas de melhoramento de solos vem permitindo o aproveitamento de locais nos quais, até pouco tempo atrás, era considerada a construção de muitas estruturas como inviáveis, seja técnica, financeira ou ambientalmente. Uma das técnicas que tem conseguido demonstrar bons resultados é o reforço com fibras de diferentes origens, com ou sem presença de algum agente cimentante. A maioria dos estudos conduzidos sobre este tipo de materiais se têm centrado na caracterização dos materiais sob cargas estáticas, e outros estudos se limitam a avaliar o comportamento sob cargas cíclicas destes materiais para densidades relativas baixas, nas quais o fenômeno de liquefação governa o mecanismo de ruptura. O presente estudo tenta aprofundar no conhecimento sobre materiais compactos quando submetidos a carregamentos cíclicos, de maneira a fornecer insumos para o estudo deste campo. O estudo, de caráter experimental, foi feito através da caracterização de corpos de prova de areia e areia com 0,5% de fibras, além da consideração de dois índices de vazios: o primeiro de 0,63 (correspondente a uma densidade relativa de 90%), e o segundo com um índice de vazios igual a 0,75 (correspondente a uma densidade relativa de 50%). Foram executados 29 ensaios triaxiais, além da adoção dos valores de outros 15 feitos por outro autor, totalizando 44 ensaios. A totalidade dos ensaios divide-se assim: 12 ensaios monotônicos CID, 12 ensaios monotônicos CIU, e 20 ensaios cíclicos CIU sob tensão controlada. Nos ensaios monotônicos obtiveram-se incrementos no ângulo de atrito do material composto, sendo mais evidente para as amostras compactas. Em relação aos ensaios cíclicos, obteve-se incrementos na resistência do material até atingir sua condição de ruptura, seja por liquefação em amostras pouco compactas ($D_r = 50\%$), ou por mobilidade cíclica no caso de amostras compactas ($D_r = 90\%$). A normalização dos resultados permitiu observar que, embora as fibras melhorem o desempenho das misturas quando submetidas a carregamentos cíclicos, não alteraram a estrutura do material em sua resposta em termos de módulo de elasticidade, pelo menos no que respeita a níveis de deformações medianos a grandes. Para pequenas deformações, evidenciou-se uma diminuição na rigidez das amostras, ocasionando assim maiores acréscimos de poropressão nos estágios iniciais dos ensaios, mais nas em areias com fibras do que sem elas.

Palavras-chave: Areia-fibra; areias reforçadas com fibras; melhoramento de solos; Carregamentos cíclico; Triaxial cíclico.

ABSTRACT

FLÓREZ-GÁLVEZ, J.H. Effect of fiber addition on the behavior of sands under cyclic loadings. 2018. Thesis (Doctorate in Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The development of ground improvement techniques has allowed the use of certain places, which was in the past considered as non-viable for the construction of many types of structures. Fiber reinforced soils have shown good results, with or without presence of any cementitious agent. The focus of most studies performed on this type of materials, is the characterization under static loading, and other studies are limited to evaluating its behavior on cyclic loading at low level of relative density, in which cases the liquefaction phenomenon governs the mechanism of rupture. This study aims to improve the knowledge of cyclic loading effects in dense materials. Was carried out an experimental program by characterizing specimens of sand with 0% and 0.5% of randomly distributed fiber, considering two void ratios: 0.63 (dense sand, $D_r = 90\%$) and 0.75 (moderately loose sand, $D_r = 50\%$). In total, were performed 29 triaxial tests, in addition of another 15 executed by another author, totaling 44. The test were divided as follows: 12 monotonic CIU test, 12 monotonic CID test, and 20 CIU loading controlled cyclic test. In monotonic conditions, fibers addition increases the friction angle, mostly on dense samples ($D_r = 90\%$) than on loose specimens ($D_r = 50\%$). For cyclic tests, in both materials, fiber additions causes improvement on cyclic behavior, but with different failure mechanism, liquefaction for loose, and cyclic mobility for dense sands, regardless of the presence of fibers. The transformation of the number of cycles axis, or normalization of another cyclic results allowed observing that, despite the fiber addition can cause improvement of materials subjected to cyclic loading, the structure of the material did not change in elasticity modulus response, at least for medium to large strains levels. For small strains, occur a decrease in the stiffness of samples, causing greater increases of pore pressure in the initial stages of tests, more in reinforced sand than for none reinforced condition.

Key-words: Rock falls; Sand-fiber, fiber reinforced sands; ground improvement; Cyclic loadings; Cyclic triaxial test.

RESUMEN

FLÓREZ-GÁLVEZ, J.H. Efecto de la adición de fibras en el comportamiento de una arena bajo cargas cíclicas. 2018. Tesis (Doctorado en Ingeniería) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

El avance de las técnicas para mejoramiento de suelos ha permitido el aprovechamiento de sitios en los cuales, hasta hace poco tiempo, se consideraba como no viable la construcción de muchas estructuras, sea por cuestiones técnicas, financieras o ambientales. Una técnica que ha demostrado buenos resultados es la incorporación de refuerzos con fibras de diferente origen, considerando o no la presencia de algún agente cementante. La mayoría de los estudios realizados a este tipo de materiales se han centrado en la caracterización bajo la acción de cargas estáticas, e otros se han limitado a evaluar el comportamiento bajo la acción de cargas cíclicas considerando únicamente densidades relativas bajas, para las cuales la ruptura está controlada por el fenómeno de licuación. El presente estudio busca ahondar en el conocimiento sobre el comportamiento bajo acción de cargas cíclicas de materiales compactos, buscando con ello ampliar la base experimental sobre este campo. El estudio, de carácter experimental, fue realizado a partir de la caracterización de especímenes de arena sin fibras y con 0,5% de fibras, además de la consideración de dos relaciones de vacíos: 0.63 (correspondiente a una densidad relativa de 90%), y 0,75 (correspondiente a una densidad relativa de 50%). Fueron realizados 29 ensayos triaxiales, además de haber adoptado los resultados de otros 15 realizados por otro autor, totalizando 44 ensayos. Los ensayos fueron divididos así: 12 ensayos monotónicos CID, 12 ensayos monotónicos CIU, y 20 ensayos triaxiales cíclicos CID con control de esfuerzos. En los ensayos monotónicos fueron obtenidos incrementos en el ángulo de fricción del material compuesto, siendo esta situación más evidente en muestras compactas. Con relación a los ensayos cíclicos, se obtuvo incremento en la resistencia de las muestras hasta alcanzar su condición de ruptura, bien sea por licuación (materiales relativamente sueltos, $D_r = 50\%$), o por movilidad cíclica (materiales compactos, $D_r = 90\%$). La normalización de los resultados permitió observar que, aunque las fibras mejoran el desempeño bajo cargas cíclicas de los materiales, no alteraron la estructura del material en términos de módulo de elasticidad, por lo menos para niveles medios y altos de deformación. Para pequeñas deformaciones, se evidenció una disminución en la rigidez de las muestras, lo que produjo mayores incrementos en las presiones de poros durante las fases iniciales de los ensayos, con mayor visibilidad en las arenas con fibras que cuando no hubo adición

Palabras-clave: Arena-fibra; Arenas reforzadas con fibras; mejoramiento de suelos; Cargas cíclicas; Ensayo triaxial cíclico.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 22 |
| 1.1. OBJETIVOS | 24 |
| 1.2. ESTRUTURA DA TESE..... | 24 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 26 |
| 2.1. O EMPREGO DE FIBRAS COMO REFORÇO DE SOLOS | 26 |
| 2.2. MATERIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS | 28 |
| 2.2.1. Tipos de fibras utilizadas como elementos de reforço | 33 |
| 2.2.1.1. Fibras naturais | 33 |
| 2.2.1.2. Fibras poliméricas | 34 |
| 2.2.1.3. Fibras minerais | 36 |
| 2.2.1.4. Fibras metálicas..... | 38 |
| 2.2.2. Interação solo - fibra..... | 38 |
| 2.3. CARREGAMENTOS CÍCLICOS..... | 40 |
| 2.3.1. Principais fatores que controlam o comportamento sob cargas cíclicas | 42 |
| 2.3.1.1. Efeito das reversões de tensão..... | 43 |
| 2.3.1.2. Resposta do solo dependente da velocidade | 45 |
| 2.3.2. Alguns métodos para medição das propriedades dinâmicas em laboratório | 46 |
| 2.3.2.1. Coluna ressonante | 47 |
| 2.3.2.2. Triaxial cíclico..... | 47 |
| 2.3.2.3. <i>Simple shear</i> cíclico | 48 |
| 2.3.2.4. <i>Hollow cylinder</i> | 48 |
| 2.3.2.5. <i>Bender elements</i> | 49 |
| 2.3.3. Fatores que afetam os resultados nos ensaios triaxiais cíclicos | 49 |
| 2.4. COMPORTAMENTO DE AREIAS SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS | 51 |
| 2.4.1. Fenômeno de liquefação..... | 55 |
| 2.4.2. Fenômeno de mobilidade cíclica..... | 57 |
| 2.4.3. Fatores que afetam a resistência ao cisalhamento sob condições cíclicas | 59 |

| | |
|---|------------|
| 2.4.3.1. Densidade relativa | 59 |
| 2.4.3.2. Confinamento | 60 |
| 2.4.3.3. Presença de finos | 62 |
| 2.4.3.4. Critério de ruptura | 62 |
| 2.4.3.5. Analogias entre comportamento monotônico e cíclico | 63 |
| 2.5. ESTUDOS EM SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS | 66 |
| 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL | 73 |
| 3.1. VARIÁVEIS INVESTIGADAS | 73 |
| 3.2. MATERIAIS UTILIZADOS | 76 |
| 3.2.1. Areias | 76 |
| 3.2.1.1. Areia de Osório | 76 |
| 3.2.1.2. Areia Hostun RF | 82 |
| 3.2.2. Fibras | 85 |
| 3.2.3. Água | 85 |
| 3.3. PREPARAÇÃO E MONTAGEM DAS AMOSTRAS | 86 |
| 3.4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO | 88 |
| 3.4.1. Ensaios sob carregamento monotônico | 90 |
| 3.4.2. Ensaios sob carregamento cíclico | 90 |
| 4. IMPLEMENTAÇÃO DE UMA CÉLULA TRIAXIAL PARA APLICAÇÃO DE CARREGAMENTOS CÍCLICOS | 94 |
| 4.1. COMPONENTES FÍSICOS | 95 |
| 4.2. DISPOSITIVOS DE LEITURA E AQUISIÇÃO DE DADOS | 101 |
| 4.3. ROTINA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS | 104 |
| 4.4. VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO E REPETIBILIDADE DOS RESULTADOS | 109 |
| 4.4.1. Ensaios base para validação do equipamento | 110 |
| 4.4.2. Resultados de ensaios de validação do equipamento | 114 |
| 4.4.3. Ensaios para avaliar a repetibilidade dos resultados | 122 |
| 4.4.4. Resultados de ensaios para avaliar a repetibilidade dos resultados | 122 |
| 4.4.4.1. Ensaios executados com tensão desvio cíclica de ± 60 kPa | 122 |
| 4.4.4.2. Ensaios executados com tensão desvio cíclica de ± 80 kPa | 126 |
| 5. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES | 131 |
| 5.1. DEFINIÇÕES E NOTAÇÕES BÁSICAS | 131 |

| | |
|---|------------|
| 5.2. COMPORTAMENTO TENSÃO - DEFORMAÇÃO..... | 134 |
| 5.2.1. Carregamento monotônico drenado e não drenado..... | 134 |
| 5.2.2. Parâmetros de resistência ao cisalhamento | 142 |
| 5.2.3. Carregamento cíclico sob tensão controlada..... | 144 |
| 5.2.3.1. Evolução dos parâmetros associados com a poropressão e transformação do número de ciclos ou “ciclos normalizados” (N/N _f)..... | 145 |
| 5.2.3.2. Evolução das deformações permanentes | 167 |
| 5.2.3.3. Evolução da amplitude de deformações..... | 169 |
| 5.2.3.4. Degradação do módulo de elasticidade secante | 171 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 181 |
| 6.1. CONCLUSÕES | 181 |
| 6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 184 |
| REFERÊNCIAS | 186 |
| APÊNDICES..... | 198 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Representação esquemática de matriz com fibras descontínuas submetidas a carregamento axial (adaptado de Domone e Ilston (2010))..... | 31 |
| Figura 2.2: Disposição fibra/fissura idealizada (TAYLOR, 1994; FESTUGATO, 2011)..... | 31 |
| Figura 2.3: Períodos e número de ciclos associados a alguns eventos de carregamentos cíclico (Adaptado de ANDERSEN <i>et al</i> , 2013) | 41 |
| Figura 2.4: Elementos do ciclo de carga ou de deslocamentos | 42 |
| Figura 2.5: Classificação das solicitações em função do regime de cargas (Adaptado de ISHIHARA, 1996)..... | 43 |
| Figura 2.6: Desenvolvimento das deformações cisalhantes durante um ensaio com repetição de carga e definição da deformação cisalhante resiliente (Adaptado de O'REILLY E BROWN, 1991) | 44 |
| Figura 2.7: Efeito das reversões de tensão na rigidez do solo (Adaptado de O'REILLY E BROWN, 1991) | 45 |
| Figura 2.8: Ensaio em argilas com taxas variáveis de deformação (Adaptado de O'REILLY E BROWN, 1991) | 46 |
| Figura 2.9: Esquema simplificado de tensões ao longo da superfície potencial de falha abaixo de uma estrutura submetida a carregamentos cíclicos. H: força resultante horizontal; h: altura da resultante a partir da superfície (Adaptado de ANDERSEN, 2009) | 47 |
| Figura 2.10: Estado de tensões de um elemento de solo considerando superfície do terreno (a) plana e (b) inclinada (adaptado de ISHIHARA, 1996)..... | 52 |
| Figura 2.11: Simulação das tensões geostáticas e cíclicas em um corpo de prova submetido a um ensaio triaxial cíclico (ISHIHARA, 1996)..... | 53 |
| Figura 2.12: Diferentes tipos de carregamentos cíclicos – Fonte: Adaptado de Benahmed (2001)..... | 54 |
| Figura 2.13: Categorias de comportamento do material quando submetido a carregamentos cíclicos (Modificado de COLLINS <i>et al</i> , 1993; WERKMEISTER <i>et al</i> , 2005) | 55 |
| Figura 2.14: Exemplo de liquefação em ensaio triaxial cíclico não drenado (CASTRO, 1969)..... | 56 |
| Figura 2.15: Comportamento de uma areia sob cisalhamento torsional cíclico: (a) medianamente fofa e (b) densa (ISHIHARA, 1985) | 58 |
| Figura 2.16: Exemplo do efeito da densidade relativa na resistência cíclica de areias (Modificado de ISHIHARA, 1996) | 60 |
| Figura 2.17: Efeito da consolidação anisotrópica (K_0) na resposta cíclica de areias medianamente fofas (Modificado de ISHIHARA, 1996)..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.18: Efeito da pressão de confinamento nas tensões necessárias para gerar mobilidade cíclica com dupla amplitude de deformação 2,5% em 10 ciclos para quatro areias distintas: (a) tensão desvio máxima; (b) tensão desvio normalizada pela pressão de confinamento (Modificado de CASTRO E POULOS, 1977)..... | 61 |
| Figura 2.19: Efeito do índice de plasticidade na resposta cíclica em areias com presença de finos (Modificado de ISHIHARA, 1985) | 62 |
| Figura 2.20: Comportamento cíclico de uma areia compacta em função do critério de ruptura (amplitude da deformação torsional) (Modificado de ISHIHARA, 1985) | 63 |
| Figura 2.21 :Trajetórias de tensões efetivas para um elemento de solo levado à ruptura sob carregamento cíclico (Modificado de O'REILLY E BROWN, 1991)..... | 65 |
| Figura 2.22: Comportamento sob carregamento torsional, em condição monotônica e cíclica não uniforme (ALARCON-GUZMAN et al., 1988)..... | 65 |
| Figura 2.23: Comparação da relação de tensão versus o número de ciclos para liquefação inicial: curvas obtidas a partir de ensaios cíclicos de amostras reforçadas com vários materiais e não reforçadas (Modificado de UZDAVINES, 1987)..... | 67 |
| Figura 3.1: Localização do município de Osório dentro do Estado do Rio Grande do Sul (Fonte: Wikipedia)..... | 76 |
| Figura 3.2: Difratoograma de amostra de areia de Osório (MARCON, 2005) | 78 |
| Figura 3.3: Difratoograma da fração fina de amostra de areia de Osório (MARCON, 2005) ... | 78 |
| Figura 3.4: Distribuição granulométrica da areia de Osório (FESTUGATO, 2008) | 79 |
| Figura 3.5: Imagens da areia obtidas através de microscopia eletrônica de varredura: (a) 40x; (b) 400x; (c) 500x (DALLA ROSA, 2009)..... | 80 |
| Figura 3.6: Resultados de análises granulométricas conduzidas em areia de Osório..... | 81 |
| Figura 3.7: Localização do Departamento de Drôme, França (Fonte: Wikipedia) | 82 |
| Figura 3.8: Distribuição granulométrica da areia Hostun RF utilizada dentro do presente estudo..... | 83 |
| Figura 3.9: Imagens da areia Hostun RF obtidas através de microscopia eletrônica de varredura: (a) fotografia simples – presente estudo; (b) 300x; (c) 1000x (ALSHIBLI, 2013)..... | 84 |
| Figura 3.10: Fibras utilizadas antes de serem incorporadas à mistura | 85 |
| Figura 3.11: Procedimento para montagem de corpo de prova..... | 88 |
| Figura 3.12: Sequência de acionamento do <i>suction cap</i> para ensaios cíclicos..... | 92 |
| Figura 4.1: Esquema de disposição do sistema de controle de pressões e de força axial para carregamentos cíclicos | 94 |
| Figura 4.2: Equipamento triaxial usado para o presente estudo | 95 |
| Figura 4.3: Sistemas para aplicação de carga axial: (a) e (b) Estático e (c) cíclico. | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.4: Câmara triaxial de ensaio..... | 96 |
| Figura 4.5: Base e sobre base da câmara triaxial..... | 97 |
| Figura 4.6: Base e cabeçote para montagem do corpo de prova | 98 |
| Figura 4.7: Sistema de reação para aplicação de tensões desvio em condição de extensão..... | 98 |
| Figura 4.8: Sistema de fixação do cabeçote do corpo de prova tipo “ <i>suction cap</i> ”, e válvula para geração de sucção..... | 99 |
| Figura 4.9: Interface Água – Ar para controle da pressão..... | 100 |
| Figura 4.10: Painel com válvulas pneumáticas de ajuste proporcional..... | 100 |
| Figura 4.11: Modificação do procedimento para aplicação da pressão de confinamento em ensaios cíclicos..... | 101 |
| Figura 4.12: Transdutores para medição de pressões (Base e topo do corpo de prova)..... | 102 |
| Figura 4.13: Medidor externo de variação volumétrica | 103 |
| Figura 4.14: Sensores para medição de deslocamento: (a) Axial externo e (b) locais (axiais e radial)..... | 103 |
| Figura 4.15: Estrutura do programa de controle e aquisição de dados para o equipamento triaxial..... | 105 |
| Figura 4.16: Interface de usuário – Módulo de calibração e teste válvulas..... | 106 |
| Figura 4.17: Interface de usuário – Módulo de compressão isotrópica..... | 106 |
| Figura 4.18: Interface de usuário – Módulo de cisalhamento estático não drenado | 107 |
| Figura 4.19: Fluxograma do processo de controle das pressões de confinamento e contrapressão. | 107 |
| Figura 4.20: Conceptualização do processo de ajuste da tensão desvio durante procedimentos sob tensão controlada. | 108 |
| Figura 4.21: Pulso senoidal obtido, tensão desvio cíclica = ± 40 kPa..... | 108 |
| Figura 4.22: Pulso senoidal obtido, tensão desvio cíclica = ± 60 kPa..... | 109 |
| Figura 4.23: Pulso senoidal obtido, tensão desvio cíclica = ± 100 kPa..... | 109 |
| Figura 4.24: Geração de excesso de poropressão ao longo dos ensaios (BENAHMED, 2001) | 111 |
| Figura 4.25: Comportamento da deformação axial ao longo dos ensaios (BENAHMED, 2001) | 112 |
| Figura 4.26: Trajetórias de carregamento no plano p' vs. q para os ensaios de referência (BENAHMED, 2001) | 113 |
| Figura 4.27: Sobreposição da evolução da deformação axial para o ensaio TCRF 53 executado por Benahmed (2001) e o executado dentro do presente estudo. | 114 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.28: Sobreposição da evolução da excesso de poropressão para o ensaio TCRF 53 executado por Benahmed (2001) e o executado dentro do presente estudo. | 115 |
| Figura 4.29: Sobreposição das trajetórias de carregamento obtidas para o ensaio TCRF 53 executado por Benahmed (2001) e o executado dentro do presente estudo. | 116 |
| Figura 4.30: Variação do número máximo de ciclos (N_f) com a Razão de Tensão Cíclica (CSR) para os ensaios executados com areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)..... | 116 |
| Figura 4.31: Comparação dos resultados discutidos com os obtidos por Piffer (1992) <i>apud</i> Dupla (1995)..... | 117 |
| Figura 4.32: Comparação da evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado na areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)..... | 118 |
| Figura 4.33: Comparação da evolução das deformações permanentes com o número de ciclos normalizado na areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)..... | 119 |
| Figura 4.34: Comparação da degradação do módulo de elasticidade secante com o número de ciclos normalizado, na areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)..... | 120 |
| Figura 4.35: Comparação da evolução da poropressão residual com a dupla amplitude de deformação na areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)..... | 121 |
| Figura 4.36: Resultados obtidos em corpos de prova com $e = 0,63$, $p'_0 = 100$ kPa e tensão desvio cíclica = ± 60 kPa (sem fibras), para revisão de repetibilidade..... | 123 |
| Figura 4.37: Poropressão residual, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa..... | 123 |
| Figura 4.38: Poropressão residual com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa..... | 124 |
| Figura 4.39: Acumulo de deformações permanentes com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa..... | 124 |
| Figura 4.40: Geração de excessos de poropressão com o incremento na dupla amplitude de deformação, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa..... | 125 |
| Figura 4.41: Degradação do módulo de elasticidade secante com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa..... | 125 |
| Figura 4.42: Variação da energia dissipada por ciclo normalizada, com o incremento no parâmetro de poropressão, em ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa..... | 126 |
| Figura 4.43: Resultados obtidos em corpos de prova com $e = 0,63$, $p'_0 = 100$ kPa e tensão desvio cíclica = ± 80 kPa (sem fibras), para revisão de repetibilidade..... | 127 |
| Figura 4.44: Poropressão residual, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa..... | 127 |
| Figura 4.45: Poropressão residual com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa..... | 128 |
| Figura 4.46: Acumulo de deformações permanentes com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa..... | 128 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.47: Geração de excessos de poropressão com o incremento na dupla amplitude de deformação, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa..... | 129 |
| Figura 4.48: Degradação do módulo de elasticidade secante com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa | 129 |
| Figura 4.49: Variação da energia dissipada por ciclo normalizada, com o incremento no parâmetro de poropressão, em ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa | 130 |
| Figura 5.1: Representação gráfica da poropressão residual (Fonte: Presente estudo)..... | 132 |
| Figura 5.2: Representação gráfica da deformação permanente associada com um ciclo de carga..... | 133 |
| Figura 5.3: Representação da dupla amplitude de deformação considerada no ensaio (ASTM-D3999, 2011) | 133 |
| Figura 5.4: Ciclo típico de carga e definição do módulo de elasticidade secante | 134 |
| Figura 5.5: Comportamento de amostras de areia sob carregamento motonômico em condições drenadas e não drenadas ($e = 0,75$ – sem fibras) | 136 |
| Figura 5.6: Comportamento de areia sob carregamento motonômico em condições não drenadas ($e = 0,75$ – sem fibras) | 136 |
| Figura 5.7: Comportamento de amostras de areia sob carregamento motonômico em condições drenadas e não drenadas ($e = 0,75$ – 0,5% fibras) | 138 |
| Figura 5.8: Comportamento de areia sob carregamento motonômico em condições não drenadas ($e = 0,75$ – 0,5% de fibras) | 138 |
| Figura 5.9: Comportamento de amostras de areia sob carregamento motonômico em condições drenadas e não drenadas ($e = 0,63$ – sem fibras) | 139 |
| Figura 5.10: Comportamento de areia sob carregamento motonômico em condições não drenadas ($e = 0,63$ – sem fibras) | 140 |
| Figura 5.11: Comportamento de amostras de areia sob carregamento motonômico em condições drenadas e não drenadas ($e = 0,63$ – 0,5% fibras) | 141 |
| Figura 5.12: Comportamento de areia sob carregamento motonômico em condições não drenadas ($e = 0,63$ – 0,5% de fibras) | 142 |
| Figura 5.13: Envoltórias de resistência para as amostras avaliadas | 143 |
| Figura 5.14: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras) | 146 |
| Figura 5.15: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 146 |
| Figura 5.16: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras) | 147 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.17: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 147 |
| Figura 5.18: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 148 |
| Figura 5.19: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 149 |
| Figura 5.20: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 149 |
| Figura 5.21: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 150 |
| Figura 5.22: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 150 |
| Figura 5.23: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 150 |
| Figura 5.24: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 151 |
| Figura 5.25: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 151 |
| Figura 5.26: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 100$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 152 |
| Figura 5.27: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 100$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 152 |
| Figura 5.28: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 100$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 153 |
| Figura 5.29: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 100$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 154 |
| Figura 5.30: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 155 |
| Figura 5.31: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, | |

| | |
|---|-----|
| em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 155 |
| Figura 5.32: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras) | 156 |
| Figura 5.33: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 156 |
| Figura 5.34: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 120$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras) | 157 |
| Figura 5.35: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 120$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 157 |
| Figura 5.36: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 120$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras) | 158 |
| Figura 5.37: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 120$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 158 |
| Figura 5.38: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 160$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras) | 159 |
| Figura 5.39: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 160$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 159 |
| Figura 5.40: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 160$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras) | 160 |
| Figura 5.41: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 160$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 160 |
| Figura 5.42: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 20$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras) | 161 |
| Figura 5.43: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 20$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 161 |
| Figura 5.44: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 20$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras) | 162 |
| Figura 5.45: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de | |

| | |
|--|-----|
| ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 20$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 162 |
| Figura 5.46: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 163 |
| Figura 5.47: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 164 |
| Figura 5.48: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 164 |
| Figura 5.49: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 164 |
| Figura 5.50: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 165 |
| Figura 5.51: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 166 |
| Figura 5.52: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 166 |
| Figura 5.53: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 167 |
| Figura 5.54: Geração de deformações permanentes ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 167 |
| Figura 5.55: Geração de deformações permanentes ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 200$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 168 |
| Figura 5.56: Geração de deformações permanentes ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 169 |
| Figura 5.57: Dupla amplitude de deformação exibida ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 170 |
| Figura 5.58: Dupla amplitude de deformação exibida ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 200$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 170 |
| Figura 5.59: Dupla amplitude de deformação exibida ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 171 |
| Figura 5.60: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o número normalizado de ciclos em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)..... | 172 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.61: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o número normalizado de ciclos em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 172 |
| Figura 5.62: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o número normalizado de ciclos em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 200$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 173 |
| Figura 5.63: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o incremento na dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ e 200 kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 174 |
| Figura 5.64: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o incremento na dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 175 |
| Figura 5.65: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o incremento na dupla amplitude de deformação (normalizada) em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ e 200 kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 175 |
| Figura 5.66: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o incremento na dupla amplitude de deformação (normalizada) em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 176 |
| Figura 5.67: Normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ e 200 kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 177 |
| Figura 5.68: Normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 177 |
| Figura 5.69: Representação bilogarítmica da normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ e 200 kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 178 |
| Figura 5.70: Representação bilogarítmica da normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras) | 178 |
| Figura 5.71: Representação bilogarítmica da normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação normalizada em todas as amostras estudadas | 179 |
| Figura 5.72: Variação do número máximo de ciclos (N_f) com a Razão de Tensão Cíclica (CSR) para cada tipo de condição de dosagem e compactação avaliada..... | 180 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 2.1. Propriedades de algumas fibras naturais (PCA, 1991) | 34 |
| Quadro 3.1. Misturas e dosagens avaliadas | 74 |
| Quadro 3.2. Programa de ensaios triaxiais CID e CIU monotônicos | 75 |
| Quadro 3.3. Programa de ensaios triaxiais CIU cíclicos | 75 |
| Quadro 3.4. Análise da fração grosseira dos minerais – Areia de Osório (SPINELLI, 1999) | 77 |
| Quadro 3.5. Análise físico - química da areia de Osório (SPINELLI, 1999)..... | 77 |
| Quadro 3.6. Índices físicos da areia de Osório empregada nos ensaios. | 79 |
| Quadro 3.7. Índices físicos da areia de Osório obtidos por diferentes autores..... | 81 |
| Quadro 3.8. Composição química da arena Hostun RF (FLAVIGNY et al., 1990)..... | 83 |
| Quadro 3.9. Índices físicos da areia Hostun RF empregada nos ensaios de validação | 84 |
| Quadro 3.10. Propriedades físicas e mecânicas das fibras empregada nos ensaios (FESTUGATO, 2011) | 86 |
| Quadro 3.11. Condições de compactação definidas para as diferentes misturas avaliadas..... | 86 |
| Quadro 4.1. Fatores constantes na execução dos ensaios de referência (adaptado de Benahmed (2001)) | 110 |
| Quadro 4.2. Parâmetros de ensaio executados no trabalho de referência (BENAHMED, 2001) | 110 |
| Quadro 4.3. Comparação dos resultados obtidos em termos do número máximo de ciclos para os ensaios executados e os de referência | 115 |
| Quadro 5.6. Condições de moldagem e ensaio para ensaios de repetibilidade | 122 |
| Quadro 4.5. Número máximo de ciclos alcançados em amostras com iguais condições de moldagem e ensaio ($\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa)..... | 122 |
| Quadro 4.6. Número máximo de ciclos alcançados em amostras com iguais condições de moldagem e ensaio ($\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa)..... | 126 |
| Quadro 5.1. Condições de dosagem e moldagem dos corpos de prova estudados, e tipos de condições de ensaio consideradas | 135 |
| Quadro 5.2. Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para as mostras avaliadas .. | 142 |
| Quadro 5.3. Resumo dos ensaios triaxiais cíclicos executados | 144 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------------------|---|
| E: | Módulo de elasticidade secante. |
| E_0 : | Módulo de elasticidade secante no primeiro ciclo de carga. |
| CSR: | Razão de tensão cíclica (<i>Cyclic Stress Ratio</i>). |
| e: | Índice de vazios. |
| N: | Número de ciclos aplicados no corpo de prova em qualquer momento. |
| N_f : | Número máximo de ciclos aplicados no corpo de prova para atingir ruptura. |
| p' : | Invariante de tensão efetiva média normal. |
| q: | Tensão desvio. |
| ru : | Parâmetro de poropressão ou poropressão normalizada. |
| Δu : | Excesso de poropressão gerada durante a fase de cisalhamento. |
| ϵ_a : | Deformação axial. |
| $\epsilon_{a \text{ inicial}}$: | Deformação axial máxima no primeiro ciclo de carga. |
| ϵ_r : | Deformação radial. |
| σ_c : | Tensão cíclica pico em compressão. |
| σ_e : | Tensão cíclica pico em extensão. |
| σ'_0 : | Tensão efetiva no início da fase de cisalhamento. |
| σ'_1 : | Tensão efetiva axial. |
| $\sigma'_{2,3}$: | Tensão efetiva radial. |
| $\pm\sigma_{dc}$: | Amplitude da tensão desvio cíclica média. |

1. INTRODUÇÃO

A pressão econômica por desenvolver regiões tem feito com que algumas áreas, que há alguns anos eram consideradas como de ocupação inviável em termos técnicos, sejam hoje o foco de múltiplos esforços para se obter soluções, que além de garantir condições seguras de ocupação, sejam compatíveis com as solicitações que os novos empreendimentos exigem.

Neste sentido, o melhoramento de solos tem aberto a porta ao aproveitamento dos solos locais, diminuindo a necessidade de substituições de materiais ou da execução de projetos de fundações que requerem condições e tecnologias complexas, permitindo a sua adequação às técnicas e condições da prática local.

Uma técnica que vem evoluindo com resultados bastante interessantes no contexto internacional é o reforço in situ de solos com fibras geossintéticas, motivando pesquisas em países como: Arabia Saudita (AL-REFEAI; AL-SUHAIBANI, 1998), Brasil (COELHO, 2008), Canadá (UZDAVINES, 1987; NOORANY; UZDAVINES, 1989), China (QIU; ZHANG, 2014), Estados Unidos (MAHER; WOODS, 1990; SHEWBRIDGE; SOUSA, 1991; LI; DING, 2002), Índia (KRISHNASWAMY; THOMAS ISAAC, 1994; MAHESHWARI et al., 2012; MITTAL; CHAUHAN, 2013), Inglaterra (DIAMBRA, 2010; DIAMBRA et al., 2010, 2013; IBRAIM et al., 2010; DIAMBRA; IBRAIM, 2015), e Irão (GHIASSIAN et al., 2008; GHIASSIAN; GHAZI, 2009; NOORZAD; FARDAD AMINI, 2014).

Atenção especial é dada à experiência acumulada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGEC-UFRGS (CONSOLI et al., 1998, 2004, 2007a, 2009, 2010, 2011, 2013; FEUERHARMEL, 2000; SPECHT, 2000; CASAGRANDE, 2001, 2005; HOMEM, 2002; HEINECK et al., 2003; VENDRUSCOLO, 2003; SANTOS, 2004; CASAGRANDE et al., 2006; DONATO, 2007; FESTUGATO, 2008, 2011, GIRARDELLO, 2010, 2014, FESTUGATO et al., 2013, 2015).

Os trabalhos acima mencionados têm se centrado no comportamento de misturas solo-fibra e solo - cimento – fibra, tanto através de estudos em laboratório como em campo, buscando desde a compreensão dos mecanismos presentes neste tipo de materiais, até a definição de procedimentos para dosagem dos materiais em função de parâmetros de comportamento mecânico.

No contexto internacional, existem diversos estudos em que foram determinados os parâmetros de comportamento mecânico de solos reforçados com fibras (GRAY; OHASHI, 1983; GRAY; AL-REFEAI, 1986; MAHER; WOODS, 1990; MAHER; HO, 1993; DIAMBRA, 2010), existindo consenso para a maioria das afirmações coletadas.

O conjunto da informação obtida através dos trabalhos mencionados vem permitindo, além da comprovação sobre a eficácia da técnica, fornecer parâmetros que possam ser integrados aos procedimentos de cálculo de diferentes aplicações na Geotecnia. O efeito notório no incremento na ductilidade dos materiais reforçados tem permitido considerar possibilidades de aplicação em áreas diversas, passando pelo reforço para construção de fundações, até casos em que as grandes deformações decorrentes de mecanismos de adensamento ou de decomposição de matéria orgânica impedem a implantação de novos empreendimentos em tempos razoáveis.

A informação obtida das anteriores pesquisas tem comprovado a eficácia da técnica sob a perspectiva mecânica, porém muitos dos trabalhos ainda estão restritos às condições estáticas de carregamento, válidas para a maioria das soluções diariamente estudadas na engenharia civil.

No entanto, a execução de obras em condições não necessariamente estáticas, como é o caso de rodovias, plataformas *offshore*, construções sob ação do impacto das ondas, marés ou do vento, regiões com incidência de sismos, construções industriais possuindo equipamentos fontes de vibração, etc., tem obrigado a aprimorar os métodos de análise e dimensionamento de estruturas, ao considerar efeitos decorrentes da repetição de efeitos, ainda que a maioria destes aconteça abaixo da resistência máxima do solo.

A visualização de alguns dos fenômenos descritos acima, na forma de liquefação e mobilidade cíclica, degradação da rigidez, acúmulo de deformações permanentes, é possível apenas em condições cíclicas de execução de ensaios. A possibilidade de melhorar o desempenho dos solos de fundação, ou de criar novos materiais a partir dos solos existentes ou de empréstimo, e que com o auxílio das fibras possam garantir melhores condições de resposta a carregamentos cíclicos, é uma questão que tem suscitado diversas pesquisas e que infelizmente o meio técnico-científico internacional pouco tem produzido a respeito. Este tipo de pesquisa, além de fornecer informação para a investigação do conjunto de solicitações cíclicas, permitirá levar o estudo dos solos com adição de fibras a um nível de conhecimento de maior abrangência e detalhe.

Surge então, partindo de diversos estudos desenvolvidos neste campo, a necessidade de identificar se a incorporação de fibras dentro de uma matriz de solo arenoso pode ou não melhorar o comportamento de um solo quando submetido a carregamentos cíclicos. Partindo

da informação obtida principalmente como resultado de processos de caracterização sob condições monotônicas, acredita-se que a tendência de comportamento seja mantida para condições cíclicas.

1.1. OBJETIVOS

Como objetivo geral, o presente trabalho busca fornecer subsídios para o estudo do comportamento cíclico de areia reforçadas com fibras aleatoriamente distribuídas, objetivando-se no caso de materiais compactos e medianamente compactos.

Para alcançar este objetivo, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) complementar um equipamento triaxial e implementar um procedimento para execução de ensaios triaxiais cíclicos sob tensão controlada, tanto no referente aos elementos mecânicos necessários quanto à rotina de controle e automatização do ensaio;
- b) aprofundar na caracterização dos materiais estudados a partir da execução de ensaios, tanto monotônicos drenados como não drenados, assim como cíclicos não drenados;
- c) determinar experimentalmente o efeito da adição de fibras em diferentes parâmetros de comportamento (deformabilidade, rigidez, acúmulo de poropressões) de uma única areia;
- d) validar o funcionamento do equipamento a partir da execução de ensaios triaxiais cíclicos não drenados em um material de referência previamente caracterizado em outros estudos;
- e) comparar as tendências obtidas pelos resultados com as obtidas em trabalhos anteriores, dando ênfase aos que avaliam estes mesmos tipos de materiais;
- f) determinar os mecanismos de falha que dominam o comportamento em solos compactos, e estabelecer diferenças com a mesma situação em solos medianamente compactos.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

Com o intuito de facilitar a compreensão do estudo, o documento é dividido em seis capítulos, incluindo sua introdução.

É feita, no Capítulo 2, uma revisão da literatura existente considerada de maior relevância, tentando fornecer alguns elementos conceituais sobre o comportamento da areias sob condições cíclicas de carregamento, assim como alguns dos estudos mais relevantes em solos reforçados com fibras.

No Capítulo 3 é feita uma descrição da metodologia adotada para a execução do programa experimental, definição das propriedades dos materiais empregados e informações relevantes sobre os procedimentos de ensaio.

A implementação do equipamento para execução de ensaios triaxiais cíclicos é apresentada no Capítulo 4, definindo os principais elementos físicos existentes assim como as adaptações realizadas. A metodologia, resultados e discussão do processo de validação do equipamento e repetibilidade de ensaios são apresentadas na parte final do capítulo.

Os resultados dos ensaios são apresentados e discutidos ao longo do Capítulo 5. A apresentação dos ensaios e suas análises são feitas de forma separada, começando com os ensaios estáticos e finalizando com os cíclicos.

As considerações finais sobre os dados obtidos no estudo, assim como as sugestões para trabalhos futuros são feitas no Capítulo 6.

Finalmente, dentro dos Apêndices são apresentados os resultados dos ensaios executados ao longo do presente estudo, começando pelos ensaios executados no material de referência para validação, seguindo pelos ensaios cíclicos objeto do presente estudo, e terminando com as curvas e constantes de calibração determinadas ao longo do processo e aplicadas nos ensaios.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo do presente capítulo são apresentados os aspectos julgados mais relevantes na literatura sobre o emprego de fibras no melhoramento de solos. São feitas algumas anotações sobre a história da utilização das fibras em solos.

Nesta sequência, é feita uma breve apresentação dos principais elementos referentes ao efeito da cimentação em solos.

Depois é feita uma revisão sobre o efeito das fibras no melhoramento de solos, as definições principais e mecanismos de interação entre solo e fibra.

É feita a introdução à área de carregamentos cíclicos, começando pelas definições e aplicações destes tipos de carregamentos. É feita a apresentação das técnicas laboratoriais mais frequentes para a determinação de parâmetros dinâmicos em solos, seguida de uma série de fatores a serem considerados para a execução de ensaios triaxiais cíclicos, ensaio central dentro do presente estudo.

Seguindo a sequência, é feita a apresentação sobre os principais elementos que descrevem o comportamento das áreas sob carregamentos cíclicos, tanto no que diz aos mecanismos de ruptura, quando aos principais fatores que definem a resistência para um mesmo material, e sua relação entre este tipo de carregamentos com os de tipo monotônico.

Finalmente é feita uma revisão sobre algumas das principais propriedades determinadas através de ensaios cíclicos para solos reforçados com fibras.

2.1. O EMPREGO DE FIBRAS COMO REFORÇO DE SOLOS

As técnicas para melhoramento dos solos, tanto no que diz das suas propriedades físicas como no seu comportamento mecânico, têm evoluído juntamente com os entornos dos homens sedentários. Como apontado por Van Impe (1989), embora o melhoramento do solo seja apontado como sendo uma, se não a mais antiga das técnicas, sua aplicação continua até hoje criando muitos interrogantes dentro dos métodos executivos da engenharia civil.

O reforço de solos com fibras naturais de bambu e junco já era empregado pelos chineses há mais de 3000 anos. Outras técnicas de melhoramento foram empregadas na Mesopotâmia para a construção de estruturas como as muralhas de Ziggurat e a torre de Agar Quf (1400 A. C.), consistentes em camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Têm sido encontrados

vestígios do emprego de processos de melhoramento na construção de algumas partes de grande muralha da China e em alguns caminhos construídos durante o império Inca no Perú, neste último caso consistentes no emprego de lã de lhama como material de reforço (PALMEIRA, 1992). São também conhecidas algumas aplicações de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles antes da construção de aterros no interior do Brasil e em outros países.

O Departamento de Estradas da Carolina do Sul, nos Estados Unidos, empregou em 1926 mantas de algodão como reforço de camadas asfálticas em pavimentos. Na França, a técnica denominada “terra armada”, patenteada por Henri Vidal (1969) abriu o caminho para os solos reforçados, onde o reforço consistia em tiras metálicas inseridas dentro da massa de solo, conectadas a painéis de concreto cuja finalidade é delimitar e proteger a face do muro, neste caso composto principalmente por um maciço de solo.

O estudo do reforço de solos com fibras vem sendo estudado, da maneira atual, há pouco mais de três décadas. Os primeiros trabalhos sobre o assunto se enfocavam no efeito de inclusões aleatoriamente distribuídas dentro da massa de solo, tentando avaliar o efeito na resistência ao cisalhamento pela inclusão de fibras naturais, metálicas e plásticas, além de propor curvas que relacionavam o efeito da orientação inicial das fibras com relação ao plano de cisalhamento (GRAY; OHASHI, 1983).

Entende-se por melhoria ou reforço de solos à utilização de processos físicos ou químicos que busquem o melhoramento das propriedades mecânicas deste. Procura-se usualmente, o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes (CASAGRANDE, 2005).

O estudo desta técnica tem gerado um interesse crescente dentro da tecnologia dos materiais, em aplicações que não se limitam apenas à sua inclusão para melhoramento de solos para fundações, mas também ao reforço de estruturas em concreto, e ao melhoramento de camadas para estruturas de pavimentos. A inclusão dos materiais compósitos dentro da literatura própria da engenharia dos materiais vem aumentando com níveis de detalhamento crescentes (TAYLOR, 1994; HOLLAWAY; HEAD, 2001; BUDINSKI; BUDINSKI, 2010; DOMONE; ILLSTON, 2010).

Vários autores têm classificado os geossintéticos atualmente disponíveis no mercado (BATHURST, ; PALMEIRA, 1995). A Associação Brasileira de Geossintéticos os classifica

em Geotêxtis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompostos, geocompostos argilosos, geotubos, geocélulas e geoexpandido.

No estudo do melhoramento de solos para fins de engenharia, dentro do conjunto de técnicas reconhecidas pela prática internacional, o emprego de fibrossolo, geocompostos avaliado dentro do presente estudo, vem ganhando visibilidade dentro do conjunto de solos reforçados (MITCHELL, 1981; TERASHI; JURAN, 2000; CONSOLI et al., 2005, 2007b, 2007c).

Palmeira (1992, 1995) define o fibrossolo como sendo a mistura de solos e fibras sintéticas para utilização em pavimentos (SPECHT, 2000; HOMEM, 2002) e aterros de estruturas de contenção. Estudos mais recentes têm sido feitos visando tanto a sua caracterização quanto sua aplicação em fundações (CASAGRANDE, 2001, 2005, FESTUGATO, 2008, 2011, GIRARDELLO, 2010, 2014).

2.2. MATERIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS

Embora exista uma grande quantidade de informação sobre os materiais foco do presente estudo, a maioria desta é apresentada ou de forma separada para cada componente, ou para alguns tipos de misturas. A literatura teórica consultada para o presente estudo fornece fundamentação para compósitos cimentados reforçados com fibras, em razão do forte emprego deste material na elaboração de argamassas e concretos. A informação compilada sobre misturas solo – fibra provêm principalmente de estudos experimentais.

Alguns autores concordam em afirmar que o maior potencial dos materiais compósitos fibrosos se encontra no estado pós-fissuração, onde as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, aumentando assim a sua capacidade de absorção de energia (MCGOWN et al., 1978; PCA, 1991; DOMONE; ILLSTON, 2010). Sobre o anterior, Domone e Illston (2010) sugerem que um teor de fibra acima de 5% (em volume), permitiria obter resposta da fibra para pequenas deformações do material, controlando assim a rigidez e fissuração do compósito. Estes autores reconhecem também que o emprego de teores tão elevados de fibra corresponde com uma prática muito pouco comum.

Desta forma, os teores de fibra normalmente usados não impedem a formação de fissuras no compósito (RAWLING et al., 2002), porém conseguem aumentar a resistência à tração pelo controle da propagação das fissuras (TAYLOR, 1994; FESTUGATO, 2011). Domone e Illston (2010) apontam ao incremento na ductilidade no estado pós-fissuração decorrente do aporte das fibras ao longo das fissuras formadas, assim como também a incrementos na resistência.

Domone e Illston (2010) elencam três tipos de ligações existentes nos compósitos cimentados reforçados com fibras:

- a) elástica: corresponde à aderência entre as fibras e a matriz;
- b) de atrito: o atrito existente entre as fibras e a matriz confere resistência ao arrancamento;
- c) mecânica: as deformações geradas intencionalmente às fibras ao longo do seu comprimento, permitem criar interligação entre elas e a matriz. Isto pode ser chamado também de “ligação de atrito melhorada”.

Segundo Johnston (1994), as fibras em uma matriz cimentada podem em geral ter dois efeitos importantes. Primeiro, tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, tração indireta, flexão, e cisalhamento; e secundariamente, melhoram a ductilidade e tenacidade de uma matriz com características frágeis.

Higgins (1994) classifica os materiais compósitos em dois grandes grupos: os materiais compósitos particulados, quando é adicionado à matriz algum material em forma de partícula, e os materiais compósitos fibrosos, aos quais será feito ênfase no presente estudo, pois as fibras atuam controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras, distribuindo as tensões dentro da matriz de forma um pouco mais homogênea.

Os principais fatores relacionados ao desempenho dos materiais compósitos cimentados reforçados com fibras são apresentados por Taylor (1994), assumindo que as variações das propriedades descritas abaixo são atingidas independentemente:

- a) teor de fibra: um alto teor de fibra confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura;
- b) módulo de elasticidade da fibra: quanto maior o módulo de elasticidade, maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras;
- c) aderência entre a fibra e a matriz: as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito;

- d) resistência da fibra: aumentando a resistência das fibras, aumenta também, a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz

À anterior lista, Hollaway (2001) assim como Domone e Illston (2010), acrescentam:

- a) orientação: a qual pode determinar que o compósito possua propriedades mecânicas desde anisotrópicas (orientação unidirecional ou bidirecional para as fibras) até quase isotrópicas (distribuição aleatória);
- b) geometria da fibra (diâmetro e comprimento).

Na Figura 2.1 são ilustradas as forças que atuam sobre uma fibra descontínua dentro de um compósito quando submetido a um carregamento uniforme de tração. Segundo Domone e Illston (2010), a eficiência da fibra para conferir rigidez e para reforçar o compósito diminui quando o seu comprimento também diminui. A partir de um certo comprimento, a fibra não conseguirá mobilizar a totalidade da sua resistência mecânica, chamado de comprimento crítico (L_c).

Taylor (1994) propõe a Equação 2.1 para estabelecer o equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, seguindo o modelo apresentado na Figura 2.2.

$$\frac{\pi * d^2}{4} * F_t = \pi * d * \frac{l}{2} * F_a \quad \text{Equação 2.1}$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2 * F_a} \quad \text{Equação 2.2}$$

Segundo o anterior, vê-se a importância não apenas do comprimento da fibra, mas também de seu diâmetro. A relação l/d (comprimento/diâmetro), chamada de índice de aspecto ou fator de forma, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência de aderência fibra/matriz (F_a). Quando a fibra possui uma alta resistência à tração, como no caso da fibra de aço, será necessário que, ou a resistência de aderência deverá suficientemente alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja completamente mobilizada, ou terão de ser utilizadas fibras com uma alta relação l/d .

Considerando o compósito antes do surgimento de fissuras como apresentado na Figura 2.1, pode-se expressar a carga total segundo a Equação 2.3:

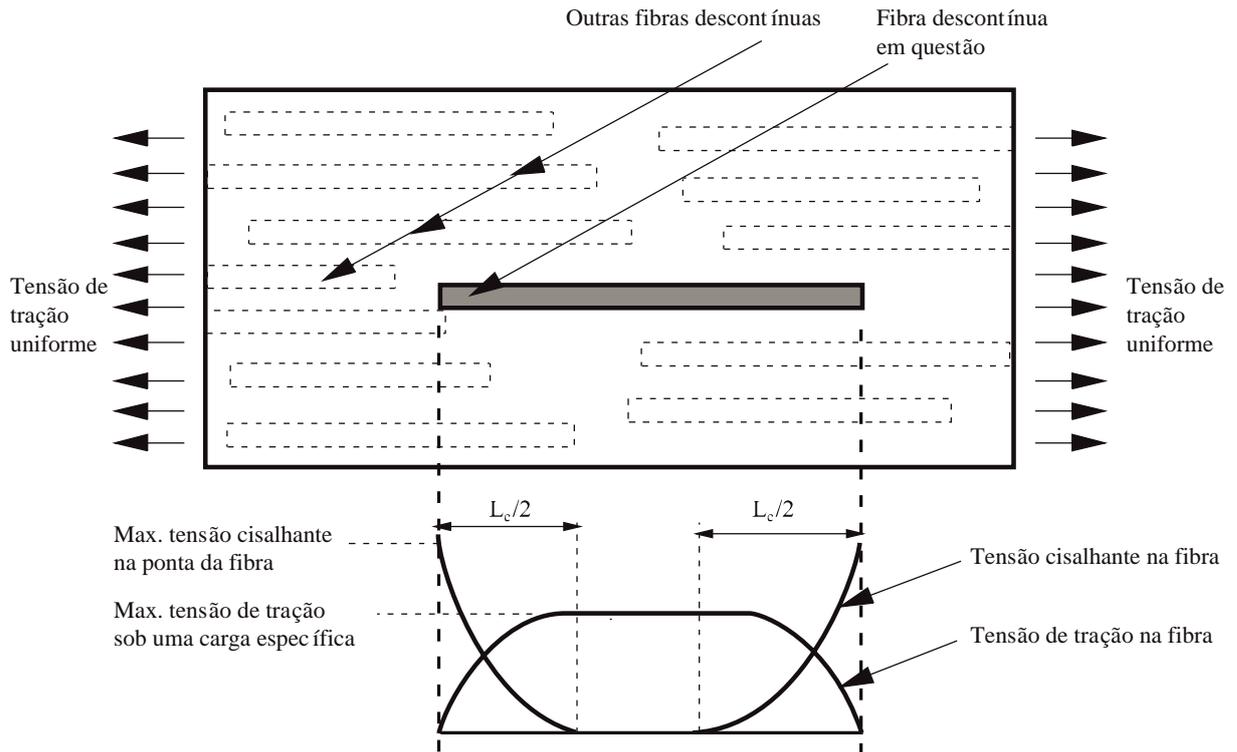


Figura 2.1: Representação esquemática de matriz com fibras descontínuas submetidas a carregamento axial (adaptado de Domone e Ilston (2010))

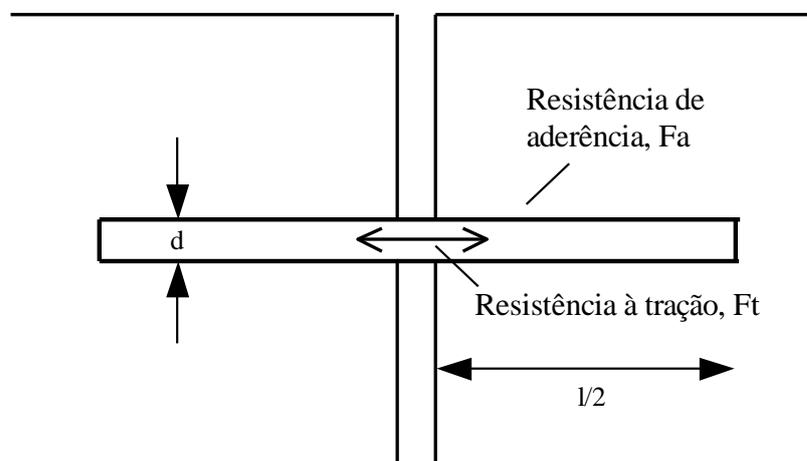


Figura 2.2: Disposição fibra/fissura idealizada (TAYLOR, 1994; FESTUGATO, 2011)

$$P_c = P_m + P_f$$

Equação 2.3

Onde: P_c : carga total aplicada ao compósito;

P_m : parcela da carga assumida pela matriz;

P_f : parcela da carga assumida pela fibra.

Em termos de tensões, o anterior pode ser representado da seguinte maneira:

$$\sigma_c * A_c = \sigma_m * A_m + \sigma_f * A_f \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde: A_c : área total transversal do compósito;

A_m : área transversal correspondente à matriz;

A_f : área transversal correspondente às fibras.

Considerando um valor para A_c de maneira que, quando multiplicado pelo comprimento do compósito seja obtido um volume unitário (1.0), é possível expressar a anterior equação da seguinte maneira:

$$\sigma_c = \sigma_m * V_m + \sigma_f * V_f \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde: V_m : volume ocupado pela matriz;

V_f : volume ocupado pelas fibras.

Considerando uma seção homogênea (sem presença de fissuras), e ligação perfeita entre matriz e fibras, pode-se afirmar que:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde: ε_c : deformação no compósito;

ε_m : deformação na matriz;

ε_f : deformação nas fibras;

Ao introduzir estes valores na Equação 2.5, obtém-se:

$$\sigma_c * \varepsilon_c = \sigma_m * \varepsilon_m * V_m + \sigma_f * \varepsilon_f * V_f$$

$$E_c = E_m * V_m + E_f * V_f \quad \text{Equação 2.7}$$

Esta equação considera uma orientação homogêneas das fibras, sendo estas paralelas ao carregamento. Para considerar o efeito da orientação das fibras, pode-se considerar um fator de distribuição η , deixando a Equação 2.7 da seguinte forma:

$$E_c = E_m * V_m + \eta * E_f * V_f \quad \text{Equação 2.8}$$

Krenchel (1964) determinou valores para o fator η considerando diferentes padrões de orientação das fibras:

a) arranjo com orientação aleatória = 0,375;

- b) fibras em posição unidirecional ensaiadas paralelas à direção da aplicação da carga = 1,0;
- c) fibras em posição unidirecional ensaiadas perpendicular à direção de aplicação da carga = 0;
- d) arranjo bidirecional = 0,5.

2.2.1. Tipos de fibras utilizadas como elementos de reforço

Existe uma grande variedade de fibras utilizadas em compósitos fibrosos. As características de comportamento de cada uma delas, as propriedades físicas, químicas e mecânicas, que por sua vez irão afetar o comportamento do material compósito, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação (CASAGRANDE, 2005).

Assim, a compreensão do mecanismo de interação matriz – reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Essa definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante (FEUERHARMEL, 2000).

De acordo com a sua origem, as fibras podem ser classificadas como naturais, quando se apresentam na natureza com esse formato; e em artificiais ou “feitas pelo homem” quando, o formato em que são usadas não existe na natureza (ARAÚJO, 2011).

2.2.1.1. Fibras naturais

Foram os primeiros tipos de fibras a serem empregados pelo homem. Algumas fibras naturais tradicionais, tais como o algodão, lã ou seda, possuem resistências da ordem de 0,1 a 0,4 N/tex e módulos que variam entre 2 e 5 N/tex. No entanto, fibras como o linho, cânhamo, juta e rami podem apresentar resistências e rigidezes maiores. Com exceção da seda, a maioria dos materiais correspondem a fibras curtas, o que diminui a eficiência da rigidez do material quando convertido em fios ou tecidos (ARAÚJO, 2011).

PCA (1991) apresenta algumas propriedades mecânicas para várias fibras naturais (ver Quadro 2.1).

Domone e Illston (2010) resumizam os principais fatores que diminuem o atrativo destes materiais para serem empregados em aplicações de engenharia civil:

- a) propriedades de resistência inferiores, particularmente a resistência ao impacto;
- b) heterogeneidade na qualidade;
- c) material hidrófilo (gera absorção de água);
- d) restrição em quanto as máximas temperaturas de processo;
- e) baixa durabilidade;
- f) pouca resistência ao fogo;
- g) instabilidade dimensional.

Quadro 2.1. Propriedades de algumas fibras naturais (PCA, 1991)

| Fibra | Peso específico | Resistência à tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Deformação em ruptura (%) |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Celulose | 1,5 | 300 - 900 | 10 - 40 | N/A |
| Sisal | N/A | 280 - 560 | 13 - 26 | 3 - 5 |
| Coco | 1,12 - 1,15 | 120 - 200 | 19 - 26 | 10 - 25 |
| Bambú | 1,5 | 350 - 500 | 33 - 40 | N/A |
| Juta | 1,02 - 1,04 | 250 - 350 | 26 - 32 | 1,5 - 1,9 |
| Akwara | 0,96 | N/A | 1,9 - 3,2 | N/A |
| Capim elefante | N/A | 180 | 4,9 | 3,6 |

Segundo Teodoro (1999), a exposição das fibras vegetais em ambientes alcalinos causa sua rápida degradação, como é o caso por exemplo, do emprego das fibras vegetais como reforço de materiais cimentados com cimento Portland.

Como parte do processo de diversificação dos geocompostos, vem se encontrando aplicações para estes materiais, principalmente em obras temporárias, em que se deseja a biodegradação após pouco tempo da conclusão da obra (DOMONE; ILLSTON, 2010).

2.2.1.2. Fibras poliméricas

A família das fibras poliméricas talvez seja a mais promissória para ser empregada como reforço de solos. Os polímeros, de acordo com sua estrutura química, apresentam diferentes

denominações e comportamentos, dando origem a diferentes tipos de fibras (FEUERHARMEL, 2000).

Atualmente vários formatos de fibras polimérica têm sido empregados como reforço de solos. Existem as chamadas fibriladas, que são fibras que apresentam um formato trançado quando esticadas transversalmente, projetadas para que se “abram” durante o processo de mistura com o solo (FESTUGATO, 2011).

Alguns dos tipos de fibras mais conhecidos são descritos a seguir:

- a) fibras de nylon: este tipo de material, produzido pela primeira vez em 1935 por Carothers de DuPont, mas comercializados como fibra e com o nome Nylon só até 1939 (ARAÚJO, 2011). O nylon oferece boas propriedades mecânicas e térmicas, pode ser usado como única fibra ou misturado com outros tipos, tendo como maiores aportes a resistência e a resistência à abrasão;
- b) fibras de poliéster: existe uma variedade de poliéster, no entanto o mais comum é o Polietileno Tereftalato (PET), de uso comum na indústria de produção de recipientes para produtos alimentícios. As fibras produzidas com este material possuem alta tenacidade, alto módulo de elasticidade, baixa capacidade de absorção de água (ARAÚJO, 2011). O aspecto das fibras é bastante similar às de polipropileno, podendo ser utilizadas para as mesmas aplicações (TAYLOR, 1994; FESTUGATO, 2011). Estas fibras não são estáveis nos ambientes com alto pH, comuns da maioria das matrizes cimentadas (DOMONE; ILLSTON, 2010);
- c) fibras de polipropileno: é um polímero termoplástico extremamente versátil como formador de fibras. É amplamente utilizado em vários setores da indústria, desde a produção de recipientes, peças automotivas, material de escritório, e claro, na produção de fibras, entre outros. Algumas das principais propriedades das fibras de polipropileno são: alta resistência ao ataque químico e biológico; baixa absorção de umidade; alta resistência à ação dos raios solares (ARAÚJO, 2011). Algumas das desvantagens apontadas por PCA (1991) são: pouca ligação química com a matriz no caso de misturas com adição de cimento, baixo ponto de derretimento (165 °C), o fato de ser um material combustível ter um baixo módulo de elasticidade (um dos menores entre as fibras) (em torno de 3,4 GPa), e uma resistência à tração em torno de 600 MPa.

- d) fibras de polietileno: possuem módulo de elasticidade baixo, fraca adesão à matriz cimentada e alta resistência aos álcalis. Sua durabilidade é alta, mas apresentam maiores deformações de fluência, o que significa que, quando utilizadas para suportar tensões altas permanentes em um compósito fissurado, podem ocorrer elongações e deflexões consideráveis ao longo do tempo. Procurando minimizar o problema da baixa aderência e módulo, tem sido desenvolvido o polietileno de alta densidade (HANNANT, 1994; FESTUGATO, 2011).
- e) fibras de aramida: são fibras fortemente orientadas compostas por poliamidas aromáticas, resistentes a altas temperaturas e cargas. Pelas suas propriedades são usadas em aplicações que exigem resistência a altas temperaturas. Outra categoria dentro do grupo das fibras de poliamida são as para-aramidas, como o Kevlar, possuindo altos valores do módulo de elasticidade e resistência à tração, assim como uma baixa deformação até ruptura. Este tipo de fibras é utilizado em aplicações que requerem forte absorção de energia, como sistemas de blindagem e reforço de materiais compósitos (ARAÚJO, 2011). Existem dois tipos de Kevlar, o Kevlar 29, cuja resistência mecânica é da ordem de 2750 Mpa e o módulo de elasticidade médio é de 83 GPa; e o segundo tipo, o Kevlar 49, cuja resistência é ligeiramente maior, mas com um módulo de elasticidade de 125 GPa (DOMONE; ILLSTON, 2010).

2.2.1.3. Fibras minerais

São descritos alguns tipos de fibras minerais. Não são considerados os nano-tubos por não terem, ainda, uma aplicação dentro da área da engenharia geotécnica:

- a) fibras de carbono: inicialmente as aplicações estavam limitadas à produção de compósitos poliméricos de alta resistência. Com a diminuição progressiva nos custos, têm sido utilizadas em reforço de estruturas de concreto. Possuem alta rigidez e resistência, além de serem inertes quando expostas a muitos agentes químicos, obtendo-se um bom funcionamento no meio alcalino existente em matrizes cimentadas. Uma única fibra pode estar formada por aproximadamente 1000 filamentos, cada um dos quais possui um diâmetro que varia entre 7 e 15 μm . Os tipos de fibras mais utilizados possuem resistência à tração típica de 600

MPa e módulo de elasticidade típico de 30 GPa (PCA, 1991; DOMONE; ILLSTON, 2010)

b) fibras de vidro: existem vários tipos de fibras de vidro, sendo do tipo “E” as de uso mais comum, com módulo de elasticidade na ordem 70 GPa e resistência à tração 1500 MPa (DOMONE; ILLSTON, 2010). Normalmente são fornecidas em bobinas de até 64 fios, cada um composto por aproximadamente 200 filamentos de 14 μm . São oferecidas em bobinas contínuas ou cortadas em comprimentos que variam entre 10 – 40 mm. Hollaway e Head (2001) listam vários tipos de fibras de vidro, os quais são apresentados a seguir:

- tipo E: possuem baixo teor de álcalis (na ordem de 2%). São utilizadas para aplicações gerais, sendo as principais as aplicações estruturais. São as mais empregadas na indústria da construção,
- tipo S: é a de maior resistência e rigidez, também possui a maior resistência à corrosão quando comparada com as fibras tipo E. Um tipo especial destas fibras é a S-2, a qual apresenta boa resistência à ação de substâncias ácidas,
- tipo E-CR: possuem boa resistência à ação de ácidos e de bases. São quimicamente estáveis em ambientes submetidos a corrosão,
- tipo R: possuem maior módulo, resistência à tração, maior resistência à fadiga e ao envelhecimento do que as do tipo E,
- tipo AR: são resistentes à ação dos álcalis, utilizadas na elaboração de cimentos especiais (reforçados com fibra de vidro).
- tipo T: possuem melhorias no desempenho quando comparadas com as do tipo E, na resistência à tração, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmico e resistência ao aquecimento,
- tipo N: são resistentes à ação dos álcalis. São utilizadas em compósitos com matriz cimentada;

c) fibras de amianto: são derivadas dos cristais fibrosos de silicatos. Os dois tipos mais frequentes são o amianto branco e a o azul. Sua estrutura química é altamente estável em matrizes compostas por cimento. Os diâmetros das fibras variam entre 20 – 200 nm, e o comprimento rara vez ultrapassa os 20 μm . Os valores para módulo e resistência à tração apresentam forte dispersão, sendo o primeiro da ordem de 160 GPa e o segundo variando entre 1000 – 2000 MPa (DOMONE; ILLSTON, 2010). Até o início da década do 1990 foi o tipo de fibra predominante para o reforço de concretos. No entanto, os graves riscos à saúde decorrentes da exposição ao amianto, tem feito que o emprego deste material

esteja proibido em muitos países, e que a indústria da construção civil o use cada vez em menos aplicações (PCA, 1991);

- d) fibras de basalto: são obtidas a partir do derretimento da rocha basáltica a uma temperatura próxima ao 1400 °C, a qual é posteriormente injetada através de bicos para produzir fios contínuos de material em forma de fibras. Tipicamente as fibras possuem diâmetro entre 9 – 13 µm, maior do que o limite respirável (5 µm), não acarretando risco tão alto quanto o amianto (ARAÚJO, 2011). Embora a variabilidade do material, a resistência à tração se encontra na ordem de 4000 MPa, e o módulo de elasticidade em 80 GPa (SINGHA, 2012)
- e) fibras de álcool polivinílico (PVA): existem vários tipos deste tipo de fibras, tais como: de alta resistência, alto módulo, resistentes aos ácidos, resistentes aos álcalis, resistentes à abrasão e resistentes à ação do sol. No entanto, neste item são consideradas apenas as que possuem alta resistência e alto módulo. O PVA é um material hidrófilo, o que gera ligações moleculares com a matriz cimentada durante a hidratação e a cura. São produzidas com diâmetros que variam entre 0,027 – 0,7 mm, e comprimento entre 6 – 30 mm, em função da aplicação a serem destinadas (ARAÚJO, 2011). A resistência à tração varia entre 700 – 1500 MPa e o módulo de elasticidade entre 12 – 40 GPa (DOMONE; ILLSTON, 2010).

2.2.1.4. Fibras metálicas

Historicamente as fibras metálicas têm sido as mais utilizadas entre os diferentes tipos disponíveis. Para uso geral são utilizadas fibras de aço carbono comum, mas quando é requerida a resistência à corrosão, é possível realizar a galvanização do material, ou o estabelecimento de ligas para torna-lo inoxidável. A resistência à tração varia entre 350 – 1000 MPa, o módulo permanece constante em torno de 200 GPa. Existem distintas seções transversais para as fibras, visando maximizar a aderência entre fibras e a matriz. Também podem ser aplicados químicos para melhorar as ligações entre as duas fases. O diâmetro equivalente para as fibras varia entre 0,1 – 1 mm, e o comprimento entre 10 – 60 mm (DOMONE; ILLSTON, 2010).

2.2.2. Interação solo - fibra

Os mecanismos envolvendo a interação em compósitos solo – fibra tem sido estudada por vários

pesquisadores, principalmente de forma experimental. Em função das variáveis investigadas em cada estudo, das condições dos ensaios e dos tipos de materiais (principalmente o tipo de fibras), alguns resultados podem confirmar ou contrariar outros. A seguir são apresentadas, resumidamente, as conclusões obtidas por vários pesquisadores a respeito dos fatores mencionados em 2.1:

- a) teor de fibra: quanto maior o teor de fibra, maior é o acréscimo na resistência mecânica até um certo limite, a partir do qual este efeito não é mais observado (MCGOWN et al., 1978; GRAY; OHASHI, 1983; GRAY; AL-REFEAI, 1986; MAHER; HO, 1993; SPECHT, 2000; VENDRUSCOLO, 2003); o aumento do teor de fibra provoca aumento do índice de fragilidade e da capacidade de absorção de energia de deformação (MAHER; HO, 1993); a inclusão de fibras diminui o índice de fragilidade e aumenta a capacidade de absorção de energia (GRAY; OHASHI, 1983);
- b) comprimento da fibra: quanto maior o comprimento da fibra, maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico (GRAY; OHASHI, 1983; HEINECK, 2002; VENDRUSCOLO, 2003); o aumento no comprimento da fibra provoca redução do índice de fragilidade e aumento da capacidade de absorção de energia (CONSOLI et al., 2004); o aumento do comprimento provoca diminuição da resistência de pico e aumento da capacidade de absorção de energia (MAHER; HO, 1993);
- c) orientação das fibras: os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo (MCGOWN et al., 1978); fibras distribuídas aleatoriamente mantêm a resistência isotrópica, não sendo observados planos potenciais de fragilidade (GRAY; AL-REFEAI, 1986);
- d) rugosidade: as fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada (TAYLOR, 1994);
- e) módulo de elasticidade da fibra: fibras com módulo baixo comportam-se como reforços idealmente extensíveis (GRAY; OHASHI, 1983; SPECHT, 2000) porém não geram contribuição no aumento da resistência mecânica (SPECHT, 2000; CONSOLI et al., 2004); quanto maior for o módulo do reforço, mais facilmente as fibras poderão ser arrancadas (SHEWBRIDGE; SITAR, 1990);

f) pressão confinante: foi verificada uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, os elementos de reforço são arrancados (GRAY; OHASHI, 1983; TEODORO, 1999; KANIRAJ; HAVANAGI, 2001; HEINECK, 2002). A tensão confinante crítica é sensível a alguns parâmetros do compósito solo – fibra como o fator de forma das fibras (L/d), coeficiente de uniformidade e forma das partículas do solo.

2.3. CARREGAMENTOS CÍCLICOS

O termo carregamento cíclico é frequentemente utilizado para descrever cargas variáveis que, além de seguir padrões repetitivos claramente definidos, também possuem regularidade na sua amplitude e período de duração (ANDERSEN et al., 2013). Cargas cíclicas podem ser de origem ambiental (estações, ondas, marés, vento, terremotos, camadas de gelo), ou também antropogênicos (trânsito, trabalhos com explosivos, operações de fábricas, máquinas rotativas).

Alguns exemplos de estruturas submetidas a cargas cíclicas de distinta origem identificados por Andersen *et al.* (2013), são apresentados a seguir:

- a) aerogeradores localizados em terra, os quais são submetidos ao vento e às forças de rotação do sistema;
- b) estruturas costeiras, incluído portos, quebra-ondas e barreiras para proteção contra o mar;
- c) torres de transmissão de eletricidade;
- d) prédios de grande altura e chaminés;
- e) fundações para vias e pontes em ferrovias para trens de alta velocidade;
- f) estruturas sujeitas a vibrações de origem industrial;
- g) balsas ancoradas para usinas de energia costeiras, submetidas às variações das marés;
- h) grandes reservatórios submetidos a carregamento e descarregamento regular.

As características dos tipos de carregamento podem ser tão diversas enquanto a suas grandezas como apresentado na Figura 2.3.

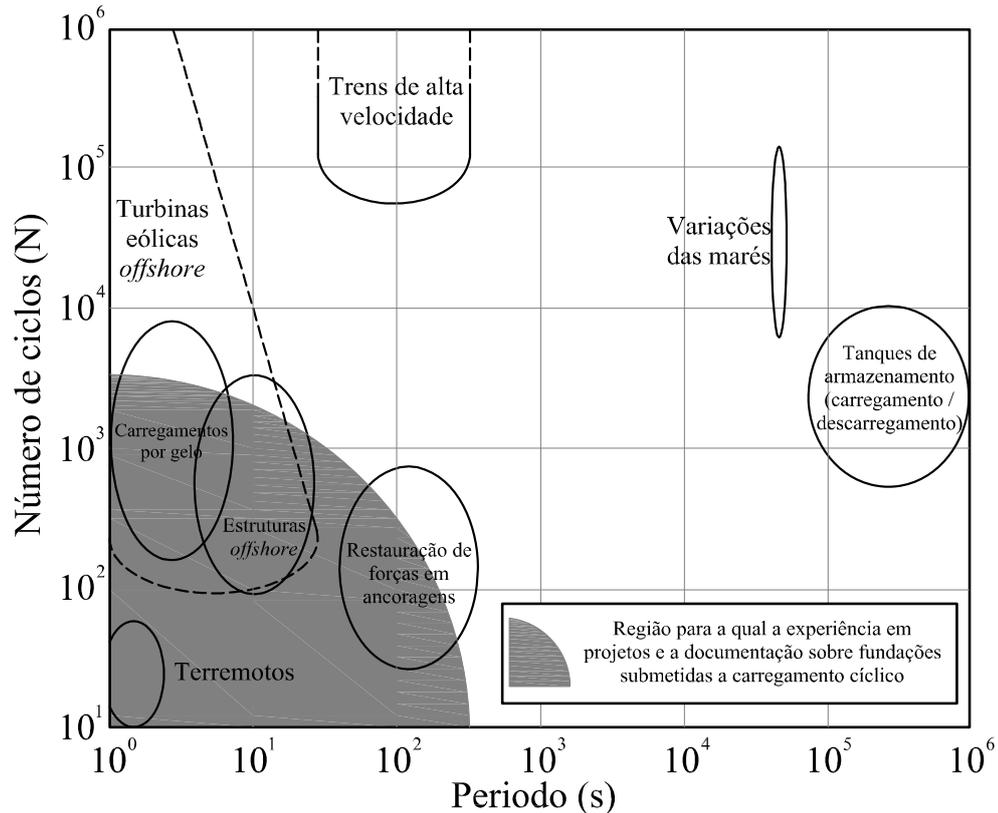


Figura 2.3: Períodos e número de ciclos associados a alguns eventos de carregamentos cíclicos (Adaptado de ANDERSEN *et al.*, 2013)

Em alguns casos, o carregamento pode ser relativamente uniforme e estar descrito apenas por uma frequência e uma amplitude, como no caso de vibração decorrente da operação de alguns equipamentos (REES, 2014). Na natureza, a maioria dos carregamentos cíclicos (tormentas, sismos, etc) estão compostos por sucessões de ondas de amplitude irregular e com frequências relativamente aleatórias. No entanto, na área de estudos cíclicos, os modelos de laboratório e ensaios em amostras que são utilizadas para determinar efeitos decorrentes dos carregamentos cíclicos, os testes são comumente restritos a períodos de tempo e taxas de aplicação das cargas cíclicas que permitam um controle adequado, precisão e aquisição dos dados obtidos (ANDERSEN *et al.*, 2013). O mais comum é a aplicação de ciclos uniformes, seja em carga ou em deslocamento, empregando uma frequência e amplitude regular. No que diz respeito do formato da onda de carga, na prática são utilizados os formatos senoidal, triangular e quadrado. Para o caso dos ensaios triaxiais cíclicos, nas normas ASTM D3999 (2011) e D5311 (2011) é exigido formato senoidal.

A execução de cada teste é definida pelo período (T) ou pela frequência (f), carga média (Q_a), e pela amplitude da carga cíclica (Q_{cy}) ou dos deslocamentos. O número de ciclos de aplicação de carga (N) poderá corresponder à principal variável resposta do ensaio, ou também podem

ser definidos outros parâmetros em função do tipo de estudo. Os elementos da onda de aplicação de cargas ou de geração de deslocamentos é apresentada na Figura 2.4.

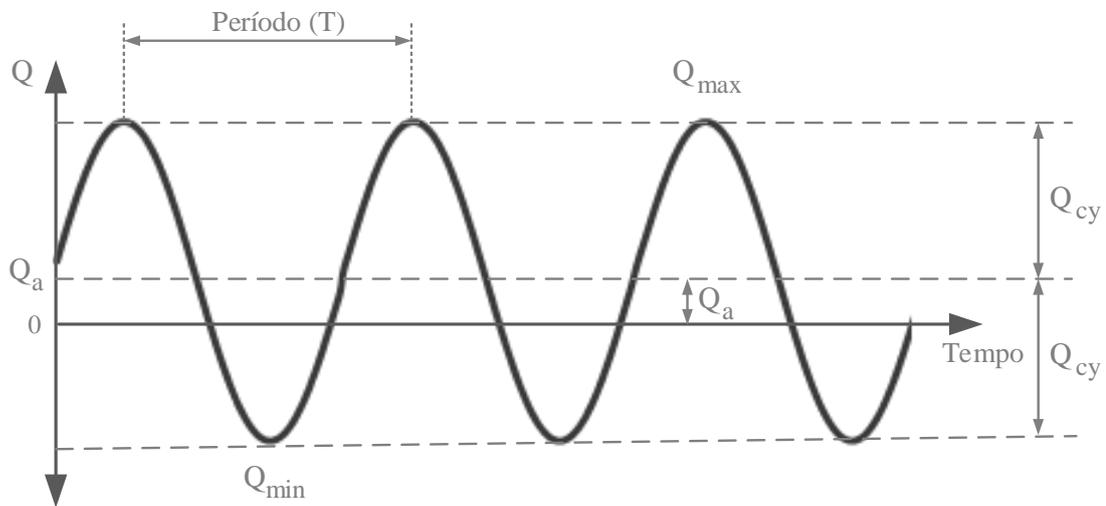


Figura 2.4: Elementos do ciclo de carga ou de deslocamentos

2.3.1. Principais fatores que controlam o comportamento sob cargas cíclicas

Muitos dos fatores de importância para análises estáticas são igualmente considerados para comportamento cíclico (ISHIHARA, 1996), tais como: índice de vazios, pressão de confinamento, teor de umidade, história de tensões, níveis de deformação e temperatura. Nesse sentido, a diferenciação entre solicitações estáticas e dinâmicas provêm de fatores relacionados com a definição da carga.

Ishihara (1996) propõe uma classificação qualitativa das fontes de cargas, sugerindo um limite entre solicitações estáticas e dinâmicas em função do tempo de aplicação da carga (ver Figura 2.5).

O'Reilly e Brown (1991) identificam três fatores principais que diferenciam o comportamento sob carregamentos cíclicos de um solo do comportamento em condições monotônicas de carga: (a) o efeito das reversões de tensão; (b) a dependência ou efeito da velocidade e; (c) os efeitos dinâmicos. A seguir são apresentados brevemente os dois primeiros fatores. O terceiro fator é explicado posteriormente de forma breve, por fugir do objetivo do presente estudo.

Os efeitos dinâmicos presentes em algumas estruturas, principalmente associados a processos de carregamento com frequências elevadas: efeitos de ressonância em fundações, ou ampliações de pulsos de carga pela presença de sedimentos profundos com baixa rigidez.

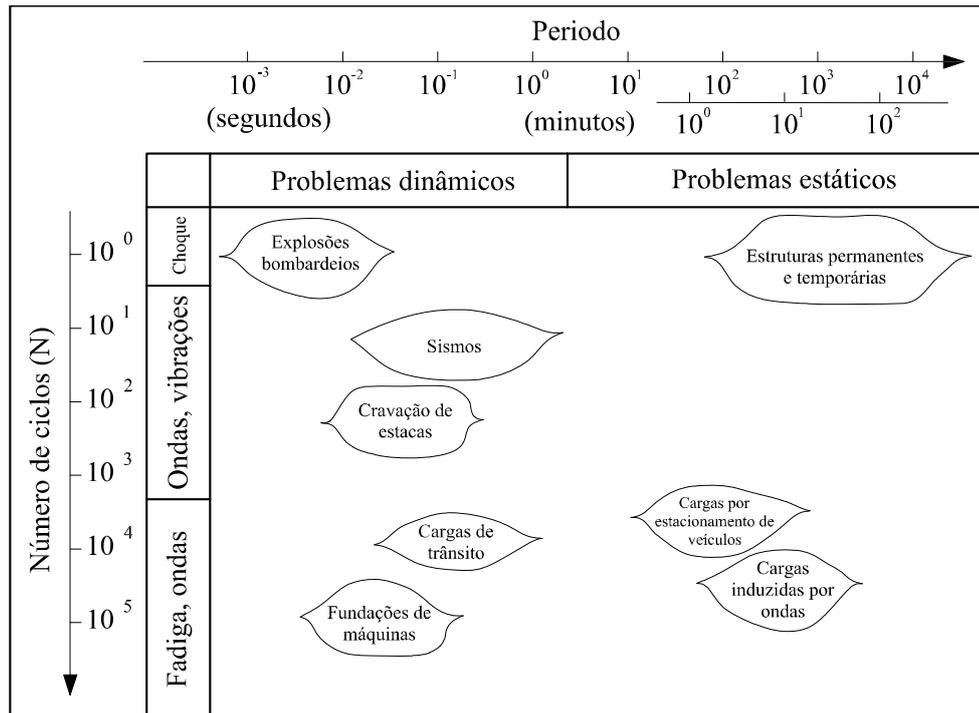


Figura 2.5: Classificação das solicitações em função do regime de cargas (Adaptado de ISHIHARA, 1996)

2.3.1.1. Efeito das reversões de tensão

A reversão não se refere à mudança no sinal da tensão, mas à mudança no sinal na taxa de variação dela. Na Figura 2.6 é apresentado o esquema do comportamento de um solo granular, seco, submetido a carregamento cíclico com carga controlada entre dois valores de tensão, S_1 e S_2 . Cada ciclo é acompanhado por uma variação na deformação cisalhante, sendo uma parte recuperável e outra não (O'REILLY; BROWN, 1991).

A magnitude da deformação recuperável permanece quase constante entre ciclos. O valor da deformação plástica ou permanente desenvolvida durante ciclos sucessivos tende a diminuir com o aumento no número de ciclos. Eventualmente, o solo atinge uma forma de equilíbrio para o padrão de carregamento, no qual, a magnitude da deformação recuperável experimentada em cada ciclo será muito maior do que o incremento na deformação permanente entre ciclos. Esta condição é conhecida como quase-elástica ou “resiliente”.

Se após o material atingir a condição de resiliência, a faixa de tensões for incrementada para dois valores S_3 e S_4 , surgirão novas deformações permanentes.

Quando submetido a carregamento cíclico, embora a magnitude das deformações permanentes experimentadas durante cada ciclo sejam usualmente pequenas, após um grande número de repetições de carga, o acúmulo de deformação pode ser significativo.

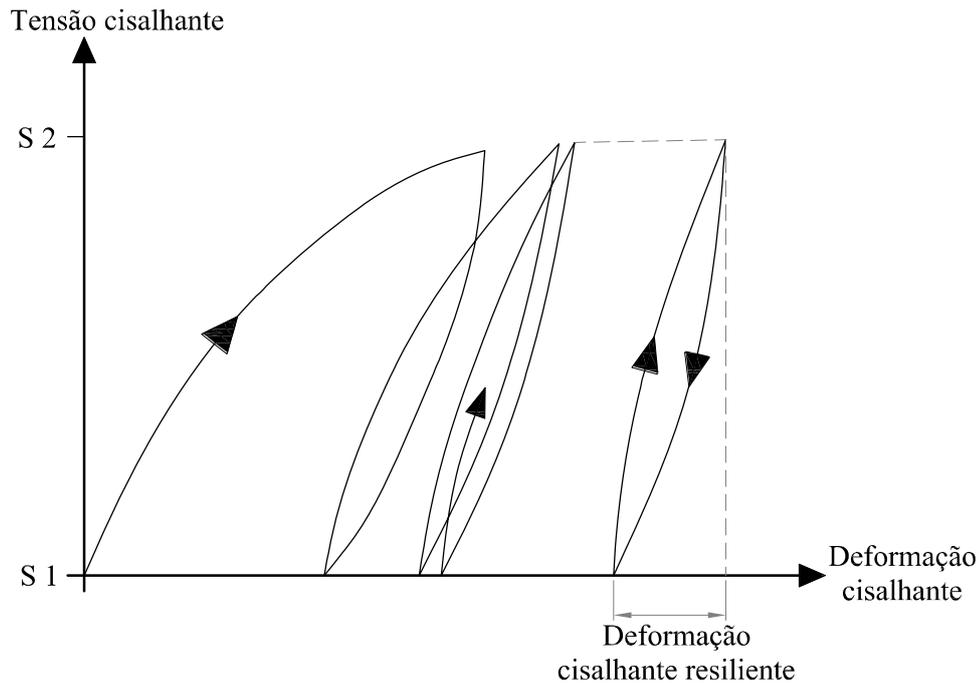


Figura 2.6: Desenvolvimento das deformações cisalhantes durante um ensaio com repetição de carga e definição da deformação cisalhante resiliente (Adaptado de O'REILLY E BROWN, 1991)

No caso do solo saturado, a geração de poropressões ocorre durante o carregamento cíclico quando a frequência do carregamento cíclico não permite a sua completa dissipação. Os resultados de múltiplos ensaios têm mostrado que, a ruptura ocorre para níveis de tensão abaixo os valores correspondentes à tensão cisalhante de ruptura sob condições monotônicas, sendo deflagrada pela geração contínua de poropressão entre ciclos sucessivos.

Em alguns casos, quando o material é submetido a níveis de carregamento baixos, é possível atingir uma condição de equilíbrio, para a qual, tanto as deformações quanto as poropressões geradas durante o incremento de carga, são eminentemente recuperáveis.

Existem outros casos em que, apesar do solo apresentar uma aparente condição de equilíbrio, podem acontecer incrementos de deformação de forma súbita e rapidamente o material atingir a ruptura.

Na Figura 2.7 é ilustrado o efeito das reversões de tensão em um solo durante uma sequência de ciclos de carga. Após cada ciclo de carga, quando recarregado, a rigidez do material sofre um forte incremento, situação contrária à ocorrida após o descarregamento. Além disso, a histerese ou amortecimento expressa a capacidade do material dissipar uma parte da energia introduzida durante o carregamento (O'REILLY; BROWN, 1991).

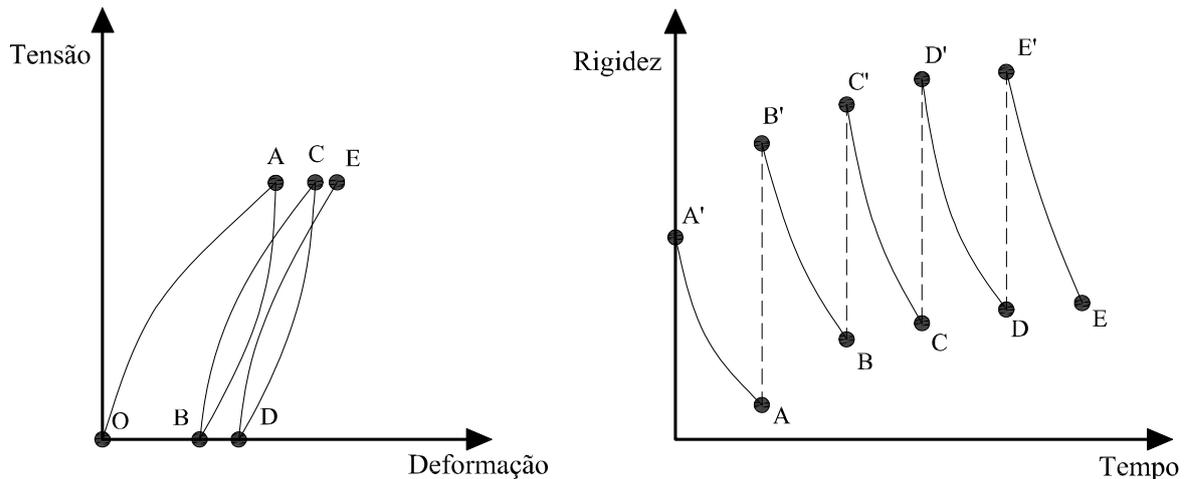


Figura 2.7: Efeito das reversões de tensão na rigidez do solo (Adaptado de O'REILLY E BROWN, 1991)

2.3.1.2. Resposta do solo dependente da velocidade

O efeito da velocidade, seja de aplicação de carga ou de deformação, na resistência e rigidez do solo, é atribuível a duas fontes: a interação viscosa entre partículas do solo, e a dependência da dissipação do excesso de poropressões geradas do tempo durante o carregamento em situações em que existe possibilidade de drenagem.

Este efeito é reconhecido nos solos argilosos como de grande importância, porém para solos granulares aparentemente seu efeito possa ser pouco expressivo (O'REILLY; BROWN, 1991). Para o caso de solos argilosos, na Figura 2.8 são apresentados os resultados de duas argilas, a parte (a) corresponde a um ensaio em que a taxa de deformação foi alterada em vários momentos, permitindo identificar de forma aproximada a família de curvas que exibem o efeito da taxa de deformação; na parte (b) são apresentados os diferentes valores obtidos para o mesmo material quando ensaiado em condições não drenadas, cada ensaio com uma taxa distinta de deformação.

Em geral, os solos submetidos a carregamentos cíclicos experimentam maiores taxas de carregamento ou de deformação do que no caso de solos carregados em condição monotônica. Nesse sentido, a dependência é altamente significativa quando existe carregamento cíclico

No entanto, alguns tipos de carregamento cíclico podem estar definidos por frequências altas, dificultando ou até impedindo a drenagem de materiais com alta condutividade hidráulica. Este efeito, durante um ensaio cíclico pode gerar acúmulo de incrementos de poropressão, que em função da intensidade do carregamento e da duração total da aplicação da onda de cargas, podem levar o solo até a ruptura. Um exemplo típico desta situação é a liquefação em areias

durante a ocorrência de sismos (O'REILLY; BROWN, 1991).

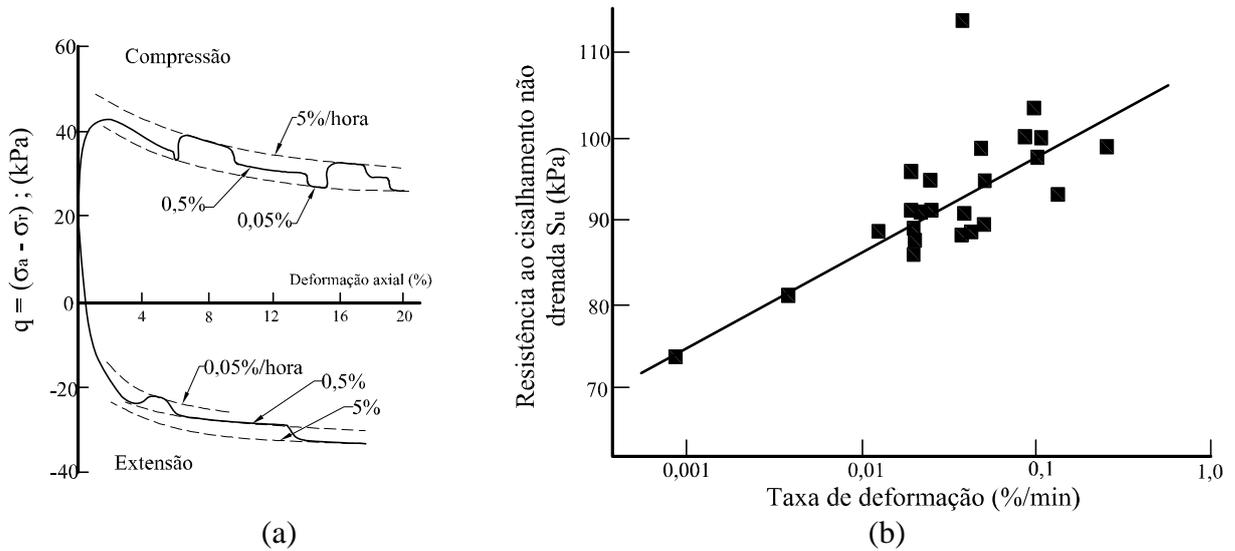


Figura 2.8: Ensaio em argilas com taxas variáveis de deformação (Adaptado de O'REILLY E BROWN, 1991)

2.3.2. Alguns métodos para medição das propriedades dinâmicas em laboratório

O estudo das técnicas para determinação dos parâmetros dinâmicos atravessa tanto a adaptação de alguns procedimentos clássicos, como o desenvolvimento de novos equipamentos. Alguns dos equipamentos e procedimentos fornecem parâmetros para projeto, e outros funcionam principalmente na caracterização de materiais para fins acadêmicos.

Andersen (2009) apresenta um exemplo simplificado das distintas condições de carga impostas ao longo da superfície potencial de falha do solo embaixo de uma fundação submetida a cargas cíclicas (ver Figura 2.9). Isto não obriga ao emprego de várias técnicas para uma mesma aplicação, mas serve como uma guia para definir as condições de ensaio, visando que estas representem o melhor possível às condições reais.

A seguir são brevemente descritos os principais métodos de laboratório utilizados para determinação das propriedades dinâmicas dos solos, tanto para pequenas quanto em grandes deformações. Os procedimentos envolvendo modelos reduzidos não são considerados por não fazer parte do escopo do presente estudo. Informação complementar sobre experiência internacional nos procedimentos de laboratório é apresentada por Maher e Woods (1990).

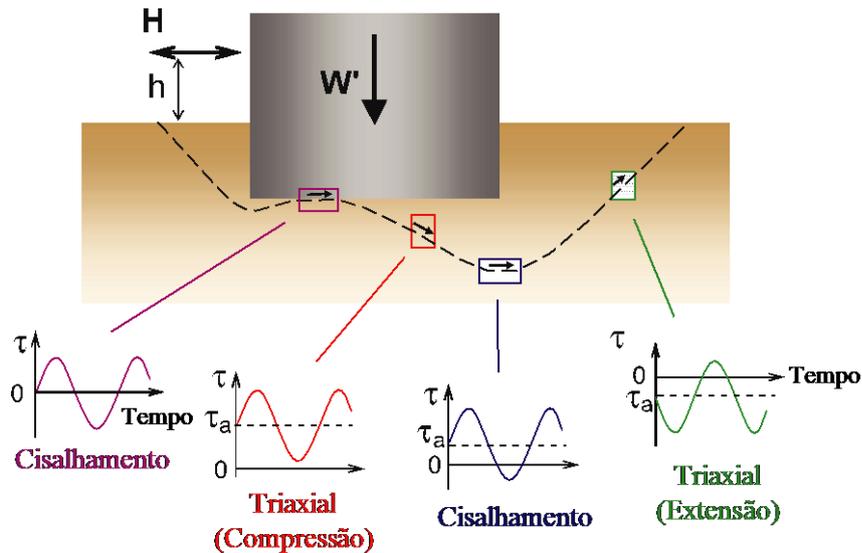


Figura 2.9: Esquema simplificado de tensões ao longo da superfície potencial de falha abaixo de uma estrutura submetida a carregamentos cíclicos. H: força resultante horizontal; h: altura da resultante a partir da superfície (Adaptado de ANDERSEN, 2009)

2.3.2.1. Coluna ressonante

Neste ensaio, o corpo de prova cilíndrico, cheio ou vazado no eixo vertical, é submetido a uma tensão efetiva específica, e posteriormente são aplicadas tensões longitudinais e/ou torque, mantendo uma onda de carga senoidal (ISHIHARA, 1996).

A frequência é incrementada até o material atingir a condição de ressonância, determinada pela amplitude das deformações. A mínima frequência para a qual a resposta é maximizada é a frequência fundamental do corpo de prova (KRAMER, 1996). Com a frequência obtida e com a geometria do corpo de prova é determinada por retroanálise a velocidade da onda de propagação através dele. O procedimento é repetido para diferentes amplitudes de carga, permitindo sensibilizar a variação do módulo e seu efeito na frequência fundamental. A execução básica do ensaio é definida pela Norma ASTM D-4015 (2007).

2.3.2.2. Triaxial cíclico

O equipamento é muito similar ao utilizado para ensaios estáticos, mas permitindo a aplicação cíclica da tensão desvio. Neste tipo de ensaio, a direção dos eixos principais é sempre vertical e horizontal.

De maneira análoga com o ensaio estático, o procedimento cíclico pode ser executado em condições inicialmente isotrópicas ou anisotrópicas (KRAMER, 1996). Na fase de

cisalhamento, tanto a tensão desvio quanto a pressão confinante pode ser variada de forma cíclica. O ensaio pode ser executado em condições tanto drenadas quanto não drenadas, sendo esta última a mais frequente.

Em função do parâmetro, o ensaio pode ser: destrutivo, o qual permite a determinação da resistência a cargas cíclicas, medida através do número máximo de ciclos de carga (ASTM-D5311, 2011); ou não destrutivo, permitindo a determinação do módulo de elasticidade e o coeficiente de amortecimento (ASTM-D3999, 2011).

A determinação do módulo de resiliência corresponde a um tipo de ensaio triaxial cíclico não destrutivo, com alguns parâmetros definidos: tensão desvio apenas de compressão, duração da carga constante (0,1 s), duração do ciclo entre 1 e 3 segundos (NCHRP, 2004; AASHTO/T307-99, 2007)

2.3.2.3. *Simple shear* cíclico

Da mesma maneira ao triaxial cíclico, este equipamento permite a determinação de ensaios em condições estáticas.

A restrição lateral das primeiras versões do equipamento permitia a execução de adensamento apenas na condição K_0 (KRAMER, 1996). Nestas condições, em ensaios sob condição não drenada, o incremento nas poropressões criava efeitos indesejáveis na membrana de vedação. Para evitar estas situações, assim como para permitir diferentes condições de carregamento, tanto isotrópicos como anisotrópicos de diferente valor de K , foram desenvolvidos modelos do equipamento em que o corpo de prova e o sistema de cisalhamento se encontra dentro de uma câmara hermética (AMER et al., 1986; ISHIHARA, 1996).

2.3.2.4. *Hollow cylinder*

O equipamento permite a aplicação de vários tipos de solicitações ao corpo de prova: pressão confinante, contrapressão, tensão axial, e torque. A execução do ensaio com estas solicitações permite criar rotações constantes dos planos de tensões principais. A espessura das paredes do corpo de prova permite considerar uma distribuição uniforme das deformações radiais (ISHIHARA, 1996).

O ensaio é muito versátil enquanto às combinações de tensões impostas ao corpo de prova, permitindo a caracterização de materiais para fins de pesquisa, mas não é muito prático para definição de parâmetros de projeto.

2.3.2.5. *Bender elements*

Basicamente, um *bender element* ou transdutor de flexão é um transdutor piezocerâmico duplo constituído por duas placas piezocerâmicas finas, rigidamente ligadas a uma lâmina metálica central e aos eletrodos nas faces exteriores (FERREIRA, 2003).

A ligação das placas cerâmicas em relação às suas direções de polarização deve ser tal que origine um movimento conjunto de flexão, de modo a propagar ondas cisalhantes durante a sua deformação.

Esta capacidade de converter energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa, permite que os transdutores piezoelétricos funcionem como atuadores ou sensores (FERREIRA, 2003). São utilizados para a obtenção do módulo cisalhante elástico de um solo a deformações muito pequenas ($< 10^{-5}$) (DYVIK; MADHSUS, 1985; FESTUGATO, 2011). Desta forma, o módulo cisalhante estimado corresponde ao G_0 , referente a deformações muito pequenas.

Os *bender elements* podem ser instalados em vários equipamentos de ensaio: triaxial, edômetro, *simple shear*, ou coluna ressonante (ISHIHARA, 1996). O funcionamento de um como emissor da onda cisalhante (atuador) e outro como receptor (sensor) permite, desde que seja conhecida a separação entre eles, determinar a velocidade de propagação da onda cisalhante (V_s). Se conhecida a massa específica da amostra de solo, será possível determinar o valor do módulo cisalhante (G_0).

2.3.3. Fatores que afetam os resultados nos ensaios triaxiais cíclicos

É apresentada informação apenas para o ensaio triaxial cíclico por corresponder à principal ferramenta utilizada no presente estudo.

Townsend (1978) apresenta uma série de fatores, determinados através de um estudo desenvolvido por oito laboratórios, em ensaios executados na mesma areia. Um trabalho similar foi desenvolvido por Sangrey *et al* (1978) para ensaios executados em argilas:

- a) método de preparação dos corpos de prova: a faixa de diferenças obtidas foi bastante ampla, chegando a 110%. O resultado é fortemente dependente ainda para o mesmo material, não sendo possível estabelecer uma relação única. Dentre os valores apresentados no estudo, destaca-se o fato que amostras preparadas com *undercompaction* (LADD, 1978) apresentaram maior resistência quando comparadas com amostras sem esta consideração;

- b) tipo de amostra: foi determinada uma tendência de maior resistência nas amostras indeformadas, em alguns casos entre uma (1) e duas (2) vezes o valor obtido para o corpo de prova reconstituído;
- c) grau de compactação: no caso das areias, a resistência cíclica teve grandes incrementos com o aumento da densidade relativa, seguindo uma tendência de crescimento linear. A declividade da linha é dependente do tipo de solo, pressão confinante e deformação de ruptura;
- d) pré-deformação: para o caso de corpos de prova rompidos sob carregamento cíclico, reacondicionados e rompidos novamente sob as mesmas condições de carregamento cíclico, o efeito da primeira ruptura já causa enfraquecimento considerável no material. Quando feitos os carregamentos sem atingir a ruptura, apresentam-se ganhos na rigidez do material (ver Figura 2.7);
- e) pressão de confinamento: dentro de uma pequena faixa de pressões, a resistência a carregamento cíclico é diretamente proporcional à pressão confinante efetiva;
- f) tipo de onda de carga: no estudo foram considerados vários formatos de onda de carga: retangular, retangular arredondado, triangular e senoidal. As resistências obtidas incrementaram conforme a seguinte ordem de formatos de onda de carga: retangular, retangular arredondado, triangular, e finalmente senoidal;
- g) granulometria: os menores valores de resistência são obtidos para tamanhos entre 0,1 e 30 mm. Fora dessa faixa, tanto para tamanhos maiores quanto menores, são obtidos ganhos importantes;
- h) sobre adensamento: o incremento na relação de sobre adensamento gerou ganhos importantes na resistência ante carregamentos cíclicos;
- i) congelamento de amostras indeformadas: diferentes estudos permitiram constatar que o efeito decorrente do congelamento é insignificante nos resultados obtidos em ensaios triaxiais cíclicos;
- j) frequência de carga: não existe acordo entre o efeito da frequência, sendo que os resultados obtidos a partir de vários trabalhos apresentam valores que levariam à contradição (alguns maiores e outros menores do que uma frequência de referência). Apesar do anterior, os mesmos estudos têm demonstrado que o efeito da frequência é pequeno, criando uma faixa de valores entre $\pm 10\%$. Frequências

baixas podem acarretar pequenos incrementos de resistência. Entre 0,017 e 1 Hz, o efeito é de $\pm 10\%$. Em ensaios executados como frequência de 5 Hz, a água gerou efeitos visíveis;

- k) dimensões dos corpos de prova: Considerado como de baixa incidência, têm sido determinadas reduções de até 10% na resistência com aumento do diâmetro de 71 mm para 300 mm (MULILIS et al., 1978; TOWNSEND, 1978);
- l) atrito na base e no cabeçote: ao se comparar ensaios com e sem atrito nestas peças, determinou-se que não existe incidência significativa, ou melhor, que o efeito pode ser desconsiderado.

2.4. COMPORTAMENTO DE AREIAS SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS

O comportamento das areias quando submetidas a carregamentos cíclicos tem sido um campo de estudo de grande importância, principalmente no que diz aos efeitos decorrentes de eventos sísmicos, os quais em alguns casos, têm acarretado grandes perdas materiais e humanas.

Jefferies e Been (2006) apontam que, na Holanda existiam estudos e procedimentos de engenharia que permitiam garantir a segurança dos territórios localizados abaixo do nível do mar. Destaca-se que, em 1918 após uma avaliação de um acidente próximo de uma ferrovia na Holanda, foi apontada uma relação entre a passagem dos trens e as rupturas pela sua proximidade.

Mas alguns dos casos que impulsionaram o desenvolvimento de estudos dentro do área são: O sismo de Niigata no Japão em 1964, a perda de 144 pessoas pelo o deslizamento de uma mina de carvão em Aberfan, no país de Gales em 1966 (JEFFERIES; BEEN, 2006); o abandono da ilha artificial de Nerleck para exploração de petróleo no Canadá em 1983 (HICK; BOUGHRAROU, 1998); a ruptura da barragem Baixo São Fernando na Califórnia induzida por um sismo em 1971, a qual obrigou à evacuação dos quase 80.000 moradores localizados na área a jusante (CASTRO et al., 1992).

Conceitualmente, Ishihara (1996) explica que um elemento de solo saturado estará sujeito a um estado de tensões sob condições K_0 antes da aplicação das cargas decorrentes do sismo. Quando acontece a chegada das ondas sísmicas, o elemento de solo será submetido a uma sequência de tensões cisalhantes conforme a duração do evento, como apresentado na Figura 2.10.

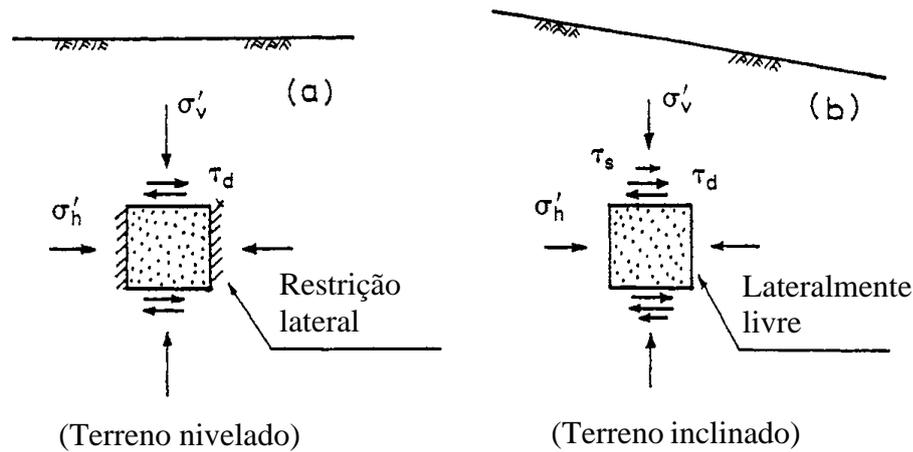


Figura 2.10: Estado de tensões de um elemento de solo considerando superfície do terreno (a) plana e (b) inclinada (adaptado de ISHIHARA, 1996)

A condição descrita acima, representada também pela existência de declividade na superfície do terreno na anterior figura, permite visualizar como o carregamento sob condição K_0 pode ser alterada tanto de maneira permanente quanto temporária, podendo no último caso ser deflagradas solicitações mecânicas no solo que poderiam torná-lo instável, com ou sem a presença de cargas impostas por estruturas.

Estes estados de tensões podem ser reproduzidos ou aproximados em laboratório em função do tipo de equipamento e ensaio a ser executado. Na Figura 2.11 é apresentada a simulação das condições de carregamento para uma areia saturada (SEED; LEE, 1966), ensaiada primeiramente sob condições de consolidação isotrópica e posteriormente submetida a carregamento axial de amplitude constante sob condições não drenadas. Este carregamento produz a geração de tensões em um plano com inclinação 45° , que são as mesmas produzidas em um plano horizontal durante os sismos.

Para este tipo de carregamento ocorre um incremento na poropressão juntamente com a aplicação de tensões desvio, até que, eventualmente, este valor seja igual à tensão efetiva inicial aplicada ao corpo de prova, produzindo uma deformação axial aproximadamente 5% em termos da dupla amplitude de deformação. Este estado tem sido denominado como liquefação inicial ou simplesmente liquefação (CASTRO et al., 1982; ISHIHARA, 1993, 1996).

Benahmed (2001) elenca as diferentes tipos de comportamento cíclico dos solos, assim:

- a) quando os materiais são submetidos a processos de carregamento sob tensão controlada (Figura 2.12 a):

- catraca. as deformações aumentam de forma contínua, até o material atingir a ruptura, seja esta por liquefação ou por mobilidade cíclica,
- acomodação. O comportamento tensão – deformação chega a se estabilizar em um ciclo de histerese, sem gerar acúmulos de deformação nos ciclos posteriores porém mantendo uma tendência de dissipação de energia,
- adaptação. O material poderá atingir um estado de adaptação, estabilizando seu comportamento tensão – deformação ao longo de um segmento de linha, correspondendo a uma tendência elástica sem dissipação;

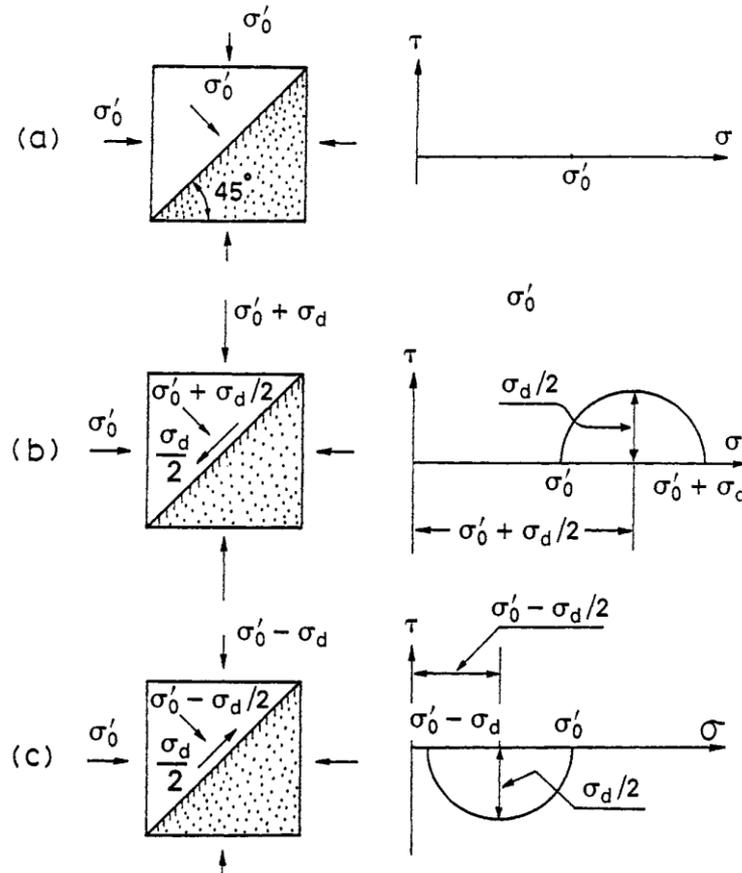


Figura 2.11: Simulação das tensões geostáticas e cíclicas em um corpo de prova submetido a um ensaio triaxial cíclico (ISHIHARA, 1996)

b) quando os materiais são submetidos a carregamentos sob deformação controlada (Figura 2.12b):

- rigidização do material. A amplitude de tensões aumenta entre ciclos,
- amolecimento. A amplitude de tensões diminui com o incremento nos ciclos.

c) os carregamentos podem ser alternados, onde a tensão cíclica varia entre valores positivos e negativos, ou bem podem ser executados completamente em compressão ou em extensão. No entanto, o caso alternado é o que melhor tende a representar carregamentos sísmicos (Figura 2.12c).

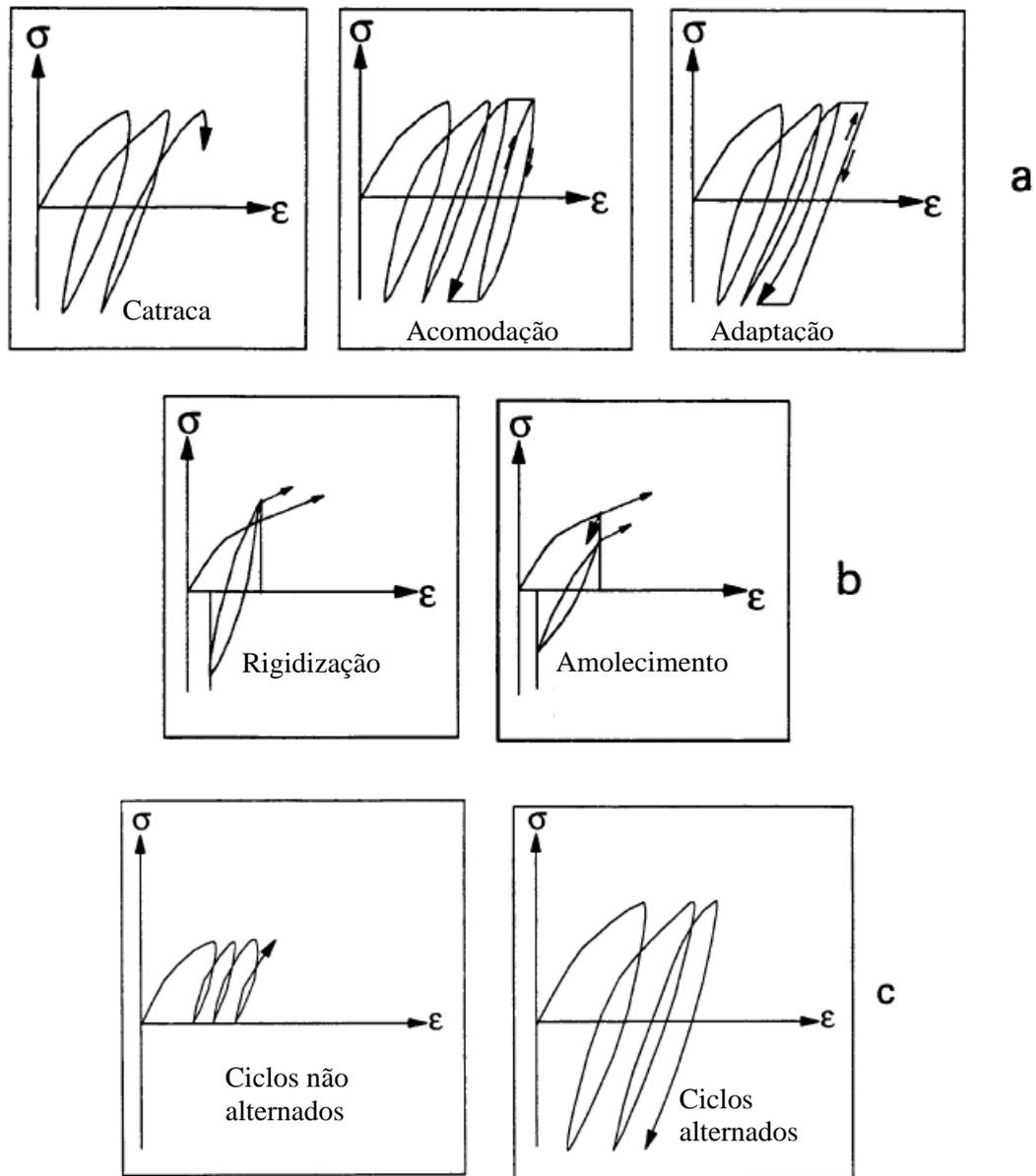


Figura 2.12: Diferentes tipos de carregamentos cíclicos – Fonte: Adaptado de Benahmed (2001)

Uma abordagem similar, porém aplicada para camadas em aplicações de pavimentação, considerando estados parcialmente saturados, foi estudada por Werkmeister *et al* (2005), considerando quatro categorias para a resposta do material quando submetido a diferentes níveis de carregamento. Neste caso, a definição de uma condição de estabilização de efeitos ou *shakedown* (COLLINS *et al.*, 1993) (Figura 2.13):

- a) completamente elástica. Neste caso o material apresentará um comportamento puramente elástico;
- b) *shakedown* elástico. O material acumulará deformações até um certo valor, após

- o qual seu comportamento será completamente elástico;
- c) *shakedown* plástico. Existirá uma tendência de acúmulo de deformações até um certo valor, a partir do qual o comportamento do material ocorrerá em um ciclo de histerese sem novos acúmulos para ciclos posteriores;
- d) colapso incremental. Neste caso, o material sempre acumulará deformações.

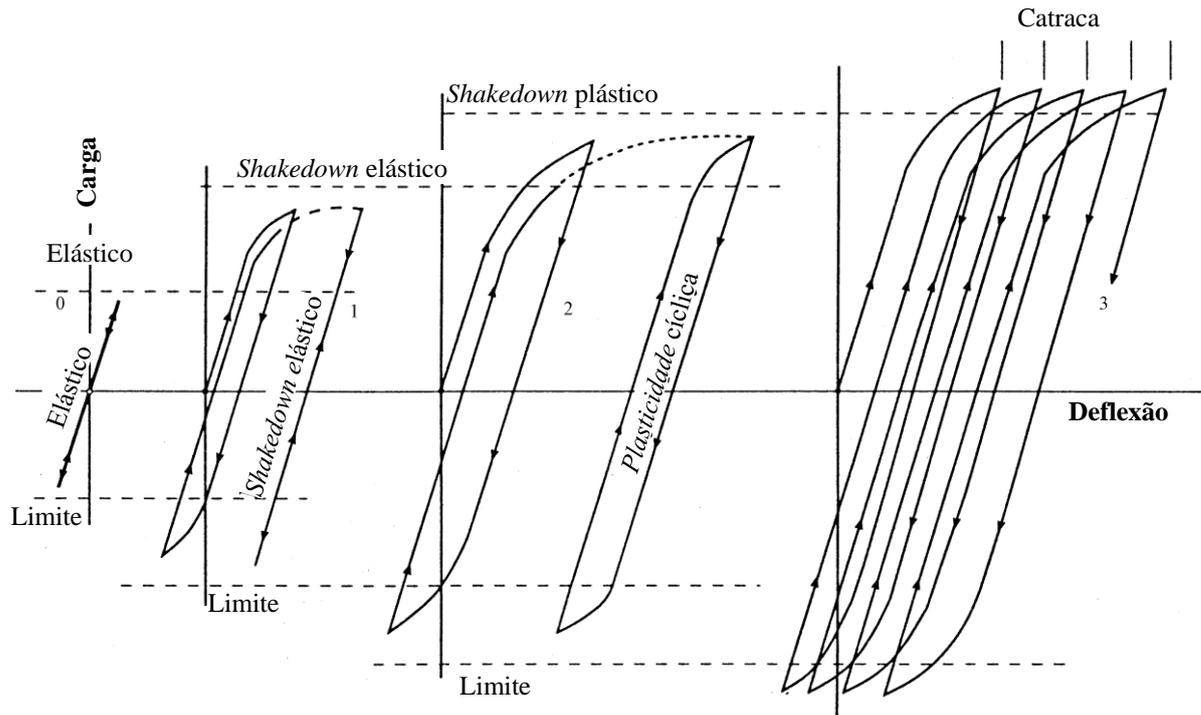


Figura 2.13: Categorias de comportamento do material quando submetido a carregamentos cíclicos (Modificado de COLLINS *et al*, 1993; WERKMEISTER *et al*, 2005)

2.4.1. Fenômeno de liquefação

Corresponde ao processo em que, uma área fofa e saturada perde uma grande fração da sua resistência ao cisalhamento (pode ocorrer sob carregamento cíclico ou também monotônico), e adota um comportamento similar ao de um líquido, até o momento em que as tensões cisalhantes atuantes sejam tão pequenas quanto sua resistência reduzida (CASTRO; POULOS, 1977; CASTRO *et al.*, 1982; TERZAGHI *et al.*, 1996).

Estes materiais possuem uma tendência contrativa, o que permite um aumento gradual da propressão com a aplicação das cargas, e neste caso, com o incremento no número de ciclos de carga. O acúmulo de deformações pode não ser muito significativo no início do ensaio, mas

após atingir um “ciclo último ou crítico”, os valores crescerão de forma dramática, e a proporção também o fará igualando o chegando muito próxima da tensão efetiva inicial (BENAHMED, 2001).

Um dos primeiros estudos reconhecidos sobre liquefação em areias foi o desenvolvido por Castro (1969), que apresentou múltiplos resultados de ensaios não drenados, comparando seu mecanismo de ruptura com o observado em ensaios monotônicos não drenados (ver Figura 2.14).

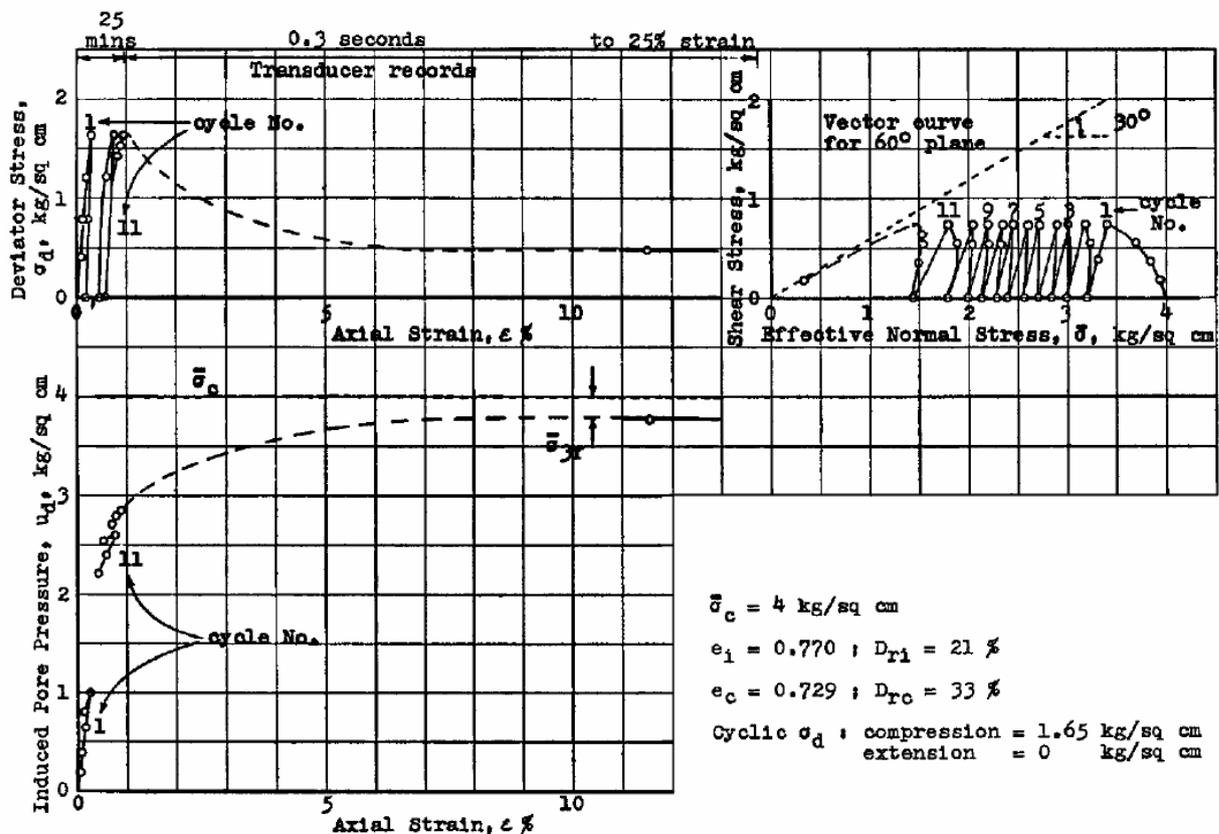


Figura 2.14: Exemplo de liquefação em ensaio triaxial cíclico não drenado (CASTRO, 1969)

No caso do ensaio apresentado na anterior figura se pode apreciar que, a ruptura ocorre um pouco antes do material atingir a envoltória de resistência, seguido por um forte incremento na deformação axial para posteriormente os ciclos seguirem a trajetória definida pela envoltória.

Neste ponto, Benahmed (2001) aponta que o processo de liquefação inicia em um valor crítico de tensão efetiva do material, independente da densidade relativa inicial e da tensão desvio inicial.

De acordo com Chern (1985), são necessárias as seguintes condições para a ocorrência de

liquefação durante um carregamento cíclico:

- a) a areia tem que apresentar comportamento contrativo durante o carregamento monotônico;
- b) o valor da tensão desvio cíclica tem que ser maior do que o valor residual pós-ruptura;
- c) o número de ciclos aplicados deverá ser suficiente para que a trajetória de carregamento possa atingir a envoltória de resistência do material

2.4.2. Fenômeno de mobilidade cíclica

A existência deste conceito tem-se derivado dos diferentes estudos aplicados para caracterizar o comportamento dos materiais em termos da resposta sob carregamentos cíclicos. O conceito proposto por Casagrande durante uma palestra no final de 1970 (GREEN; FERGUSON, 1971; CASAGRANDE, 1976) expressa que, a mobilidade cíclica corresponde ao amolecimento progressivo do corpo de prova quando submetido a carregamentos cíclicos, mas sendo este o suficientemente denso para evitar que o processo de liquefação possa vir a ocorrer.

Nesta mesma palestra, Casagrande tentou definir o valor 50% como sendo um limite inferior na densidade relativa a partir do qual as areias estariam em segurança ante os fenômenos de liquefação, mas também reconheceu a falta de muito conhecimento nessa área, principalmente no que diz à mobilidade cíclica.

Ishihara (1996) define este fenômeno como um estado em que o corpo de prova atingirá momentaneamente uma condição de tensão efetiva igual a zero, mas que poderá recuperá-la com a aplicação de tensões cisalhantes

Seed e Lee (1966) chamaram inicialmente este fenômeno de “liquefação”, a partir do qual estabeleceram as primeiras conclusões, as quais quando comparadas aos estudos feitos na Universidade de Harvard por Castro (1969), mostraram-se contraditórias em razão que o conceito de liquefação estava definido para outras condições de materiais (CASAGRANDE, 1976).

Ishihara (1985) apresenta os resultados de um ensaios de cisalhamento torsional em uma areia sob duas condições de densidade relativa, sendo uma delas moderadamente fofa ($D_r = 47\%$) (Figura 2.15 a) e a outra compacta ($D_r = 75\%$) (Figura 2.15 b).

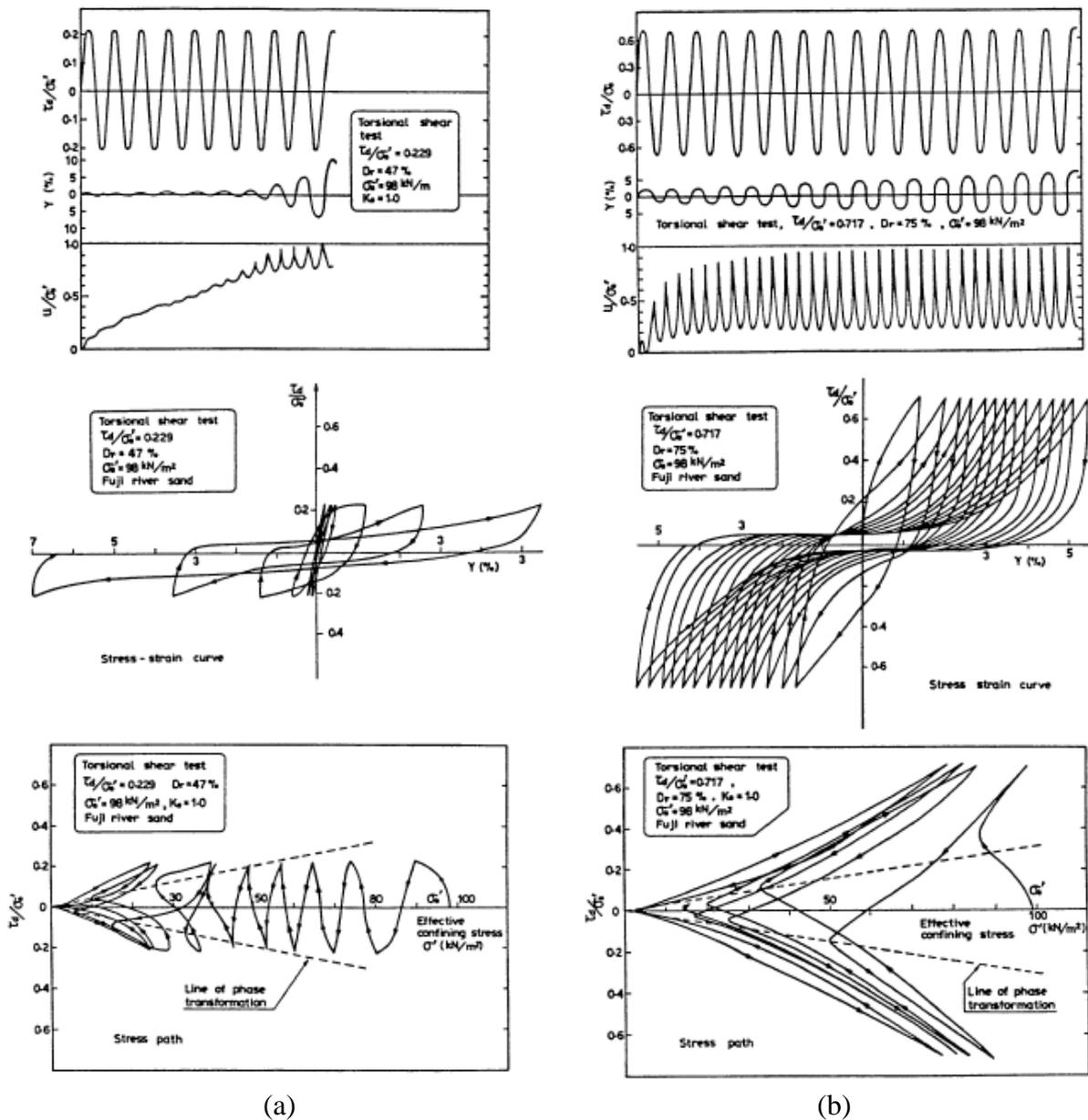


Figura 2.15: Comportamento de uma areia sob cisalhamento torsional cíclico: (a) medianamente fofa e (b) densa (ISHIHARA, 1985)

Nestes ensaios, na parte (a) pode-se apreciar a maneira como evoluem as propressões ao longo do ensaio, sem criar flutuações visíveis dentro de cada ciclo, até atingir o valor da tensão efetiva inicial, gerando um incremento súbito nas deformações cisalhantes, sem mobilização expressiva de resistência ou praticamente nula após este ponto. Neste caso pode-se afirmar que areia atingiu um estado de liquefação. Assim que o corpo de prova atinge o estado de ruptura, sua propressão apresenta tendência a se manter em valores altos, não permitindo à amostra o desenvolvimento de tensões efetivas importantes, com a consequente tendência de geração de maiores deformações entre ciclos sucessivos.

Já para o material denso (parte b), os incrementos nas poropressões ocorrem de uma forma mais lenta, atingindo um pico máximo no valor equivalente à tensão efetiva inicial, mas voltando a uma condição de tensão efetiva quase estável para os valores mínimos da curva. Neste caso, as deformações torsionais se incrementam com a progressão no número de ciclos, mas sem ocorrer incrementos súbitos entre ciclos consecutivos. O comportamento cíclico para este material é definido como o amolecimento progressivo da areia saturada quando submetida a carregamentos cíclicos com teor constante de umidade.

Quando uma área é fofa ou compacta, a poropressão aumenta com as aplicações cíclicas de carga até um certo ciclo, a partir do qual o pico de poropressão seja momentaneamente igual à tensão efetiva inicial. Esse estado é definido como “liquefação inicial” (ISHIHARA, 1985).

Em areias fofas, a liquefação inicial coincide com o início do estado de liquefação do material. Em areias densas, o estado inicial de liquefação não produz o súbito incremento nas deformações, mas sim é gerado um processo de amolecimento do material. Este estado deve ser considerado como uma medida para estabelecer o início de um estado de instabilidade do material (ISHIHARA, 1985).

2.4.3. Fatores que afetam a resistência ao cisalhamento sob condições cíclicas

Com o avanço dos estudos, tem sido determinados alguns fatores que afetam tanto o comportamento quanto a resistência dos solos sob condições cíclicas de carga. Alguns desses fatores provêm de fatores associados com o solo estudado, e outros do tipo e condições de ensaio. Considerando o foco do presente estudo na avaliação do comportamento cíclico mediante ensaios triaxiais cíclicos, alguns dos principais fatores já foram estudados no item 2.3.3.

2.4.3.1. Densidade relativa

Corresponde a um dos fatores de maior importância dentro do comportamento cíclico dos solos, estando associado à natureza da resposta cíclica, podendo ser liquefação ou mobilidade cíclica (BENAHMED, 2001), sendo que a susceptibilidade à liquefação diminui com se incremento. Está diretamente associada com o valor da tensão necessária para alcançar a ruptura com um mesmo número de aplicações de carga, seja em liquefação ou mediante mobilidade cíclica

Na Figura 2.16 é apresentado uma relação entre o CSR necessário para alcançar uma dupla

amplitude de deformação em 20 ciclos de carga com o incremento na densidade relativa, para a areia normalizada Toyoura (ISHIHARA, 1996).

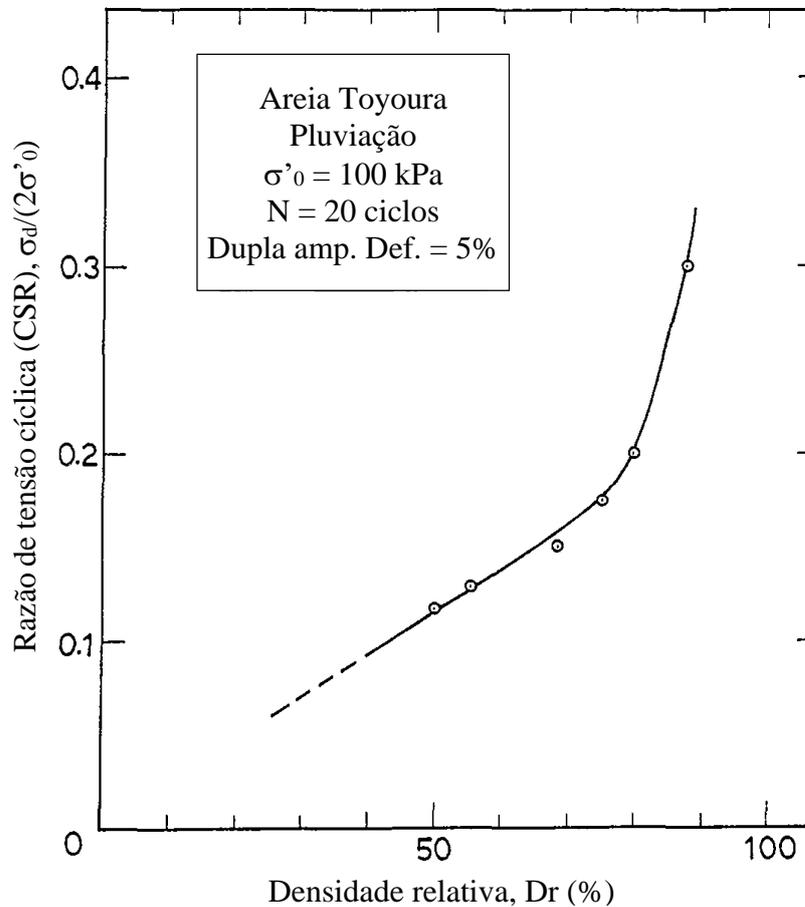


Figura 2.16: Exemplo do efeito da densidade relativa na resistência cíclica de areias (Modificado de ISHIHARA, 1996)

2.4.3.2. Confinamento

Em termos gerais, o incremento na pressão de confinamento, seja em condição isotrópica (Figura 2.18 a) ou em condição anisotrópica segundo uma trajetória K_0 (Figura 2.17) acarreta, seja o incremento na tensão cíclica necessária para atingir mobilidade cíclica (representação para um mesmo número de ciclos) (CASTRO; POULOS, 1977), ou também como determinado por Ishihara (1996) o incremento no número máximo de ciclos para liquefação inicial.

No entanto, na representação fornecida na Figura 2.18 b vê-se uma diminuição no efeito da tensão desvio com o incremento do confinamento para níveis iguais de densidade relativa.

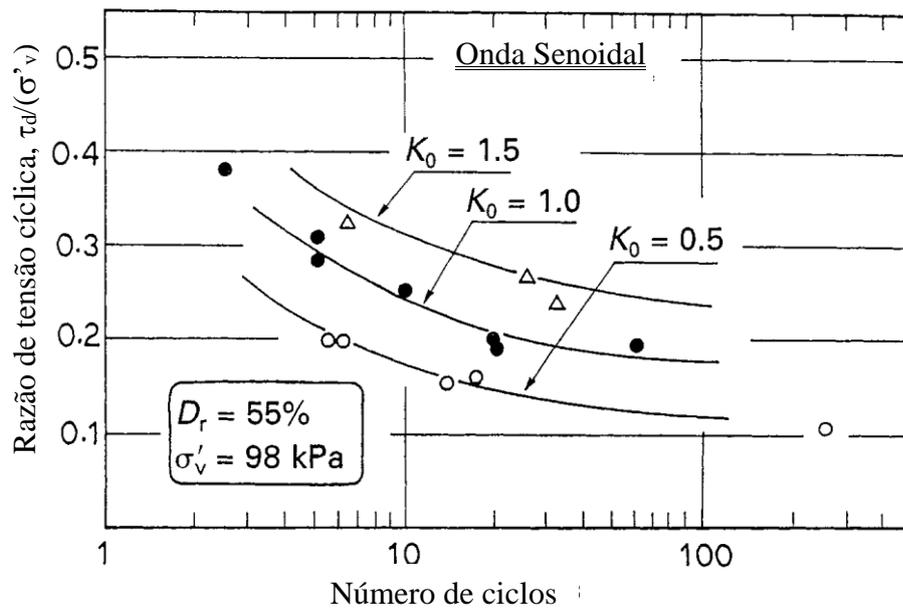


Figura 2.17: Efeito da consolidação anisotrópica (K_0) na resposta cíclica de areias medianamente fofas (Modificado de ISHIHARA, 1996)

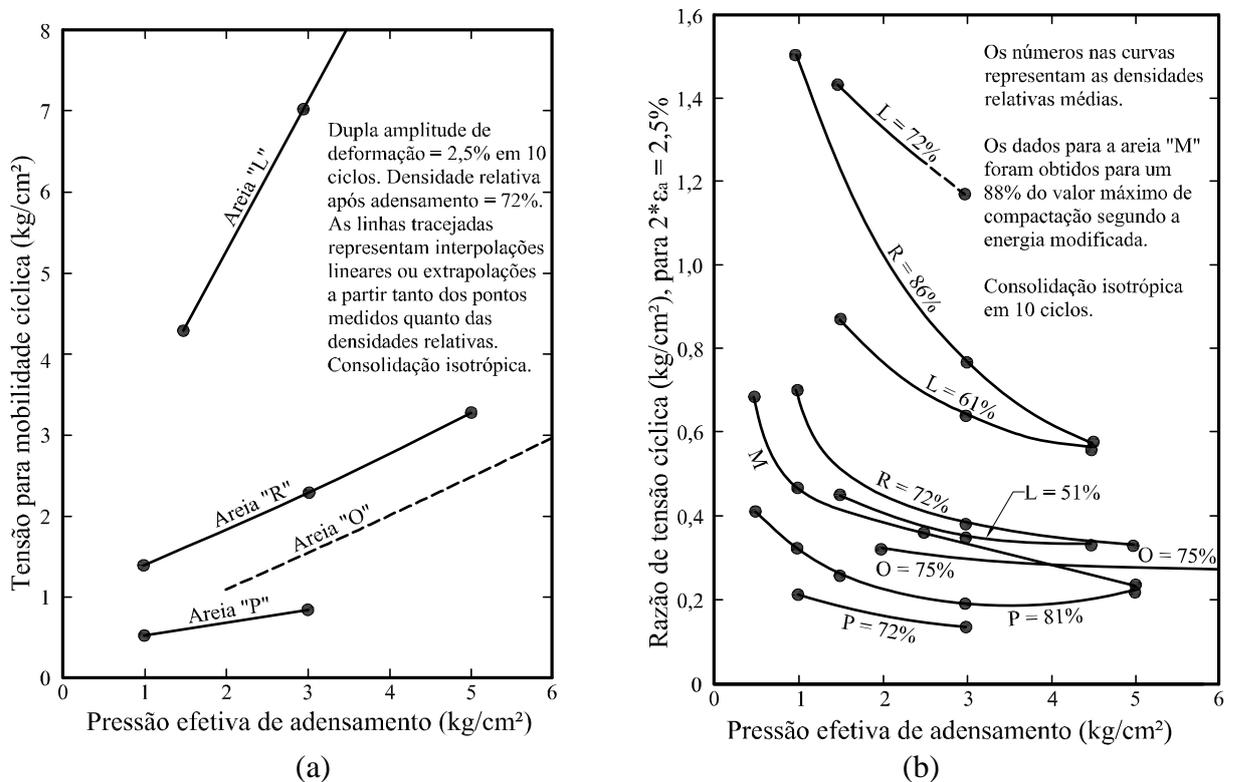


Figura 2.18: Efeito da pressão de confinamento nas tensões necessárias para gerar mobilidade cíclica com dupla amplitude de deformação 2,5% em 10 ciclos para quatro areias distintas: (a) tensão desvio máxima; (b) tensão desvio normalizada pela pressão de confinamento (Modificado de CASTRO E POULOS, 1977)

2.4.3.3. Presença de finos

O estudo da presença de finos nos solos arenosos tem se centrado, mais do que no efeito do teor de solo, no efeito decorrente da plasticidade do material fino.

Na Figura 2.19 é apresentada a tendência de incremento na resistência cíclica de uma areia com um teor de finos de 30% em média, sendo que o incremento no índice de plasticidade do material misturado à areia melhora o comportamento do solo, desde que o valor do IP esteja acima de 10%. É importante apontar sobre a grande dispersão exibida pelos resultados, o que faz discutível a aplicação da curva como parâmetro de projeto, como apontado por Ishihara (1993).

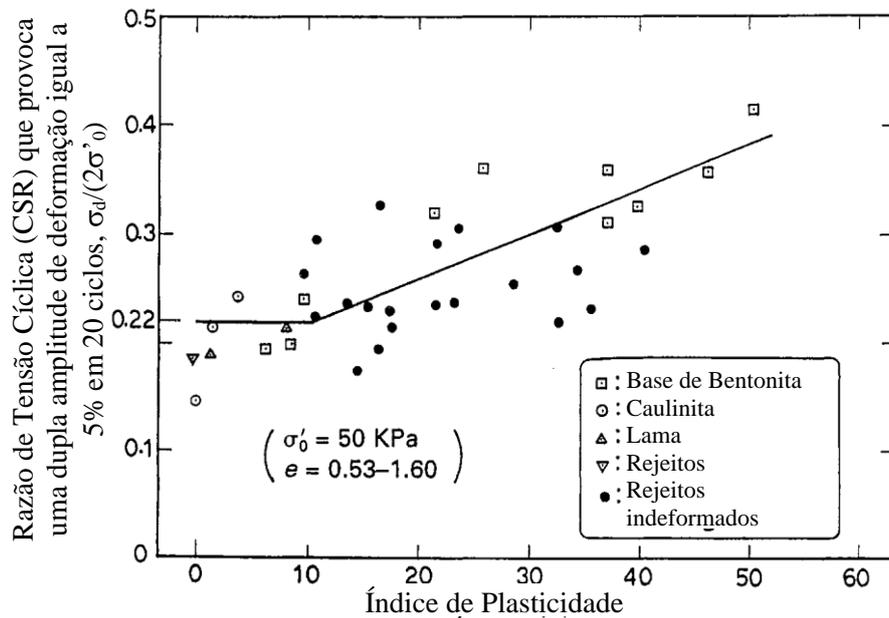


Figura 2.19: Efeito do índice de plasticidade na resposta cíclica em areias com presença de finos (Modificado de ISHIHARA, 1985)

2.4.3.4. Critério de ruptura

Em relação ao critério de ruptura para areias fofas, o súbito incremento nas deformações acompanhado do incremento de 100% nas poropressões permite definir de menor dificuldade a condição de ruptura por liquefação. Em termos do valor da dupla amplitude de deformação, o critério tem variado ao longo do tempo, começando em 3% da amplitude simples de deformação (ISHIHARA, 1985) e sendo atualmente considerado 5% da dupla amplitude (ISHIHARA, 1996)

Em areias compactas pode acontecer que, ainda que ocorra um acúmulo de deformações conforme o descrito no anterior parágrafo, as deformações não cheguem ainda no 100% do

valor máximo. Neste caso, aceita-se o critério de 5% da dupla amplitude caso ainda o material expresse algum tipo de resistência, ainda após ter atingido a condição de mobilidade cíclica.

Na Figura 2.20 são apresentadas algumas curvas de resistência para um mesmo material em função do critério de ruptura em termos da amplitude de deformação adotada.

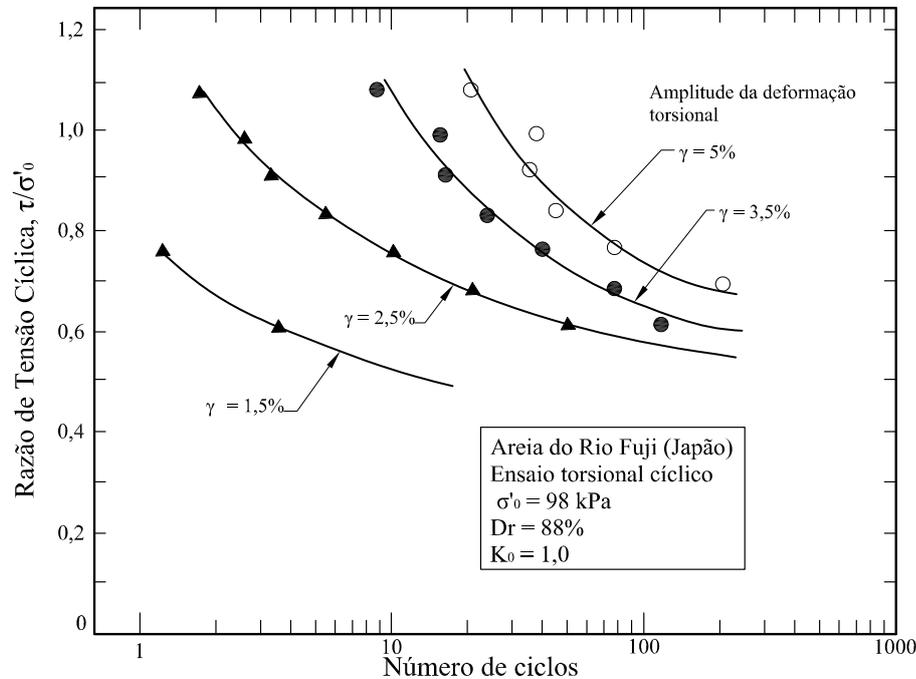


Figura 2.20: Comportamento cíclico de uma areia compacta em função do critério de ruptura (amplitude da deformação torsional) (Modificado de ISHIHARA, 1985)

Outro critério corresponde à definição de um valor de CSR necessário para o corpo de prova atingir um estado de liquefação inicial considerando um número de ciclos específico, tipicamente entre 10 e 20 (ISHIHARA, 1996).

2.4.3.5. Analogias entre comportamento monotônico e cíclico

Diversos estudos têm confirmado a relação entre ambos os comportamentos (CASTRO, 1969; ALARCON-GUZMAN et al., 1988), sendo que alguns relacionam o limite para o carregamento cíclico diretamente com a envoltória de resistência do material (O'REILLY; BROWN, 1991) (ver Figura 2.21), entendendo-o como a fronteira de ruptura para o material por liquefação ou mobilidade cíclica.

Estudos desenvolvidos por Alarcón-Guzman (1988) mostraram que para as condições estudadas (ver

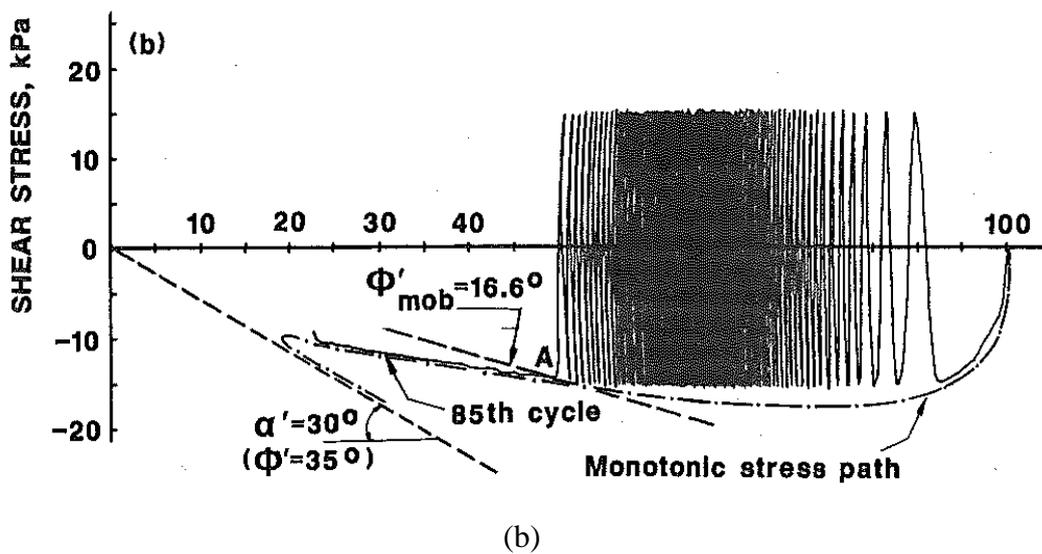


Figura 2.22 (Continuação): Comportamento sob carregamento torsional, em condição monotônica e cíclica não uniforme (ALARCON-GUZMAN et al., 1988)

As observações de Alarcón-Guzman (1988) tiveram sua origem na comparação entre ensaios cíclicos e monotônicos, sendo que para o caso dos últimos foi imposta uma trajetória de extensão axial, obtendo-se correspondência entre o ponto de início da ruptura sob condição cíclica, e a trajetória monotônica, e não necessariamente com a envoltória de resistência do material. Para a visualização deste fenômeno, a trajetória de compressão axial teria mostrado a envoltória como o único limite, como apresentado na Figura 2.22 a.

), ainda que o carregamento cíclico não consiga ultrapassar a envoltória de resistência do material, o comportamento está limitado pela trajetória monotônica, sendo que, caso o material a ultrapassasse, é neste ponto que ocorrerá a ruptura do solo.

Após a ruptura cíclica ser atingida, o material terá a tendência de descrever sua trajetória acima da envoltória de resistência, seja na condição de compressão ou de extensão.

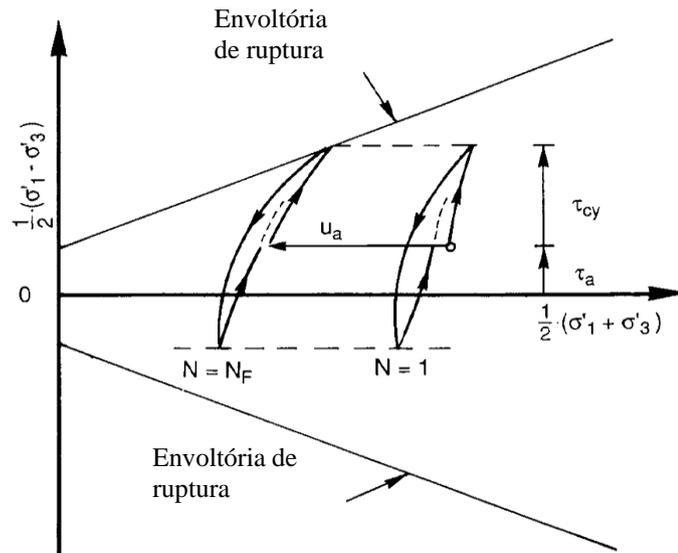


Figura 2.21 :Trajetórias de tensões efetivas para um elemento de solo levado à ruptura sob carregamento cíclico (Modificado de O'REILLY E BROWN, 1991)

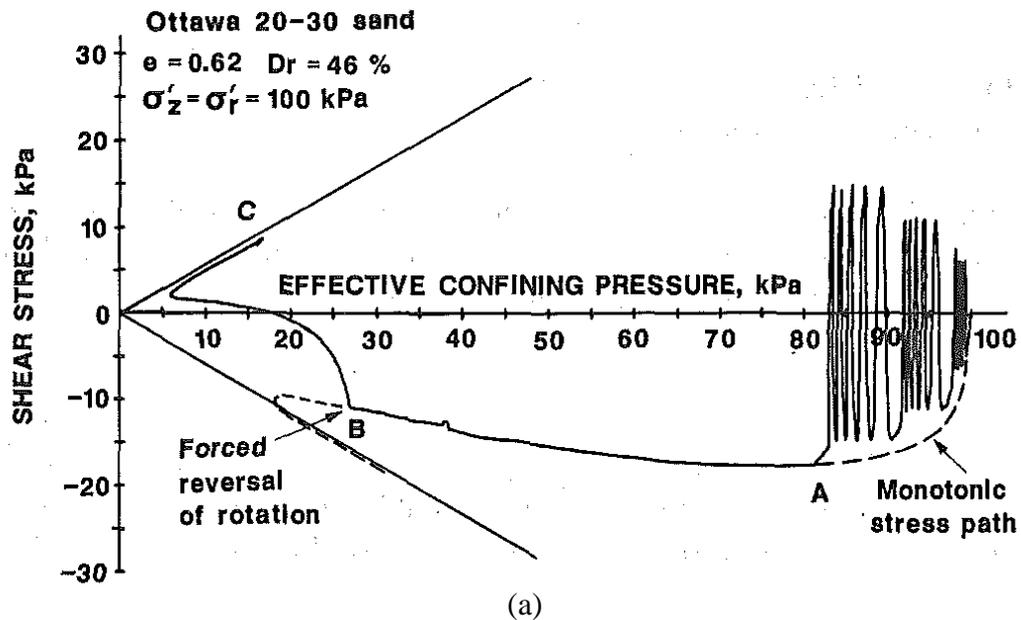


Figura 2.22: Comportamento sob carregamento torsional, em condição monotônica e cíclica não uniforme (ALARCON-GUZMAN et al., 1988)

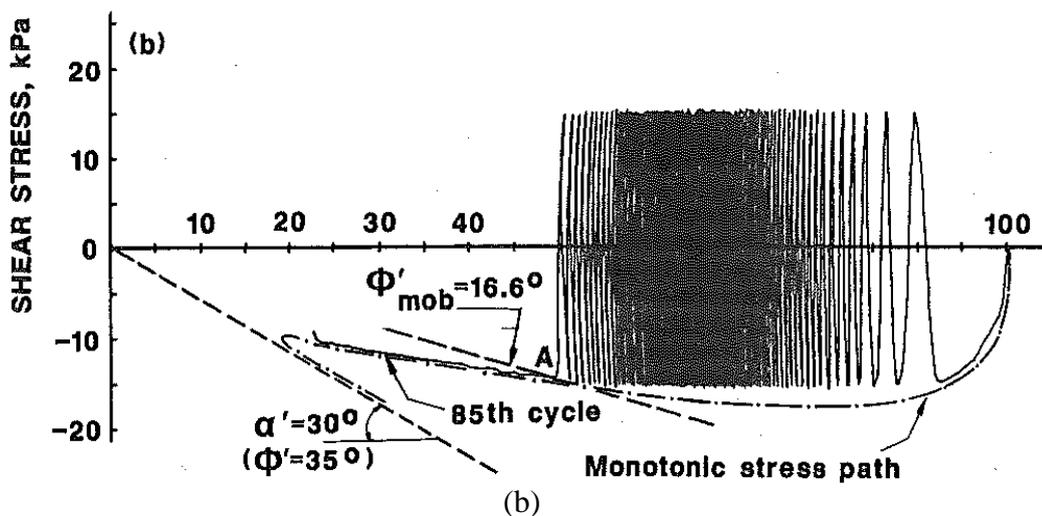


Figura 2.22 (Continuação): Comportamento sob carregamento torsional, em condição monotônica e cíclica não uniforme (ALARCON-GUZMAN et al., 1988)

As observações de Alarcón-Guzman (1988) tiveram sua origem na comparação entre ensaios cíclicos e monotônicos, sendo que para o caso dos últimos foi imposta uma trajetória de extensão axial, obtendo-se correspondência entre o ponto de início da ruptura sob condição cíclica, e a trajetória monotônica, e não necessariamente com a envoltória de resistência do material. Para a visualização deste fenômeno, a trajetória de compressão axial teria mostrado a envoltória como o único limite, como apresentado na Figura 2.22 a.

2.5. ESTUDOS EM SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Maher e Woods (1990) avaliaram o efeito da inclusão de vários tipos de fibras através de ensaios de coluna ressonante e ensaios de cisalhamento torsional em areia reforçada com fibras. No estudo foram considerados vários tipos de fibras, desde naturais de baixo módulo (cana), até de alto módulo como fibra de vidro. Também foram consideradas várias geometrias de fibra, orientação e teor.

Até então, só se tinha informação dos trabalhos desenvolvidos por Uzdavines (1987) e por Noorany e Uzdavines (1989), nos quais foram estudados os efeitos do emprego de fibras como reforço de uma areia saturada em seu potencial de liquefação. Nestes estudos foram utilizados quatro tipos de reforços distintos: tecido de polipropileno, malha de arame de aço fino, rede de nylon e fibras de polipropileno. A conclusão do estudo foi que, as amostras reforçadas com fibras de polipropileno com distribuição aleatória foram as que apresentaram o melhor comportamento ante liquefação (Figura 2.23).

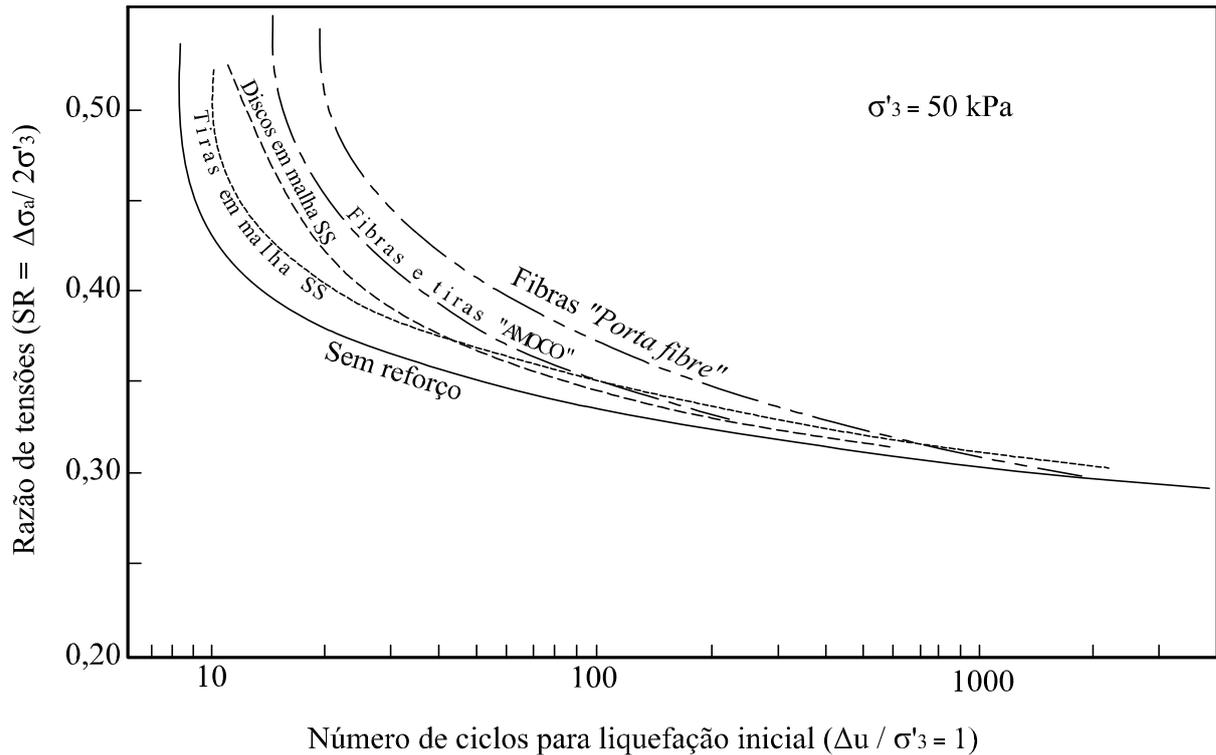


Figura 2.23: Comparação da relação de tensão versus o número de ciclos para liquefação inicial: curvas obtidas a partir de ensaios cíclicos de amostras reforçadas com vários materiais e não reforçadas (Modificado de UZDAVINES, 1987)

O estudo desenvolvido por Maher e Woods (1990) permitiu concluir que:

- a) o incremento na amplitude das deformações resultou em uma maior contribuição das fibras para o incremento do módulo cisalhante, mas gerou diminuição no aporte das fibras para o amortecimento;
- b) o incremento da pressão de confinamento geralmente ocasionou menor contribuição das fibras ao módulo cisalhante, mas não teve influência no aporte das fibras ao amortecimento;
- c) tanto o módulo cisalhante quanto o amortecimento sofreram incrementos aproximadamente lineares com o aumento no teor de fibra, até um certo valor (neste caso 4%) e depois tenderam a se aproximar a um limite superior assintoticamente;
- d) o incremento na relação de aspecto das fibras (L/d) acarretou maiores contribuições na resposta cíclica da areia;

- e) o incremento no módulo de elasticidade das fibras gerou maiores contribuições ao módulo cisalhante do compósito. Esta influência foi mais evidente para pequenas deformações.

A reposta dinâmica de areias reforçadas com fibras orientadas verticalmente é bastante similar à das areias com distribuição aleatória das fibras.

Shewbridge e Sousa (1991) estudaram o comportamento a areia Monterey através do *Hollow Cylinder*, moldando corpos de prova sem reforço e com a adição de reforço em duas condições: a primeira em um padrão uniaxial, consistente em barras de aço de 3,175 mm localizados na direção vertical; o segundo, em um padrão biaxial, além das barras verticais existiam cinco argolas com o mesmo diâmetro das barra uniaxiais, espaçadas equidistantes ao longo da altura do corpo de prova. Os resultados indicaram que a pressão de confinamento e o nível de deformações afetou o módulo dinâmico e a capacidade amortecimento, porém que estes parâmetros não foram sensíveis às variações de frequência de ensaio. Visualmente, os autores identificaram um aumento na ductilidade do material decorrente da adição dos reforços.

Krishnaswamy e Isaac (1994) estudaram 150 ensaios triaxiais cíclicos em uma areia uniforme, com diferentes densidades relativas e três tipos de reforço posicionado horizontalmente no topo de cada camada: Geotêxtil tecido, não tecido e fibra natural de coco. Todos es ensaios foram executados sob condição não drenada com tensão controlada, seguindo um padrão de carga quadrado e frequência 1 Hz, tensão efetiva inicial 100 kPa.

As principais análises do estudo são apresentadas a seguir:

- a) o efeito dos reforços é menor para valores baixos de tensão desvio cíclica;
- b) para baixas densidades relativas encontrou-se um maior efeito dos reforços. Encontraram que, a incorporação de fibras de coco acarretou diminuição na resistência cíclica para densidades relativas elevadas;
- c) o efeito do tipo de reforço na resistência é diretamente relacionado com sua superfície, tendo ocorrido neste caso maior efeito para as fibras naturais de coco do que para as fibras poliméricas;
- d) finalmente encontraram incremento no aporte do reforço com a diminuição na espaçamento entre as mantas conformadas.

Al-Refeai e Al-Suhaibani (1998) estudaram o efeito da incorporação de quatro teores de dois tipos de fibras de polipropileno (0, 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8%) em uma areia de duna na Arábia Saudita,

encontrando que o incremento no teor de fibra trouxe incremento no módulo até um certo valor, permitindo definir um valor ótimo para ambos os tipos de 0,4%. Igualmente, o efeito da adição de fibras na acumulação de deformações, embora tinha diminuído com o incremento da fibra, foi determinado que a partir do teor de 0,4%, a diminuição deixou de ser expressiva.

Li e Ding (2002) avaliaram o efeito da adição de dois teores de fibras (0, 0,2 e 0,5%) em um solo siltoso parcialmente saturado quando submetido a ensaios triaxiais cíclicos segundo o procedimento definido para a determinação do módulo de resiliência (AASHTO/T307-99, 2007), porém para cada tensão efetiva inicial (50, 100 e 150 kPa) foi moldado um novo corpos de prova. Sendo que os ensaios foram executados para baixos níveis de deformação, estes foram executados seguindo um procedimento multiestágio, dentro do qual, após um número estabelecido de ciclos foi determinado o módulo de resiliência. Em todos os casos, a tendência de incremento no valor do módulo elástico foi mantida com o incremento no teor de fibra, condição que também ocorreu com o incremento na tensão efetiva inicial no cisalhamento. Em todos os casos teve diminuição do módulo com o incremento no número de ciclos.

Ghiassian *et al.* (2008) avaliaram o comportamento dinâmico da areia de origem japonesa padronizada Toyoura, mediante ensaios triaxiais cíclicos sob deformação controlada. As fibras utilizadas foram obtidas cortando um geotêxtil para obter duas relações de aspecto: 3 e 9, correspondentes a uma largura de 5 mm e comprimentos de 15 e 25 mm respectivamente. Os teores de fibra ensaiados foram 0.25, 0.5 e 0.75% em relação à massa de solo seco e do índice de aspecto dos reforços. Os resultados foram comparados à condição sem fibras. A frequência de carregamento variou entre 0,05 e 0,01 Hz. Foram moldados corpos de prova de 300 mm de diâmetro e 600 mm de altura.

Os autores concluíram que a resposta dinâmica das misturas, avaliada pelo módulo de deformação cisalhante, é função direta das características do reforço. Quanto maiores os teores de fibra analisados e seus índices de aspecto, mais benéfica é a resposta dinâmica.

Ghiassian e Ghazi (2009) estudaram um solo arenoso de origem iraniano. Ensaio triaxiais não drenados com deformação controlada para um solo arenoso de origem iraniano. As fibras foram obtidas com um processo semelhante ao seguido no estudo desenvolvido por Ghiassian *et al.* (2008). Os índices de aspecto testados foram 1 e 3, correspondentes a comprimentos de 5 e 15 mm. Os teores de fibras estudados foram 0.4 e 0.8%. Foram moldados corpos de prova com 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura.

Coelho (2008) avaliou o efeito da adição de fibras em um material composto por argila e resíduo

de mineração. Foram feitos vários tipos de ensaio, interessando para o presente estudo os ensaios de módulo de resiliência. A adição das fibras diminuiu a resposta resiliente do material, fazendo o material menos rígido e com maior potencial de desenvolver deformações permanentes.

Samal (2011) estudou o comportamento de uma areia uniforme com a adição de 0,5% de fibras de polipropileno mediante ensaios de bloco de ressonância e ensaios cíclicos de placa. Segundo o autor, a adição de fibras gerou, ainda que não muito expressiva, diminuição na frequência de ressonância do material e incremento nas amplitudes máximas de vibração. Os ensaios de placa revelaram diminuição nos deslocamentos pela adição de fibras.

Ghiassian *et al.* (2012) estudaram os mesmos materiais do estudo desenvolvido por Ghiassian e Ghazi (2009), mas os teores de fibra considerados foram 0.5 e 1%. Foram executados ensaios triaxiais cíclicos com tensão controlada, multiestágios, com uma frequência de 0.5 Hz e quatro pressões de confinamento foram definidas (25, 100, 400 e 700 kPa). Os efeitos da incorporação das fibras são visíveis para as maiores pressões de confinamento avaliadas (700 kPa). Os valores dos módulos secantes obtidos para as amostras com fibra foram sempre inferiores quando comparados à condição sem fibra, sendo que em todos os casos foram avaliadas deformações axiais abaixo de 0,20%.

Maheshwari *et al.* (2012) estudaram a resistência à liquefação de uma areia uniforme na mesa vibratória, avaliando o efeito da inclusão de geogrelhas, fibras de coco e sintéticas. Foram consideradas três combinações para a geogrelha (3, 4 e 5 camadas). No caso das fibras, foram considerados teores de 0.25, 0.5 e 0.75%. A densidade relativa em todos os casos foi de 25%. A frequência de carregamento foi mantida constante em 5 Hz, e a amplitude foi variada entre 0.1 e 0.4g. Para cada teste foram aplicados 200 ciclos de carga.

Em todos os casos, os incrementos na resistência à liquefação foram maiores para a menor aceleração (0.1g). Ao comparar os três materiais de reforço, as fibras tiveram o melhor desempenho, com incrementos acima de 88% para as fibras sintéticas e 91% para as fibras de coco. Já as geogrelhas trouxeram incremento na resistência de 31%.

Outros estudos com a mesma areia foram conduzidos por Mittal e Chauhan (2013), empregando 4 níveis de geogrelhas horizontais e uma sobrecarga de 5.94 kPa. Foram executados ensaios na mesa vibratória com acelerações entre 0.1 e 0.3g, com frequência constante de 4 Hz, e um tempo de ensaio de 15 segundos. As amostras foram compactadas até densidades relativas de 35, 50 e 65%. A resistência à liquefação decorrente da adição das geogrelhas teve incrementos

acima de 17% para $D_R = 30\%$, e entre 12 e 25% para as duas densidades restantes.

Qiu e Zhang (2014) estudaram o efeito de reforços orientados em areias. Foram executados ensaios triaxiais cíclicos em areia em condição saturada. O reforço foi feito com peças de metacrilato de polimetilo com formato de flor de 8 pontas, seguindo dois padrões de orientação: horizontal e horizontal-vertical. O adensamento dos corpos de prova foi feito sob condições anisotrópicas, seguindo um K_c de 2.

Tanto para amostras não reforçadas como para reforçadas, o módulo diminuiu com o aumento na deformação cíclica. Para uma mesma deformação cíclica, o padrão de inclusões horizontal-vertical pode gerar maior melhoria do que o padrão horizontal. Com o aumento da tensão cíclica houve aumento da porosidade e aumento da poropressão, o que explica a diminuição da rigidez da areia sob carga cíclica.

Noorzad e Fardad Amini (2014) avaliaram o efeito da inclusão de fibras em uma areia uniforme através de ensaios triaxiais cíclicos sob tensão controlada, em dois níveis de compactação, com e sem a adição de fibras de polipropileno de 0.023 mm de diâmetro e vários comprimentos (6, 12 e 18 mm). Foram moldados corpos de prova com teor de fibras de 0.5 e 1% em relação ao peso seco da areia. Foi aplicado um padrão senoidal de carga com frequência de 1 Hz, e foram consideradas três tensões efetivas iniciais: 50, 100 e 200 kPa. A presença de fibras teve um efeito significativo na redução da susceptibilidade à liquefação, motivado tanto pelo teor como pelo comprimento das fibras. O máximo efeito foi conseguido para o maior teor de fibras, maior densidade relativa e maior comprimento de fibras. Tanto a pressão de confinamento como a densidade relativa tiveram um efeito direto no incremento da resistência à liquefação.

O incremento no teor de fibras gerou redução na taxa de diminuição do módulo cisalhante decorrente da liquefação, situação causada também pelo incremento na pressão de confinamento. O comprimento das fibras não teve efeito sobre a diminuição do módulo cisalhante. O valor de $G_{\text{máx}}$ foi afetado positivamente pela inclusão de fibras. Finalmente foi determinado que o módulo cisalhante é fortemente dependente da densidade relativa.

Festugato *et al* (2015) avaliaram o efeito da adição de fibras de polipropileno em um resíduo de mineração de ouro cimentado através de ensaios de cisalhamento puro (*Simple Shear*) não drenado em condição monotônica e cíclica em tensão e deformação controlada, considerando um teor de 0,5% de fibras.

Nos ensaios executados sob tensão controlada, a resposta cíclica, e termos do número máximo de ciclos teve incremento. Para os ensaios executados sob deformação controlada não foi

observada melhoria nenhuma. Mantendo a relação entre tensão cíclica e tensão vertical inicial constante, quando incrementada tensão cíclica ocorreu redução na resistência do material, tanto para a condição sem fibras quando com elas. A mesma situação aconteceu com a rigidez do material.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Ao longo do presente capítulo são apresentadas as informações referentes a materiais, procedimentos de preparação e condições pontuais da execução dos ensaios, necessárias para a caracterização das diferentes misturas propostas.

A caracterização mecânica foi feita através da execução de ensaios triaxiais, sendo que para cada tipo de mistura ou grau de compactação definido, foram obtidos tanto os parâmetros decorrentes de carregamento estático, assim como de carregamento cíclico.

Também são incluídos os parâmetros de classificação assim como a composição química da areia de referência empregada para a validação do equipamento de ensaio.

3.1. VARIÁVEIS INVESTIGADAS

Vários autores têm identificado efeitos no comportamento tensão–deformação de compósitos reforçados com fibras relacionados à matriz (granulometria, índice de vazios, umidade, entre outros), assim como ao reforço (módulo, índice de aspecto, espessura, rugosidade, orientação, teor e formato).

Sem desconhecer a importância destes fatores, mas visando delimitar o trabalho proposto no presente estudo, o programa experimental proposto foi restrito ao estudo de um tipo de solo, um tipo de fibra, dois teores de fibra e duas densidades relativas. A escolha destas variáveis e das condições de compactação baseou-se em estudos já realizados (CASAGRANDE, 2001, 2005; HEINECK, 2002; VENDRUSCOLO, 2003; CRUZ, 2008; FESTUGATO, 2008, 2009, 2011; SACHETTI, 2014). Alguns dos resultados obtidos nesses estudos são citados para a realização de comparações e análises com os ensaios executados no presente trabalho.

Esta informação permitiu a definição dos efeitos decorrentes da incorporação de fibras, em um solo granular fino quando solicitado dinamicamente. Objetiva-se visualizar não apenas a resistência última dos materiais, mas também o comportamento das misturas ao longo do ensaio.

A seguir, no Quadro 3.1 são apresentadas as condições de compactação e os tipos e dosagens para as diferentes misturas avaliadas no presente estudo. Nos quadros 3.2 e 3.3 são identificados os tipos de ensaio, as condições de execução e a quantidade de amostras avaliadas.

Quadro 3.1. Misturas e dosagens avaliadas

| e | % Fibras |
|------|----------|
| 0,75 | 0 |
| | 0,5 |
| 0,63 | 0 |
| | 0,5 |

Os índices de vazios definidos correspondem a densidades relativas de 50% e 90% respectivamente para as misturas sem adição de fibras, permitindo avaliar o comportamento do material sob condições de densidade média e compacta avaliando o efeito das fibras em cada caso, tanto sob carregamentos monotônicos quanto cíclicos.

Os ensaios de compressão triaxial estáticos foram realizados em uma matriz arenosa, com e sem incorporação de fibras. Os ensaios são baseados na variação da tensão confinante efetiva média inicial (20, 50, 100 e 200 kPa). Em todos os casos foram executados ensaios monotônicos CID (consolidados isotropicamente e drenados) e CIU, assim como ensaios cíclicos CIU sob tensão controlada. A escolha das variáveis fixas é baseada nos valores que apresentaram melhores desempenhos em estudos anteriores (CASAGRANDE, 2005; CRUZ, 2008; FESTUGATO, 2008, 2009, 2011).

A partir dos ensaios sob condição monotônica de carga (ver Quadro 3.2) foram obtidas as curvas de resistência, deformação volumétrica e geração de poropressões em relação à deformação axial, assim como as trajetórias de tensão. Com estas informações foram obtidos os parâmetros de resistência, ângulo de atrito interno ϕ' e intercepto coesivo c' , tanto a partir dos ensaios drenados quanto dos não drenados, o que será discutido no Capítulo 5.

Conforme o Quadro 3.2, para o caso dos ensaios monotônicos, foram executados um total de 24 ensaios, sendo nove dentro do presente estudo, e os restantes como parte do estudo de Festugato (2011), de maneira a caracterizar principalmente as misturas com inclusão de fibras. A execução dos ensaios seguiu as definições das normas ASTM D-7181 (2011) no que concerne aos ensaios consolidados e drenados, e ASTM D-4767 (2011) para os ensaios sob condição consolidada e não drenada.

No caso dos ensaios triaxiais cíclicos, as condições de execução foram escolhidas conforme o

estipulado pela norma ASTM D-5311 (2011). Os resultados iniciais correspondem aos números de ciclos de carga até a ruptura das amostras. Foram feitas comparações através de normalizações entre os materiais no que diz respeito ao comportamento até a ruptura. Os ensaios foram executados considerando pressões confinantes efetivas iniciais de 100 e 200 kPa, tensões desvio variáveis e uma frequência igual a 0,1 Hz. Conforme a norma de ensaio, o formato da onda de carregamento foi senoidal em todos os casos.

Quadro 3.2. Programa de ensaios triaxiais CID e CIU monotônicos

| Matriz | DR% ou (e) | Tensão confinante efetiva inicial (kPa) | CIU | CID | Total |
|---------------|-------------------|--|------------------|------------------|--------------|
| Areia | 50 (0,75) | 20 (50 ⁽¹⁾), 100 e 200 | 3 | 3 ⁽¹⁾ | 6 |
| | 90 (0,63) | 20, 100 e 200 | 3 | 3 ⁽¹⁾ | 6 |
| Areia - Fibra | 50 (0,75) | 20, 100 e 200 | 3 ⁽¹⁾ | 3 ⁽¹⁾ | 6 |
| | 90 (0,63) | 20, 100 e 200 | 3 | 3 ⁽¹⁾ | 6 |

(1) Resultados obtidos por Festugato (2011)

Segundo o apresentado no Quadro 3.3, foram executados no total 20 ensaios cíclicos. Nesta lista não foram incluídos os ensaios correspondentes ao processo de validação do equipamento, discutidos dentro do capítulo 4.

Quadro 3.3. Programa de ensaios triaxiais CIU cíclicos

| Matriz | DR (%) | p'₀ (kPa) | Tensão desvio cíclica (± kPa) | Total |
|---------------|---------------|------------------|--------------------------------------|---------------|
| Areia | 50 | 100 | 20, 40, e 60 | 3 |
| | 90 | | 40, 60, 80 e 100 | 4 |
| | | | 200 | 80, 120 e 160 |
| Areia – Fibra | 50 | 100 | 20, 40, e 60 | 3 |
| | 90 | | 40, 60, 80 e 100 | 4 |
| | | | 200 | 80, 120 e 160 |

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

Nos itens subsequentes são apresentadas informações a respeito dos materiais empregados no preparo dos corpos de prova.

3.2.1. Areias

As areias selecionadas para o presente estudo correspondem a materiais largamente caracterizados em diferentes pesquisas, sendo que a primeira em ser apresentada correspondeu ao material com que foi executado a totalidade do programa experimental descrito, e a segunda foi estudada como parte do processo de validação do equipamento triaxial já desenvolvido porém complementado para a execução de carregamentos cíclicos.

3.2.1.1. Areia de Osório

Este material provém de uma jazida localizada no município de Osório – Rio Grande do Sul (ver Figura 3.1). O material é classificado como areia fina (NBR-6502, 1995; ASTM-D2487, 2011), limpa e de granulometria uniforme, proveniente de depósitos praias marinhos e eólicos, assim como do retrabalhamento eólico atual da região costeira do Estado do Rio Grande do Sul (SPINELLI, 1999). A curva granulométrica do material, apresentada na Figura 3.4, foi determinada através de procedimento a laser no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (FESTUGATO, 2008), a qual corresponde com o material que foi empregado nesta pesquisa.



Figura 3.1: Localização do município de Osório dentro do Estado do Rio Grande do Sul (Fonte: Wikipedia).

A partir da observação de distintas frações da areia mediante a lupa binocular, Spinelli (1999) fez a determinação da composição mineralógica, sendo o quartzo o mineral predominante em todas as frações (ver Quadro 3.4). Não foi observada a presença de matéria orgânica (ver Quadro 3.5).

Quadro 3.4. Análise da fração grosseira dos minerais – Areia de Osório (SPINELLI, 1999)

| Mineral | % | Peneira (mm) |
|--|----------------------------------|---------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Quartzo. • Outros minerais. | <p>99,5 0,5</p> | 0,250 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Quartzo. • Nucleação de argilas sem grãos de quartzo. • Grãos tingidos por ferro. • Glauconita. • Ilmenita. • Turmalina. • Magnetita | <p>99,2 0,8</p> | 0,125 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Quartzo. • Ilmenita. • Turmalina escura. • Magnetita. • Turmalina clara. • Zircão. • Glauconita. | <p>97,5 2,0 0,5</p> | 0,062 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Quartzo. • Agregados de argilo minerais, micas, agregados férricos (ou microconcreções) | <p>60 40</p> | Fundo |

Quadro 3.5. Análise físico - química da areia de Osório (SPINELLI, 1999)

| Parâmetro | Valor |
|--|--------------------------------------|
| pH | 5,90 |
| Matéria orgânica | 0,00% |
| Condutividade (no momento e após uma hora do preparo das soluções) | 9,80 $\mu\Omega$ e 13,67 $\mu\Omega$ |

Marcon (2005) determinou a composição de uma areia obtida nesta região mediante ensaios de difração de raio-X, tanto para uma amostra que considerou a totalidade da distribuição

granulométrica (ver Figura 3.2), assim como apenas para a fração fina (ver Figura 3.3). Os picos de intensidade confirmaram o observado por Spinelli (1999), sendo o SiO_2 o principal componente presente na forma de quartzo.

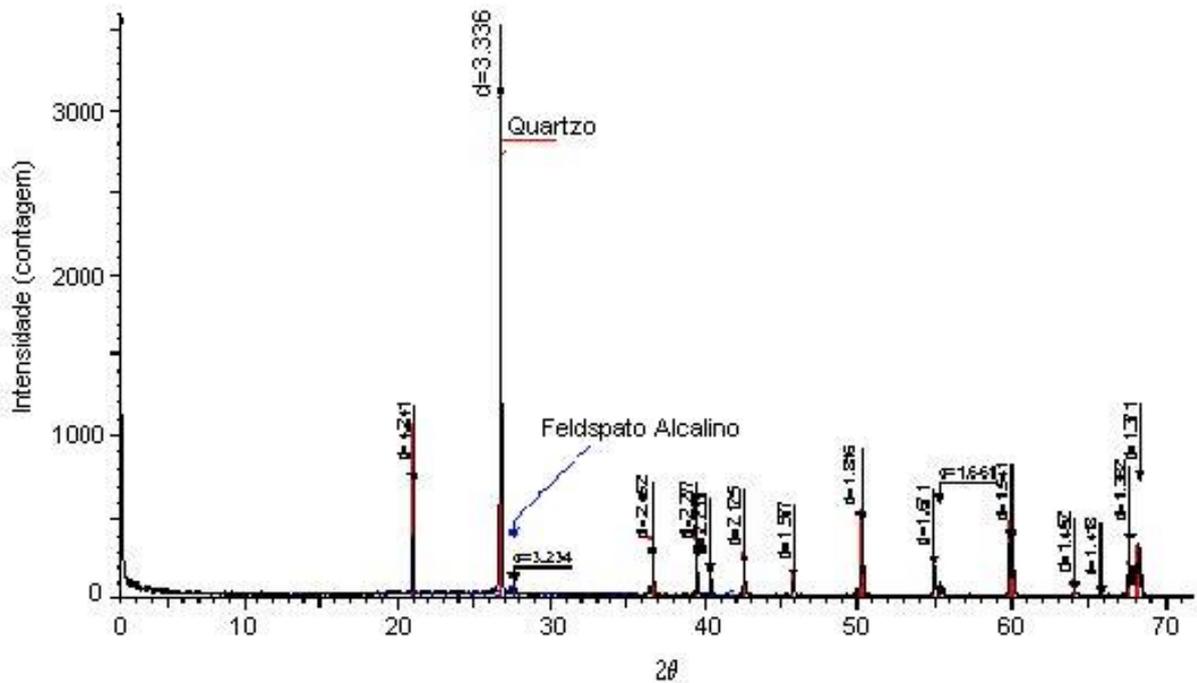


Figura 3.2: Difratograma de amostra de areia de Osório (MARCON, 2005)

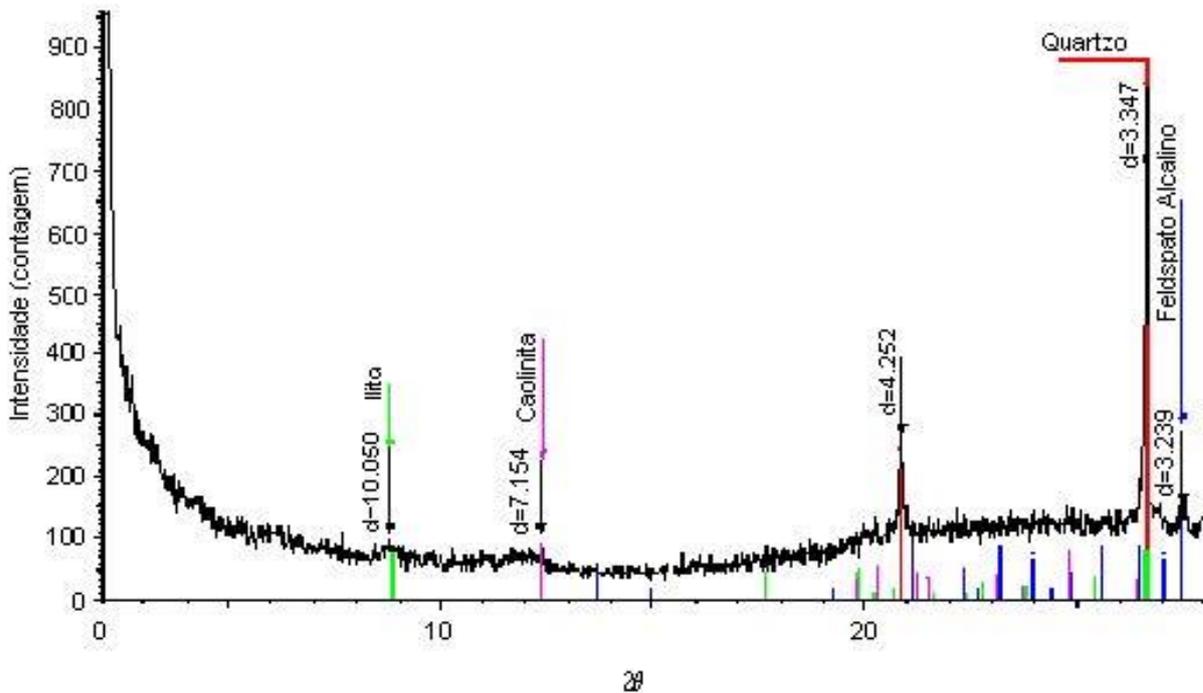


Figura 3.3: Difratograma da fração fina de amostra de areia de Osório (MARCON, 2005)

A distribuição granulométrica para este material corresponde à apresentada na Figura 3.4.

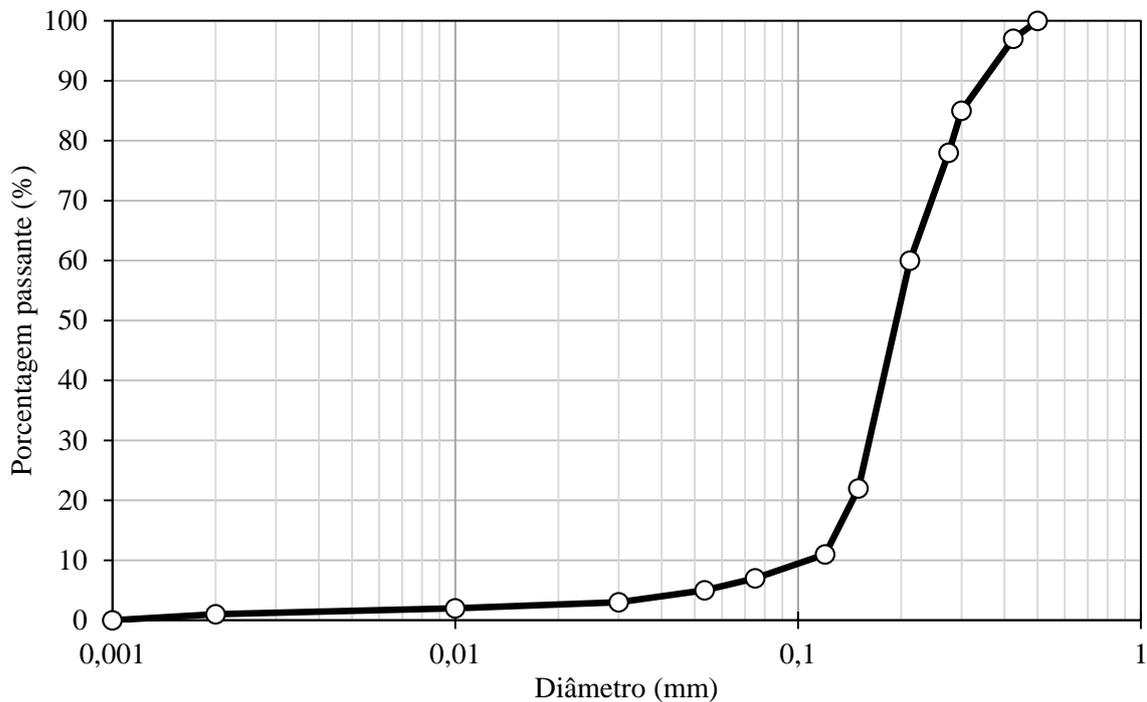


Figura 3.4: Distribuição granulométrica da areia de Osório (FESTUGATO, 2008)

A informação sobre a granulometria mencionada acima foi constatada por Dalla Rosa (2009) através de microscopia eletrônica de varredura (ver Figura 3.5), mostrando uma composição de tamanhos uniforme, e grãos com formatos sub-arredondados, como confirmado pelos índices físicos agrupados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6. Índices físicos da areia de Osório empregada nos ensaios.

| Índice Físico | Valor |
|--|------------------------|
| Massa específica real dos grãos (γ_s) | 26,2 kN/m ³ |
| Coeficiente de uniformidade, C_u | 2,0 |
| Coeficiente de curvatura, C_c | 1,1 |
| Diâmetro efetivo, D_{10} | 0,11 mm |
| Diâmetro médio, D_{50} | 0,20 mm |
| Índice de vazios mínimo, $e_{mínimo}$ | 0,6 |
| Índice de vazios máximo, $e_{máximo}$ | 0,9 |

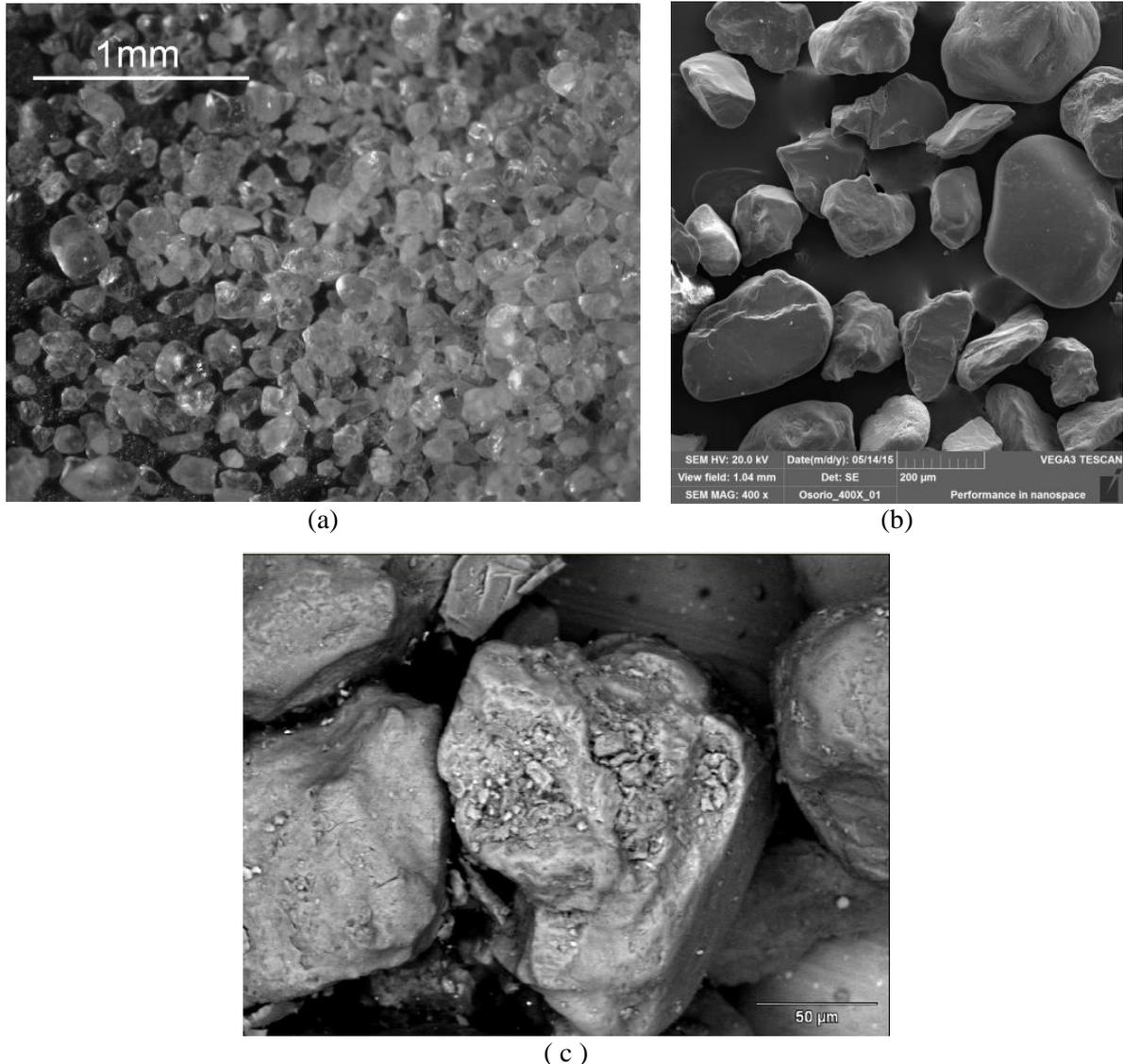


Figura 3.5: Imagens da areia obtidas através de microscopia eletrônica de varredura: (a) 40x; (b) 400x; (c) 500x (DALLA ROSA, 2009).

Diversos autores têm realizado estudos utilizando esta areia (HEINECK, 2002; VENDRUSCOLO, 2003; CASAGRANDE, 2005; CRUZ, 2008; FESTUGATO, 2008, 2009; DALLA ROSA, 2009). As pequenas variações obtidas ao longo dos múltiplos processos de caracterização, permitem concluir sobre a homogeneidade do material dentro da jazida, diminuindo assim uma das fontes de incerteza quando comparados os resultados de ensaios obtidos por diferentes autores ao longo de um período maior de 15 anos (ver Figura 3.6 e Quadro 3.7)

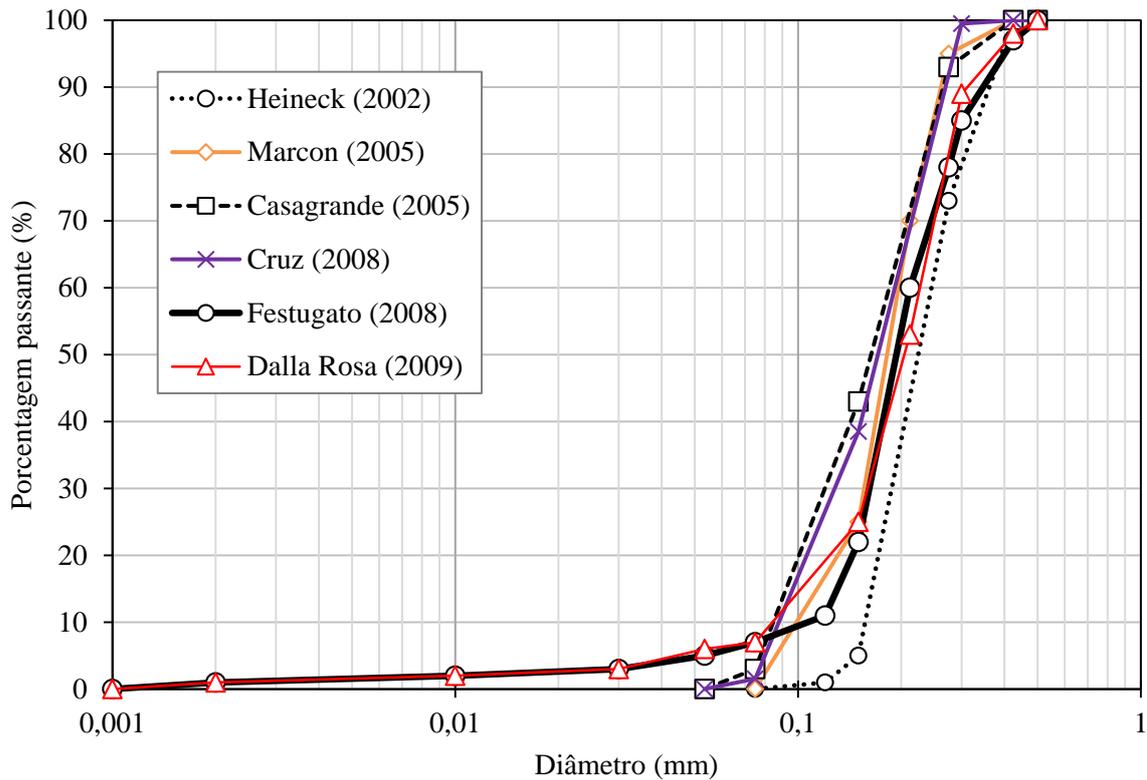


Figura 3.6: Resultados de análises granulométricas conduzidas em areia de Osório

Quadro 3.7. Índices físicos da areia de Osório obtidos por diferentes autores

| Índice Físico | Heineck (2002) | Marcon (2005) | Casagrande (2005) | Cruz (2008) | Festugato (2008) | Dalla Rosa (2009) |
|--|----------------|---------------|-------------------|-------------|------------------|-------------------|
| Massa específica real dos grãos (γ_s) | 2,63 | 2,61 | 2,63 | 2,65 | 2,62 | 2,65 |
| Coefficiente de uniformidade, C_u | 1,9 | 1,8 | 2,1 | 2,11 | 2,0 | 2,11 |
| Coefficiente de curvatura, C_c | 1,2 | - | 1,0 | 1,15 | 1,1 | 1,15 |
| Diâmetro efetivo, D_{10} (mm) | 0,16 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,11 | 0,09 |
| Diâmetro médio, D_{50} (mm) | 0,28 | - | 0,16 | 0,17 | 0,20 | 0,17 |
| Índice de vazios mínimo, $e_{\text{mínimo}}$ | 0,57 | - | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Índice de vazios máximo, $e_{\text{máximo}}$ | 0,85 | - | 0,9 | 0,85 | 0,9 | 0,85 |

3.2.1.2. Areia Hostun RF

Este material, amplamente utilizado como referência em trabalhos sobre a caracterização de materiais granulares em diferentes projetos ao redor do mundo, mas principalmente dentro da Europa.

A fonte do material, de propriedade da empresa SIKA, encontra-se na cidade de Hostun, localizada no departamento de Drôme, região sul-oriental da França (ver Figura 3.7).



Figura 3.7: Localização do Departamento de Drôme, França (Fonte: Wikipedia)

A granulometria do material é o resultado de vários processos de classificação dos materiais extraídos da fonte, tendo sido assignada pelo fabricante a classe “RF” para o tipo de material empregado na maioria das pesquisas conhecidas.

A partir dos diferentes estudos e da avaliação granulométrica para a amostra do material submetida a ensaios, o material se pode classificar como uma área média com grãos sub-angulares a angulares, de cor branca levemente cinzenta (Figura 3.9), com uma composição fundamentalmente quartzosa (99%), depositada em áreas de composição cárstica, o que lhe confere a presença de outros minerais, ainda que de forma pouco expressiva (ver Quadro 3.8).

A distribuição granulométrica da amostra usada foi comparada com a do material empregado no trabalho desenvolvido por Benahmed (2001), sendo ambas as curvas apresentadas na Figura 3.8.

Quadro 3.8. Composição química da arena Hostun RF (FLAVIGNY et al., 1990)

| Composto | Quantidade (%) |
|--|----------------|
| Silica total (SiO ₂) | 99,17 |
| Alumina (Al ₂ O ₃) | 0,25 |
| Óxido de Titânio (TiO ₂) | 0,01 |
| Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃) | 0,17 |
| Óxido de Cálcio (CaO) | 0,14 |
| Óxido de Magnésio (MgO) | 0,14 |
| Óxido de Potássio (K ₂ O) | 0,02 |
| Óxido de Sódio (Na ₂ O) | 0,05 |

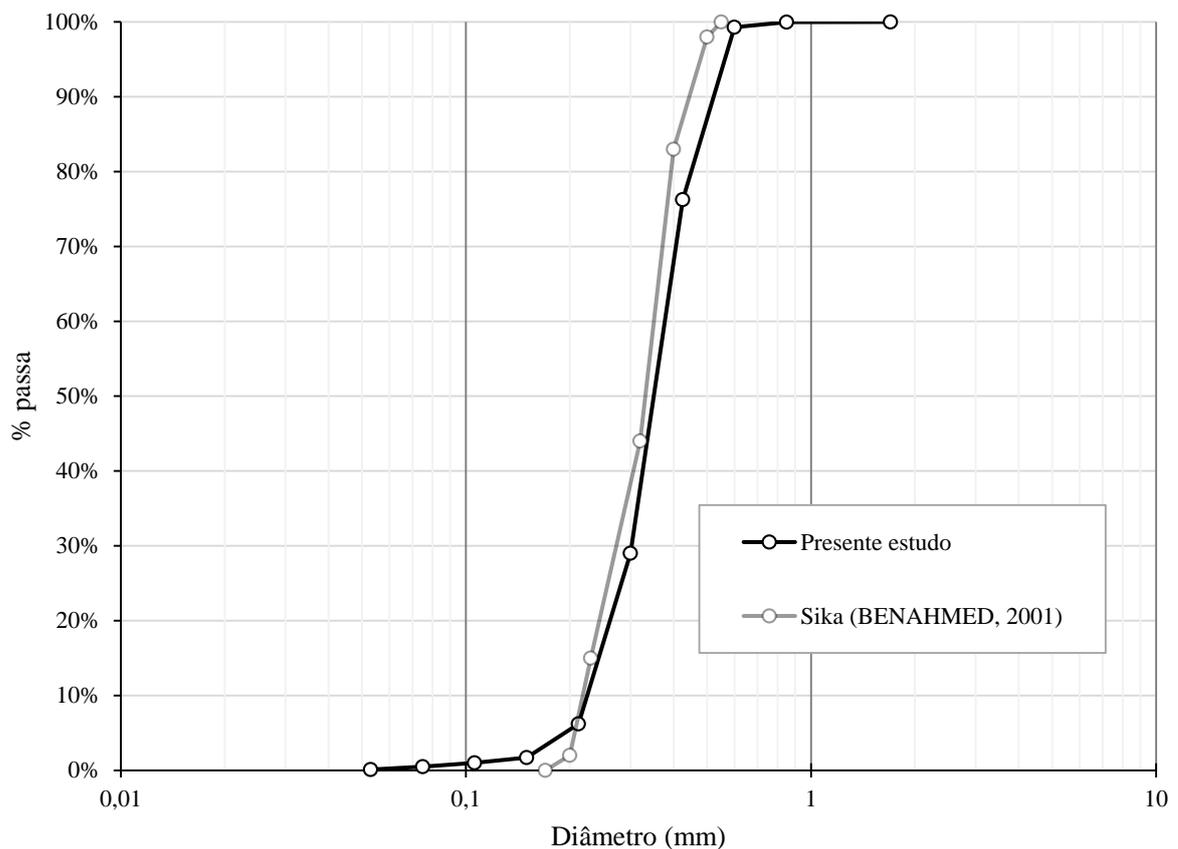


Figura 3.8: Distribuição granulométrica da areia Hostun RF utilizada dentro do presente estudo

O resumo dos índices físicos obtidos da caracterização do material são apresentados no Quadro 3.9, estabelecendo quais valores foram adotados do trabalho de Benahmed (2001) e quais foram determinados a partir da análise granulométrica praticada.

Quadro 3.9. Índices físicos da areia Hostun RF empregada nos ensaios de validação

| Índice Físico | Valor |
|--|----------------------------|
| Massa específica real dos grãos (γ_s) | 26,5 kN/m ³ (*) |
| Coefficiente de uniformidade, C_u | 1,73 |
| Coefficiente de curvatura, C_c | 1,09 |
| Diâmetro efetivo, D_{10} | 0,22 mm |
| Diâmetro médio, D_{50} | 0,35 mm |
| Índice de vazios mínimo, $e_{\text{mínimo}}$ | 0,656 (*) |
| Índice de vazios máximo, $e_{\text{máximo}}$ | 1,0 (*) |

(*) Parâmetros adotados de Benahmed (2001). Os valores restantes foram obtidos a partir da análise granulométrica executada dentro do presente estudo

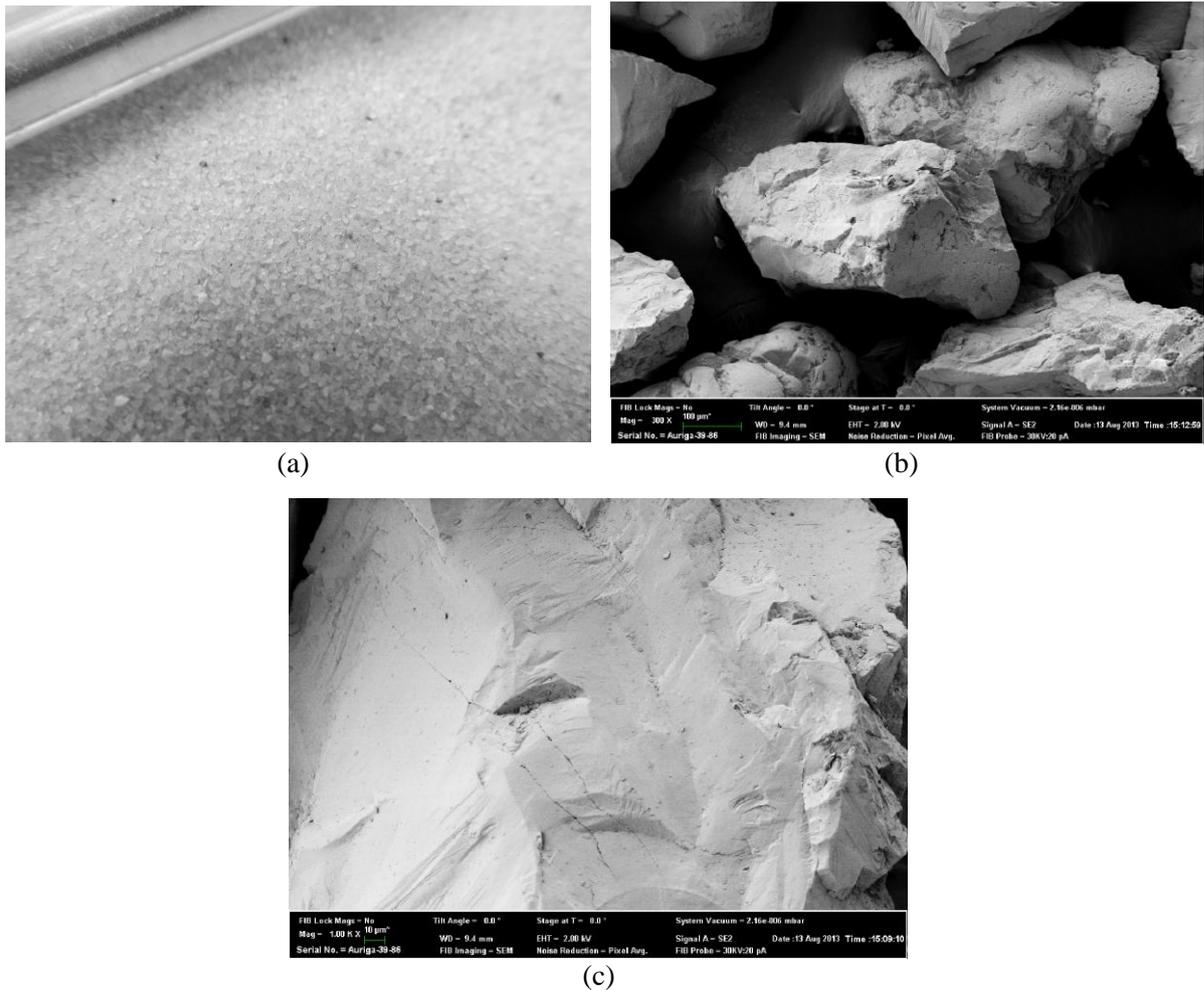


Figura 3.9: Imagens da areia Hostun RF obtidas através de microscopia eletrônica de varredura: (a) fotografia simples – presente estudo; (b) 300x; (c) 1000x (ALSHIBLI, 2013)

3.2.2. Fibras

As fibras utilizadas como elemento de reforço são poliméricas de polipropileno, e estão disponíveis no mercado em forma de pequenos filamentos. Foram escolhidas por apresentarem características uniformes e bem definidas, por serem inertes quimicamente e por estarem disponíveis em grande quantidade no comércio, o que possibilita a extrapolação de resultados para projetos de engenharia.

As fibras de polipropileno são produzidas pela indústria Fitesa Fibras e Filamentos S/A, e utilizadas principalmente na indústria têxtil.

A grandeza que representa a espessura das fibras, na indústria têxtil, é o título, cuja unidade é o dtex (1 dtex = 1 g/10000 m). As fibras utilizadas no presente estudo possuem comprimento de 50 mm, e título de 100 dtex, correspondente ao diâmetro de 0,1 mm. Na Figura 3.10 é apresentado um exemplo das fibras utilizadas, as quais eram desfiadas previamente para facilitar sua incorporação à mistura.

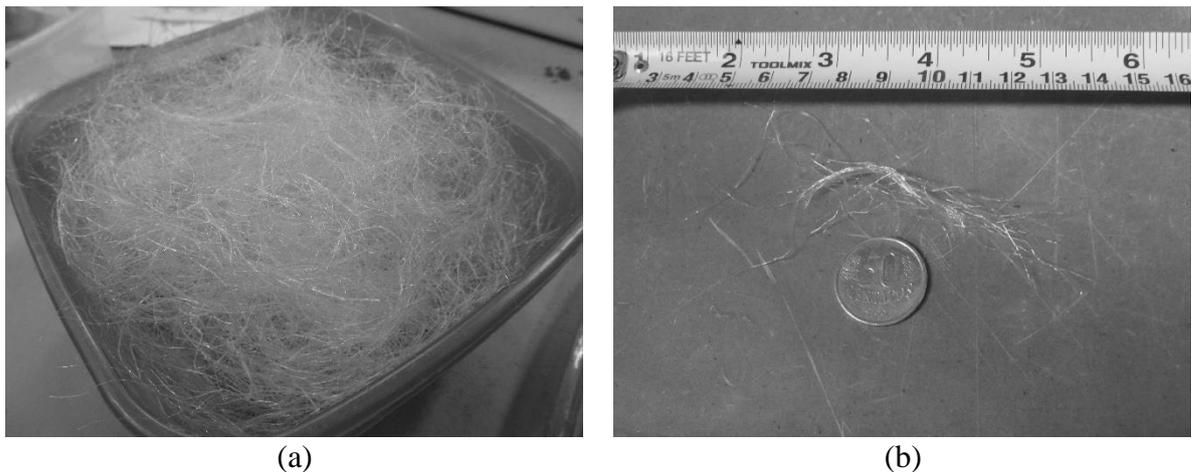


Figura 3.10: Fibras utilizadas antes de serem incorporadas à mistura

As características das fibras utilizadas para a execução do programa experimental são apresentadas no Quadro 3.10.

3.2.3. Água

Água destilada foi utilizada na preparação das amostras e na realização dos ensaios.

Quadro 3.10. Propriedades físicas e mecânicas das fibras empregada nos ensaios (FESTUGATO, 2011)

| Propriedade física e/ou mecânica | Valor |
|---|--------------|
| Espessura | 0,100 mm |
| Comprimento | 50 mm |
| Índice aspecto | 500 |
| Densidade | 0,91 |
| Módulo secante (médio) | 10 GPa |
| Resistência à tração última (média) | 200 MPa |

3.3. PREPARAÇÃO E MONTAGEM DAS AMOSTRAS

A moldagem dos corpos de prova para os ensaios triaxiais foi realizada em um molde tripartido, com dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A geometria final do corpo de prova considerou a espessura da membrana de látex necessária para a execução dos ensaios triaxiais, de 0,5 mm. A altura teve uma diminuição corresponde à espessura da pedra porosa posicionada na base, a qual serviu para o processo de compactação e posicionamento no pedestal da câmara triaxial

A mistura dos materiais era feita a partir da incorporação da quantidade completa de água para alcançar a umidade especificada, seguida pela mistura dos materiais até se obter homogeneização visual. Nos casos de amostras com adição de fibras, estas eram acrescentadas ao solo sempre após a homogeneização da água. Logo após a finalização da mistura, eram coletadas amostras para determinação do teor de umidade.

Os corpos de prova foram compactados em três camadas mediante compressão estática, até atingir um peso específico previamente definido (ver Quadro 3.11), atendendo as recomendações descritas por Ladd (1978) para conseguir homogeneidade no volume compacto.

Quadro 3.11. Condições de compactação definidas para as diferentes misturas avaliadas

| e | % Fibras | γ_d (g/cm³) |
|----------|-----------------|---|
| 0,75 | 0 | 1,497 |
| | 0,5 | 1,483 |
| 0,63 | 0 | 1,607 |
| | 0,5 | 1,592 |

Na Figura 3.11 é apresentada a sequência de montagem do corpo de prova compactado na câmara triaxial. Cada amostra foi compactada dentro da membrana de látex que era usada durante o ensaio triaxial, a qual era fixada ao molde através de fita adesiva nas suas bordas e pela aplicação de vácuo (ver Figura 3.11 a).

A retirada do molde era feita só depois do corpo de prova estar posicionado no pedestal da câmara triaxial, fixado mediante *O-rings* tanto ao pedestal quanto ao cabeçote (Figura 3.11 b a e), e só após a aplicação de um vácuo parcial ao corpo de prova, entre 5 e 7 kPa (Figura 3.11 f e g). A vedação do corpo de prova era garantida só quando o valor aplicado de vácuo conseguia se manter durante o processo de instalação da instrumentação interna (Figura 3.11 h), da câmara triaxial, e do enchimento da mesma.

O contato entre o pistão de carga e o corpo de prova só era feito no início da fase de cisalhamento, o qual tinha como objetivo garantir a aplicação de pressões na condição isotrópica nas etapas prévias do ensaio (Figura 3.11 i).

Para evitar a geração de atrito entre o pistão de carga e o cabeçote do corpo de prova, para cada ensaio foi aplicada uma pequena quantidade de vaselina líquida, e distribuída em toda a superfície de contato das peças (Figura 3.11 k).

Para o caso dos ensaios cíclicos, o enchimento da câmara triaxial foi feito de maneira parcial, garantindo que a totalidade do corpo de prova estivesse submerso, conforme recomendação da norma ASTM D-5311 (2011) (Figura 3.11 j). O propósito dessa recomendação era evitar variações rápidas na pressão de confinamento, principalmente quando o corpo de prova sofresse grandes deformações em pouco tempo, diminuindo também o risco de danificar o acrílico da câmara. Nos ensaios monotônicos, a câmara era enchida completamente com água.

Durante o processo de aplicação da pressão confinante, após alcançar um valor próximo dos 15 kPa, era liberado o vácuo do corpo de prova.

Foram considerados os seguintes critérios para aceitação do corpo de prova moldado, expressos como variação máxima do valor definido durante a dosagem de materiais:

- a) diâmetro: $98,8 \text{ mm} \pm 1,0 \text{ mm}$;
- b) altura: $193,5 \pm 1,0 \text{ mm}$;
- c) peso específico: Valor alvo para cada condição $\pm 1,0 \%$;
- d) teor de umidade: $10\% \pm 1,0$.

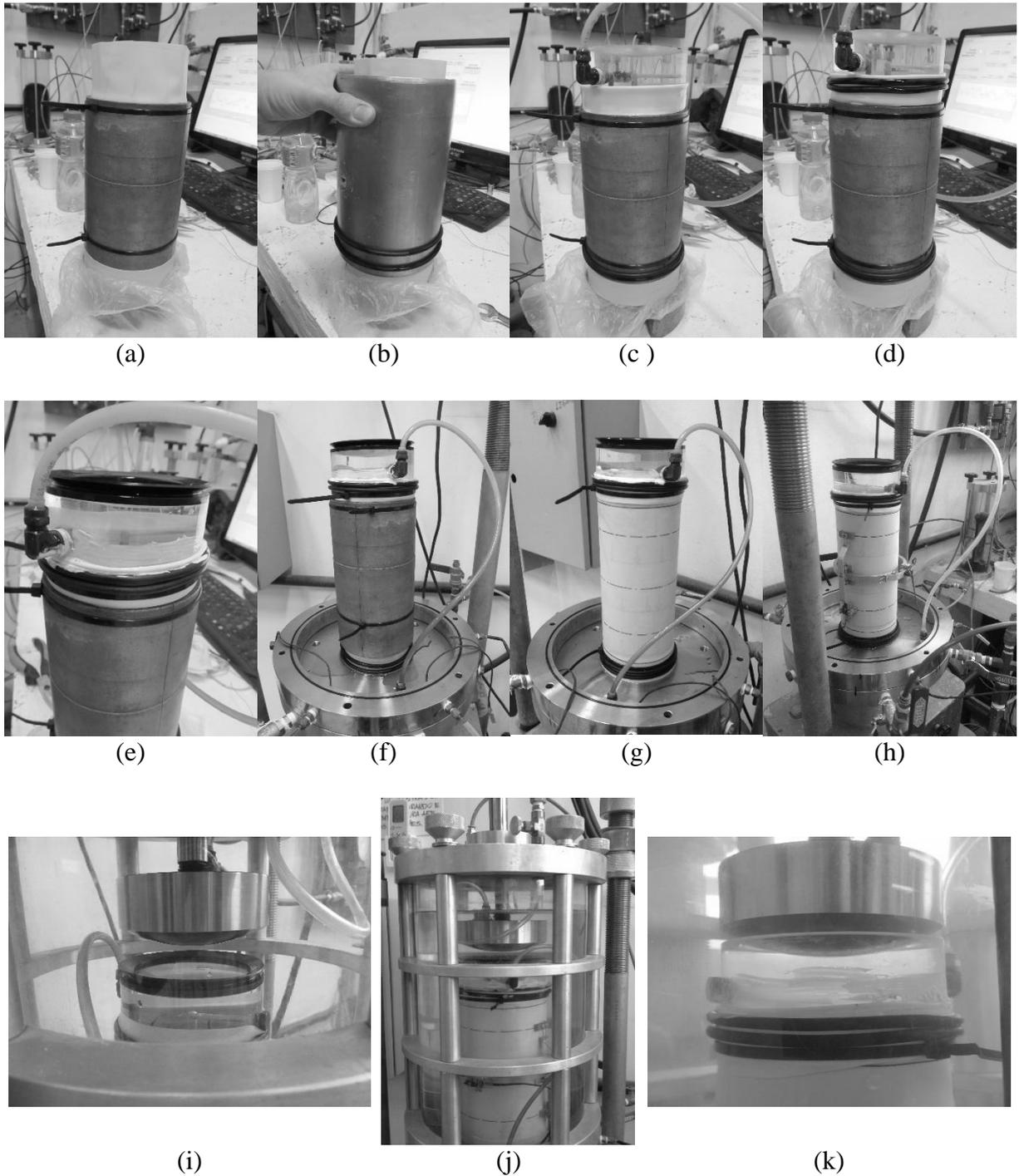


Figura 3.11: Procedimento para montagem de corpo de prova

3.4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Os procedimentos adotados, tanto para a preparação assim como para a execução dos ensaios triaxiais, seguiram os princípios descritos por Head (1995, 1998, 2006), pelas normas ASTM D-4767 (2011), ASTM D7181 (2011) e ASTM D-5311 (2011), assim como pelos procedimentos de ensaio já consolidados pelos laboratórios de Mecânica dos Solos da

Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Em razão de que os dois tipos de ensaio iniciaram com o mesmo procedimento até chegar na fase de cisalhamento, ao longo do presente item é feita a descrição das etapas que antecediam à ruptura segundo a condição de cisalhamento imposto a amostra ensaiada. Nos itens 3.4.1 e 3.4.2 é feita a descrição das etapas de cisalhamento em cada tipo de ensaio, assim como algumas particularidades próprias de cada método.

As seguintes etapas foram seguidas para ambos os tipos de ensaio

- a) colocação dos corpos de prova e membrana de vedação na câmara triaxial, ajuste dos sensores locais de medida de deslocamento (efeito Hall), vedação e enchimento da câmara;
- b) percolação com Dióxido de Carbono (CO₂)¹: considerando a maior solubilidade deste gás quando comparado com o ar ambiental, a substituição deste último por CO₂ diminui o tempo e a pressão necessária para conseguir a saturação do corpo de prova durante a fase de saturação.

Para a execução do processo foi necessária a injeção de CO₂ a partir da base do corpo de prova em direção ao topo através das linhas usadas para aplicação da contrapressão. A injeção do gás era feita com uma pressão constante máxima de 3 kPa, mantendo uma vazão tal que permitisse a formação de uma bolha a cada segundo em um reservatório instalado em um ponto da linha conectado com o topo de corpo de prova, através do qual ocorreu a evacuação do ar e do gás. Durante este processo, a pressão confinante efetiva era mantida entre 9 e 15 kPa. A aplicação do gás foi mantida durante 30 minutos em todos os ensaios.

- c) saturação, realizada em duas etapas:
 - percolação: feita da base em direção ao topo do corpo de prova. Durante essa etapa, a amostra era submetida a uma pressão confinante efetiva de 20 kPa, com a finalidade de impedir o fluxo preferencial entre as paredes do corpo de prova e a membrana de vedação;
 - aplicação da contrapressão: foram aplicados incrementos de pressão confinante e contrapressão em igual magnitude, mantendo constante a tensão

¹ Não foi determinada uma referência objetiva sobre o desenvolvimento deste procedimento, mas atualmente é reconhecida como uma técnica usual para a execução de ensaios triaxiais, principalmente em areias, tendo sido usado em múltiplos trabalhos (LADE; DUNCAN, 1973; CHANEY et al., 1979; RAD; WAYNE, 1984; USACE, 1986). A descrição do procedimento de execução e adaptação do equipamento é feita em detalhe por Correa e Ramírez (2015).

efetiva em 20 kPa. Concomitante com a operação de incremento de pressões é feita a determinação do parâmetro “B” (SKEMPTON, 1954), permitindo monitorar o processo e garantir a completa saturação antes de iniciar a fase de adensamento. Foram atingidos valores superiores a 0,92;

- d) fase de consolidação mediante a aplicação de pressão confinante, conforme o valor médio inicial desejado. A variação volumétrica foi medida para calcular o índice de vazios após o adensamento, assim como a altura, diâmetro e volume inicial considerado durante a fase de cisalhamento.

No cálculo da tensão desvio são consideradas as correções de área e pela membrana, conforme a abordagem proposta por La Rochelle *et al* (1988).

3.4.1. Ensaio sob carregamento monotônico

A execução dos ensaios do tipo consolidado isotropicamente e drenado seguiu o estabelecido pela norma ASTM D-7181 (2011), já para os do tipo consolidados isotropicamente e não drenados foi a norma ASTM D-4767 (2011). A velocidade de carregamento adotada para a fase de cisalhamento em ambos os tipos de ensaio foi de 0,06 mm/min.

Em relação à execução, a única diferença entre o processo de cisalhamento drenado e o não drenado é a necessidade de impedir a drenagem neste último, o que é conseguido ao fechar as linhas de drenagem tanto da base quanto do topo do corpo de prova, permitindo a leitura das poropressões geradas em decorrência da aplicação da tensão desvio.

3.4.2. Ensaio sob carregamento cíclico

A execução destes ensaios, do tipo consolidado isotropicamente e não drenados, estão definidos pela norma ASTM D-5311 (2011).

Em razão que durante a fase de cisalhamento ocorre inversão dos eixos de tensões principais pela aplicação de tensões desvio negativas, foi necessário garantir a conexão entre o pistão de carga e o corpo de prova. Para o caso dos ensaios executados dentro do presente estudo, o sistema adotado foi a conexão mediante criação de uma sucção em um volume de água retido entre o pistão e o cabeçote do corpo de prova, tendo sido adaptado neste último um elastômero de vedação tipo *V-ring*.

O procedimento de acionamento para o sistema *suction cap* é descrito a seguir:

- a) descida do pistão de carga ou elevação da câmara triaxial até conseguir contato

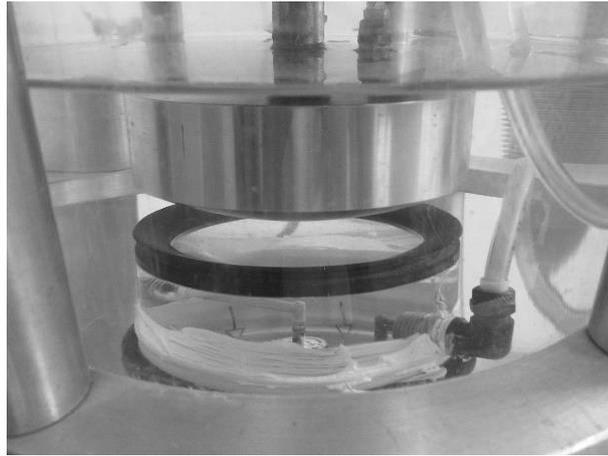
entre pistão e cabeçote acrílico (Figura 3.12 (*Continuação*): Sequência de acionamento do *suction cap* para ensaios cíclicos

- b) a);
- c) acionamento da sucção mediante a abertura da válvula de controle de fluxo localizada no tampa da câmara, permitindo a comunicação com a atmosfera. O valor da sucção aplicada corresponde a pressão total de confinamento aplicada (Figura 3.12 (*Continuação*): Sequência de acionamento do *suction cap* para ensaios cíclicos
- d) b). A instalação da válvula de controle de fluxo foi necessária para evitar acionamentos violentos do sistema pela rápida queda na pressão dentro do volume de contato;
- e) o contato entre o pistão e o cabeçote acrílico era garantido quando não surgia mais água pela válvula de alívio. Neste momento o *V-ring* garantia a vedação e com isto o contato entre as duas partes (Figura 3.12 (*Continuação*): Sequência de acionamento do *suction cap* para ensaios cíclicos
- f) c);
- g) para evitar alterações durante a fase de extensão axial ou levantamento da câmara triaxial, é necessário fixar a reação de tração, a qual foi projetada para se apoiar na tampa da câmara (Figura 3.12 (*Continuação*): Sequência de acionamento do *suction cap* para ensaios cíclicos
- h) d);

Uma vez finalizada esta operação, também era fechada a drenagem do corpo de prova.

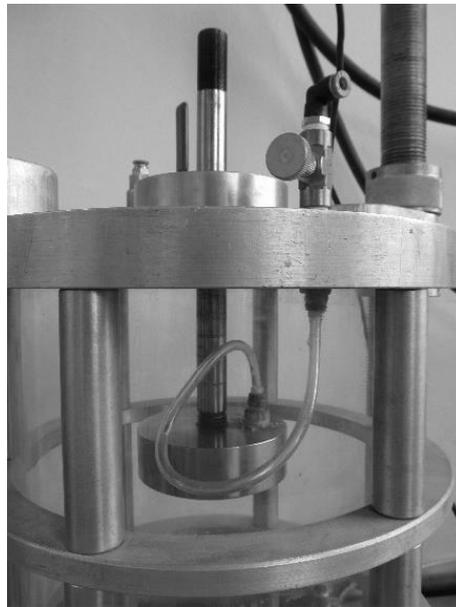
As respectivas tensões desvio cíclicas foram aplicadas seguindo uma trajetória senoidal, sendo que a metade da sua amplitude encontrava-se localizada na área de compressão, e a metade restante corresponde à extensão.

Ainda após ter acontecido a ruptura da amostra, foi permitida a aplicação de alguns ciclos (geralmente 5 ciclos), com o intuito de confirmar a ruptura e definir completamente o ciclo em que se produziu a mudança de comportamento do material. A ruptura da amostra era considerada quando o excesso de poropressão atingia 90% da tensão efetiva inicial.



(a)

Figura 3.12: Sequência de acionamento do *suction cap* para ensaios cíclicos

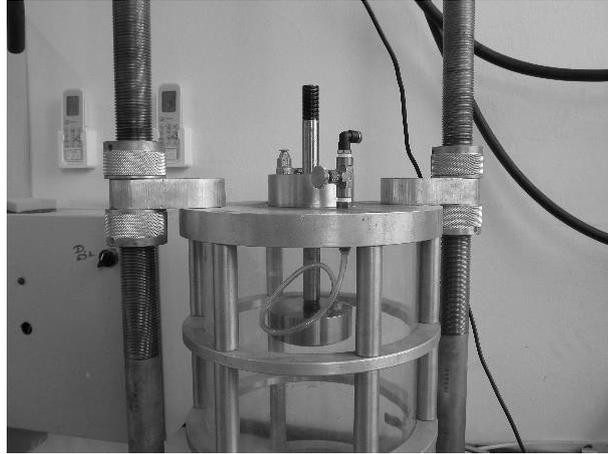


(b)



(c)

\



(d)

Figura 3.12 (*Continuação*): Sequência de acionamento do *suction cap* para ensaios cíclicos

4. IMPLEMENTAÇÃO DE UMA CÉLULA TRIAXIAL PARA APLICAÇÃO DE CARREGAMENTOS CÍCLICOS

O programa experimental considerado dentro do presente estudo teve como principal equipamento a câmara de compressão triaxial desenvolvida e utilizada por Festugato (2008, 2009) visando sua utilização em carregamento cíclicos, a qual, após algumas adaptações físicas menores, conseguiu funcionar de forma adequada não apenas para os ensaios aqui apresentados, mas para outros tipos de carregamentos.

A principal fonte de trabalho no que diz ao equipamento correspondeu ao aperfeiçoamento do sistema de aplicação de cargas cíclicas, e ao desenvolvimento do seu sistema de controle e aquisição de dados.

Na Figura 4.1 é apresentado um esquema dos principais componentes do equipamento triaxial, os quais são descritos ao longo do presente capítulo.

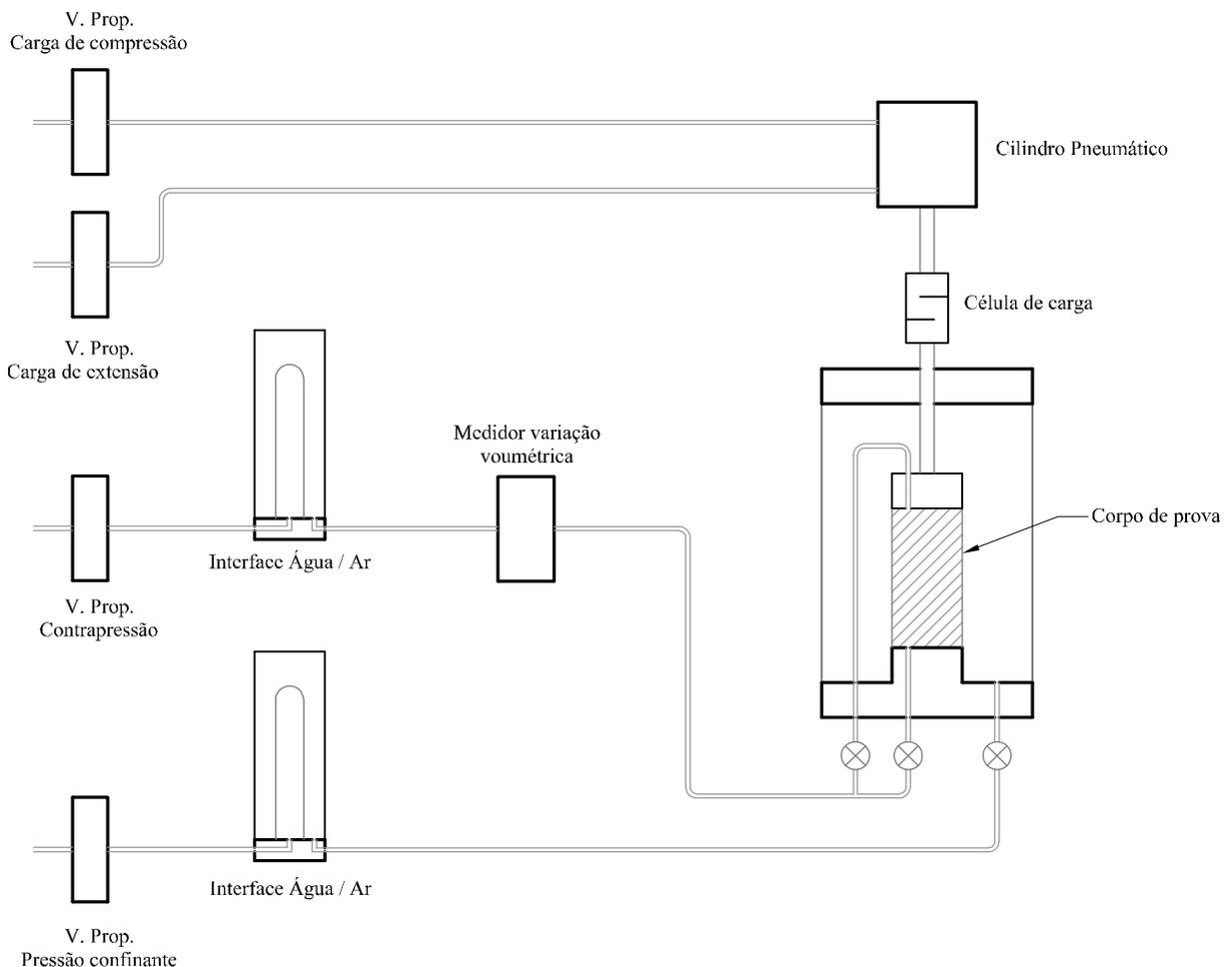


Figura 4.1: Esquema de disposição do sistema de controle de pressões e de força axial para carregamentos cíclicos

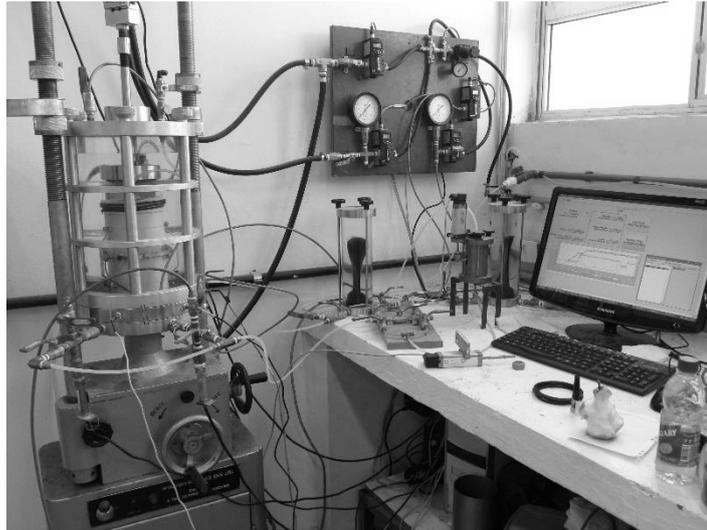


Figura 4.2: Equipamento triaxial usado para o presente estudo

4.1. COMPONENTES FÍSICOS

O equipamento desenvolvido por Festugato (2008) possui dois mecanismos independentes para a aplicação das cargas axiais, estando seu uso condicionado ao tipo de carregamento imposto.

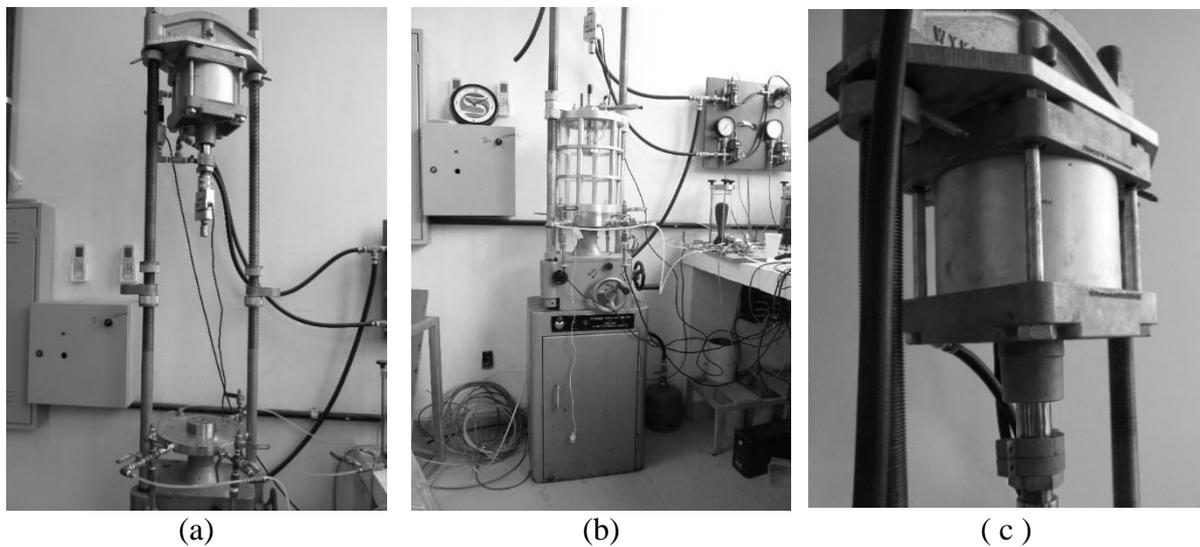


Figura 4.3: Sistemas para aplicação de carga axial: (a) e (b) Estático e (c) cíclico.

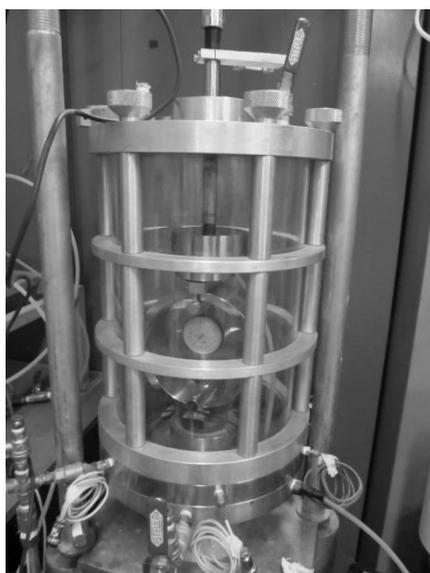
No caso de carregamentos monotônicos e/ou em extensão axial, ambos sob deformação controlada, a aplicação das cargas é executada por uma prensa da marca WYKEHAM FARRANCE, cuja capacidade máxima é 5 toneladas, permitindo até 30 velocidades distintas de carregamento entre 0,0006 e 7,60 mm/min. Neste caso, a base da prensa eleva a câmara triaxial contra o pistão fixo ao sistema de reação (Figura 4.3a e b).

A execução de ensaios sob tensão controlada, sejam estáticos ou cíclicos, é feita por um cilindro pneumático de dupla ação da marca NORGREN, com referência RA/8200/M/50, cujo diâmetro interno é 200 mm e curso 50 mm, o qual encontra-se acoplado ao sistema de reação da prensa (Figura 4.3c). Quando executados ensaios estáticos, é retraído completamente o pistão dentro do cilindro, para evitar leituras erradas de deslocamento ou quedas nas cargas aplicadas.

Uma descrição sobre a instalação do cilindro pneumático foi feita por Brito (2006) para aplicação de cargas unicamente de compressão, visando reproduzir o formato de carregamento tipo “semi-seno verso” ou *haversine*, definido para ensaios de determinação do módulo de resiliência (AASHTO/T307-99, 2007). Uma descrição um pouco mais abrangente é feita por Chan (1981).

A câmara triaxial empregada permite a execução de ensaios em corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A adaptação de corpos de prova de menores dimensões é possível desde que sejam substituídos tanto o pedestal quanto o cabeçote.

A construção da câmara foi feita principalmente com alumínio, aço inox e acrílico. O uso do alumínio teve como intuito a diminuição de peso do conjunto, de maneira a ser mais simples seu manuseio. O diâmetro interno é de 240 mm e altura 350 mm. Por questões de segurança, principalmente associados a erros na operação do equipamento, foram adaptados dois anéis de reforço em alumínio, localizados nos terços da altura do cilindro de acrílico. Finalmente, por limitações comerciais, a espessura máxima conseguida para o cilindro de acrílico (sem costura) foi 5 mm.



(a)



(b)

Figura 4.4: Câmara triaxial de ensaio

O apoio e vedação da câmara triaxial é feito em duas peças de aço inox: A primeira é a base, a qual exerce também a função de reação para os parafusos longitudinais da câmara (Figura 4.5^a) além de possuir as conexões e conduções para aplicação da pressão de confinamento, contrapressão (base e topo), drenagem da câmara e tubulação para a instalação de um dos componentes do sistema de *Bender Elements*.

A sobre base (Figura 4.5b) tem como finalidade servir para a passagem dos sensores internos de deslocamento e do componente restante dos *Bender Elements*. Quando não é feita aquisição de leituras locais de deformações nos corpos de prova, pode-se executar o ensaio sem instalar esta peça.

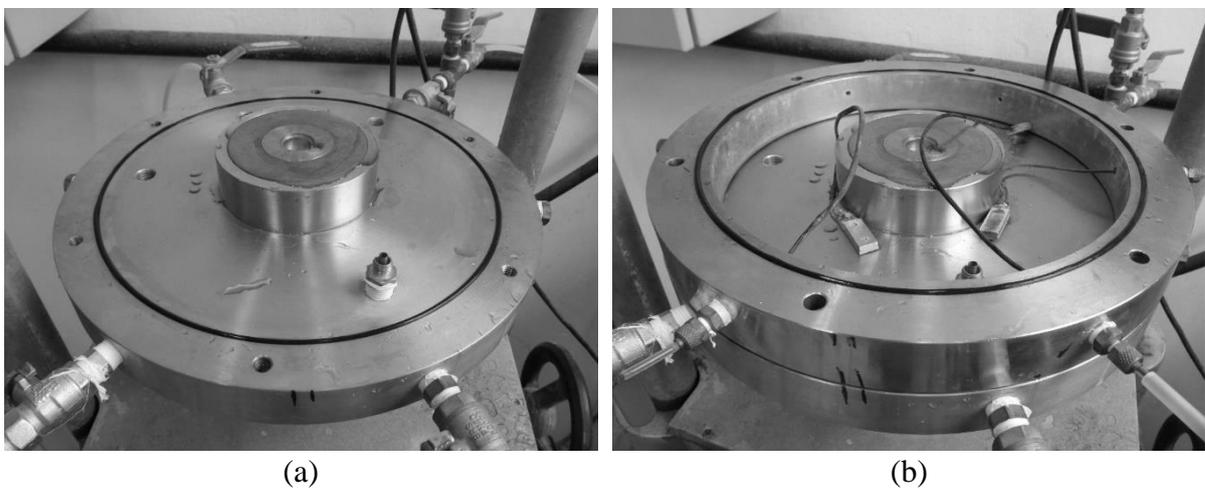


Figura 4.5: Base e sobre base da câmara triaxial

O pedestal em aço inox e o cabeçote em acrílico possuem pedras porosas em bronze sinterizado, de maneira a permitir a obtenção da sua geometria (ver Figura 4.6^a) sem fragilizar significativamente a peça. Ambos os componentes foram projetados para permitir a instalação de *Bender Elements*, embora para o desenvolvimento do presente estudo não se contou com eles.

A parte superior do cabeçote de acrílico possui formato esferoidal para evitar a geração de tensões decorrentes de deficiências na horizontalidade do topo do corpo de prova. Para a execução de ensaios que incluam extensão axial, deve-se instalar um elastômero de vedação ou *V-Ring*, conforme ilustrado na Figura 4.6b.

Durante os ensaios que envolvem a aplicação de cargas de extensão axial, a possibilidade de erros em ensaios associadas ao levantamento da câmara triaxial foi eliminada a partir da incorporação de um sistema de reação adicional ao próprio da prensa para cargas de

compressão. Neste caso, instalaram-se duas peças móveis nas hastes do sistema de reação da prensa, removíveis ou ajustáveis em qualquer momento do ensaio, as quais só são fixadas à câmara no momento prévio ao início do cisalhamento (Figura 4.7).

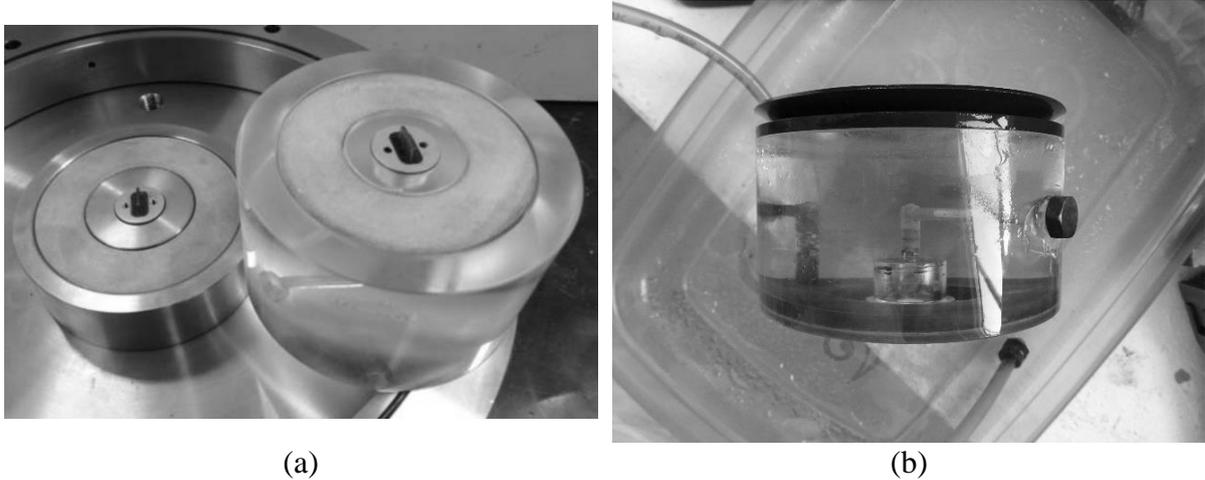


Figura 4.6: Base e cabeçote para montagem do corpo de prova

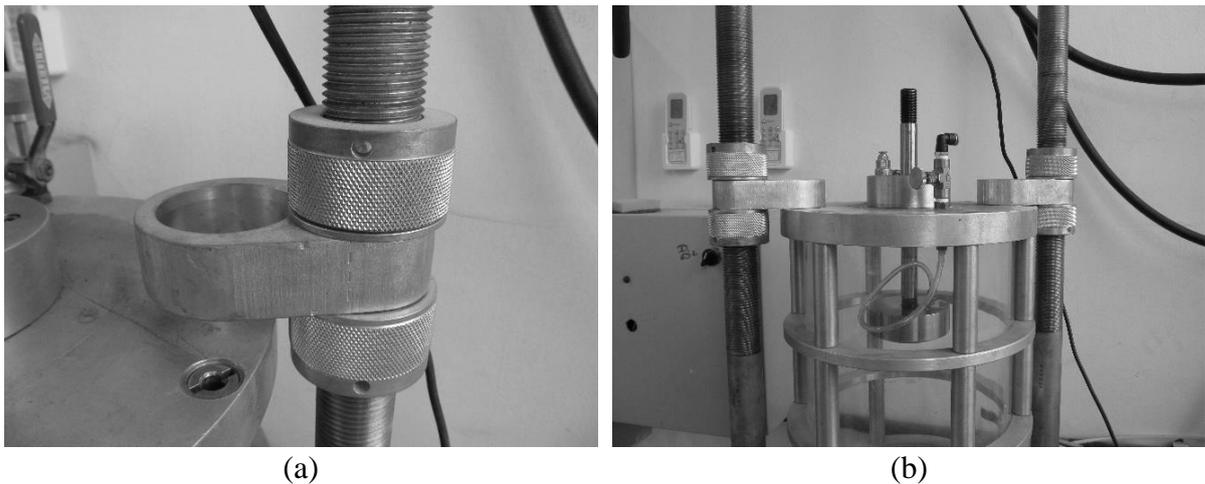


Figura 4.7: Sistema de reação para aplicação de tensões desvio em condição de extensão

Em relação à separação entre o pistão de carga e o cabeçote apoiado no corpo de prova, estudaram-se as opções definidas pela norma ASTM D3999 (2011) além da proposta de Ibraim *et al* (2010), e concluiu-se que o sistema de fixação por vácuo ou *suction cap* (FESTUGATO, 2009) teria um bom funcionamento.

O sistema é composto por duas partes: a primeira é o mecanismo que permite estabelecer contato e vedação entre o cabeçote de acrílico e o pistão de carga, neste caso, como foi dito acima, um elastômero de vedação tipo *V-ring*, o qual permite isolar um volume de água entre

as duas peças rígidas em contato (ver Figura 4.8^a e b).

O segundo componente é uma válvula localizada na tampa da câmara triaxial, a qual se comunica com o pistão através de uma mangueira flexível, permitindo manter a pressão dentro do contato entre cabeçote e pistão ao nível da pressão atmosférica, deixando um valor de vácuo correspondente à pressão confinante aplicada à câmara (ver Figura 4.8c).

Em razão de que o sistema de controle automatizado funciona com ar comprimido, é necessário instalar duas interfaces Água – Ar, sendo uma delas parte da linha que permite ajustar a pressão confinante (apenas para ensaios estáticos) e a outra para o controle da contrapressão. Estes elementos foram implementados por Festugato (2008) (ver Figura 4.9).

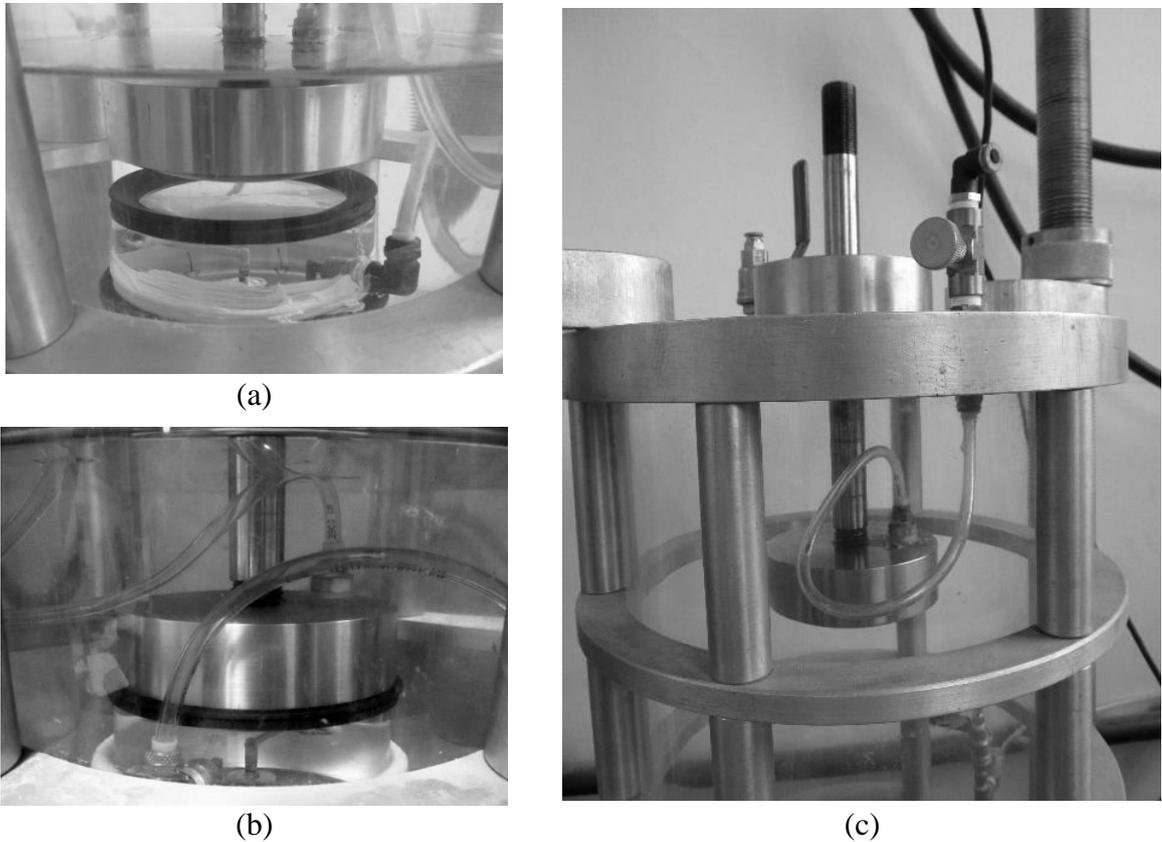
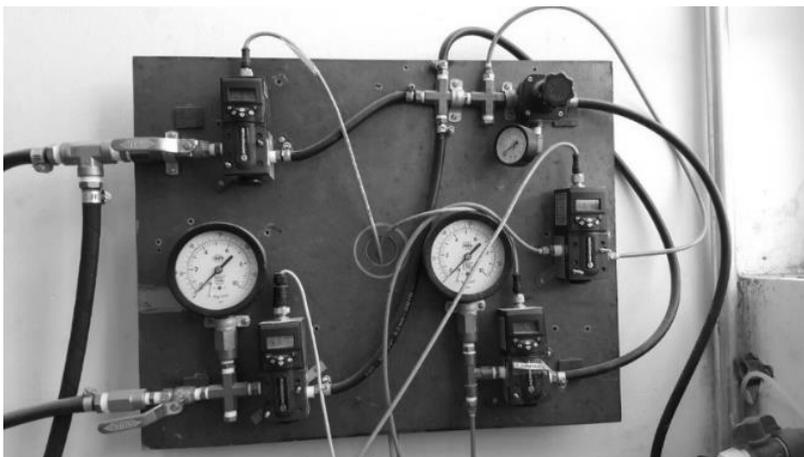


Figura 4.8: Sistema de fixação do cabeçote do corpo de prova tipo “*suction cap*”, e válvula para geração de sucção

A regulação do ar comprimido que ingressa no sistema é feita mediante válvulas de ajuste proporcional da marca NROGREN, série VP 51, as quais são alimentadas por uma tensão contínua de 24 V. A calibração de cada válvula provém do fabricante, tendo uma faixa de trabalho entre 0 V (correspondente com o kPa) e + 10 V (1000 kPa). Na Figura 4.10 é apresentado o painel com as quatro válvulas encarregadas do controle de todas as componentes dentro do ensaio triaxial cíclico, sendo que para ensaios estáticos eram requeridas apenas duas.



Figura 4.9: Interface Água – Ar para controle da pressão



(a)



(b)

Figura 4.10: Painel com válvulas pneumáticas de ajuste proporcional

Para a execução de ensaios cíclicos, a norma ASTM D5311 (2011) recomenda manter um volume de ar dentro da câmara triaxial, com o intuito de evitar picos de pressão principalmente quando surgir a ruptura dos corpos de prova sob condição não drenada, seja esta por liquefação ou por mobilidade cíclica.

Embora a norma recomende a drenagem de uma quantidade de água prévio ao cisalhamento, a probabilidade de quedas de pressão fez com que fosse melhor encher parcialmente (desde o início do ensaio) a câmara e exercer o controle da pressão confinante diretamente em aquele volume de ar.

Para isso é isolada a interface correspondente à pressão confinante e conectada uma mangueira entre um ponto entre a válvula de ajuste proporcional e a interface, e a válvula utilizada para a saída de ar localizada na tampa da câmara triaxial, conforme apresentado na Figura 4.11.

Deve-se ter especial cuidado em não isolar o transdutor de pressão correspondente a esta linha, para não perder as leituras diretas destes valores.

Recomenda-se que o volume de ar não seja muito grande (aproximadamente 20% do volume da câmara) para evitar oscilações de pressão decorrentes da compressibilidade do ar.

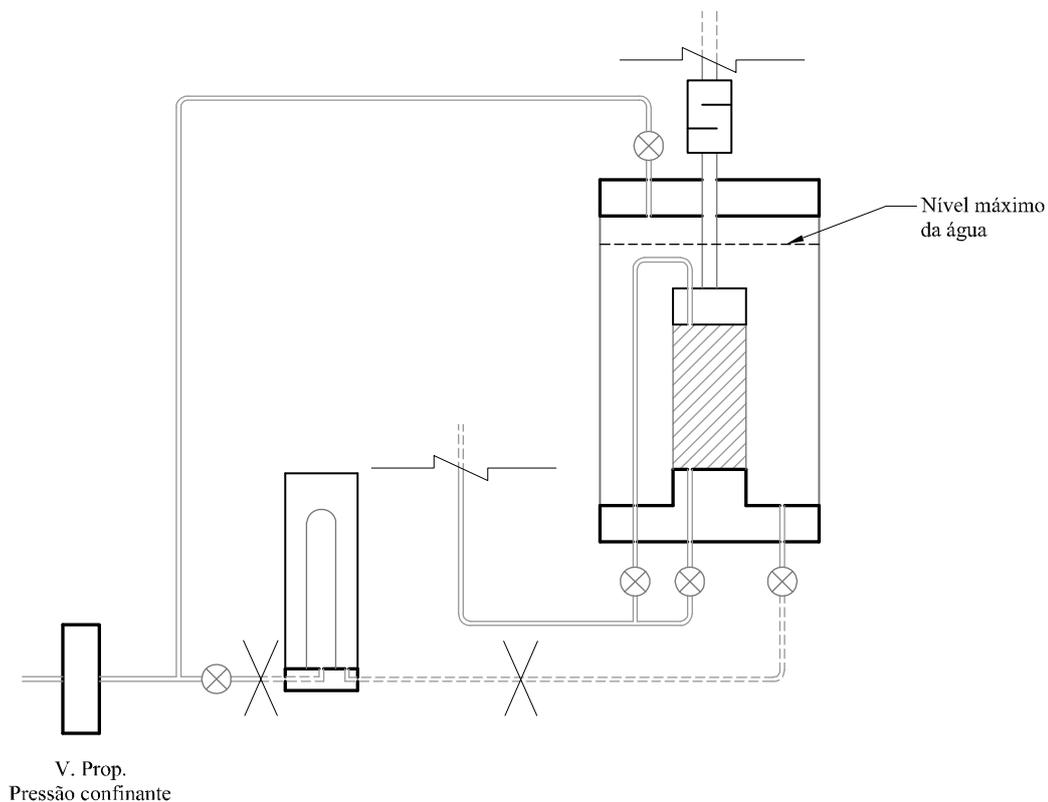


Figura 4.11: Modificação do procedimento para aplicação da pressão de confinamento em ensaios cíclicos

4.2. DISPOSITIVOS DE LEITURA E AQUISIÇÃO DE DADOS

Os conjunto de dispositivos, com exceção das válvulas de ajuste proporcional, foram mantidos conforme a versão inicial do equipamento (FESTUGATO, 2008). A calibração periódica foi executada com auxílio da rotina controle descrita no item 4.3. As curvas e constantes de calibração para cada dispositivo são apresentadas no Apêndice B.

Para a aquisição de dados e controle das condições de ensaio foram instaladas duas placas modelo PCI-DAS1602/16 da *Measurement Computing*. Cada placa está constituída por oito canais analógicos de entrada e dois canais analógicos de saída. A faixa máxima de tensão de

cada placa é ± 10 V. A seguir é apresentada a instrumentação disposta no equipamento:

- a) célula de carga, fabricada pela empresa HBM, modelo S40/3t, com capacidade de trabalho de 30 kN. Sua calibração, considerando o fato de estar localizada externamente à câmara triaxial, foi feita com um anel dinamométrico com capacidade 50 kN, localizado no interior da câmara;
- b) três transdutores de pressão, modelo K1 da marca ASHCROFT, com pressão máxima de 1 MPa e precisão de 0,5%. Um dos transdutores é o encarregado de realizar a medição da pressão de confinamento, e os dois restantes permitem obter as leituras da contrapressão ou da poropressão para a base e o topo do corpo de prova de forma independente (ver Figura 4.12);

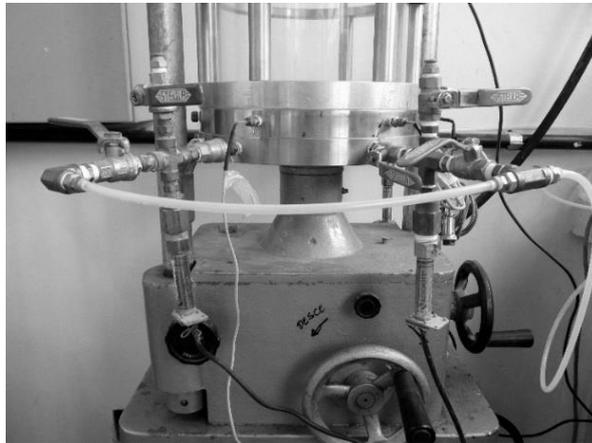


Figura 4.12: Transdutores para medição de pressões (Base e topo do corpo de prova)

- c) o medidor de variação volumétrica empregado é do tipo *Imperial College*, com capacidade máxima de 50 cm³. O equipamento de medição usado foi um transdutor de deslocamento linear, modelo LTM-50, fabricado pela empresa GEFTRAN (ver Figura 4.13);
- d) a medição dos deslocamentos axiais para grandes deformações foi feita mediante um transdutor de deslocamento lineal model LTM-50, fabricado pela empresa GEFTRAN, posicionado entre o pistão de carga e a tampa da câmara triaxial. Para garantir leituras do dispositivo durante os processos de extensão axial foi inserida uma mola (Figura 4.14^a);
- e) as medidas de deslocamentos axial e radial para níveis pequenos de deformação foi executada através de dispositivos locais fixados ao corpo de prova. Foram

usados três sensores de efeito Hall (CLAYTON et al., 1989), sendo dois axiais posicionados aproximadamente opostos, os quais permitem sensibilizar aproximadamente $2/3$ da altura do corpo de prova. O terceiro sensor tem por objetivo a medição dos deslocamentos radiais, para o qual foi instalado na metade da altura do corpo de prova (Figura 4.14b).

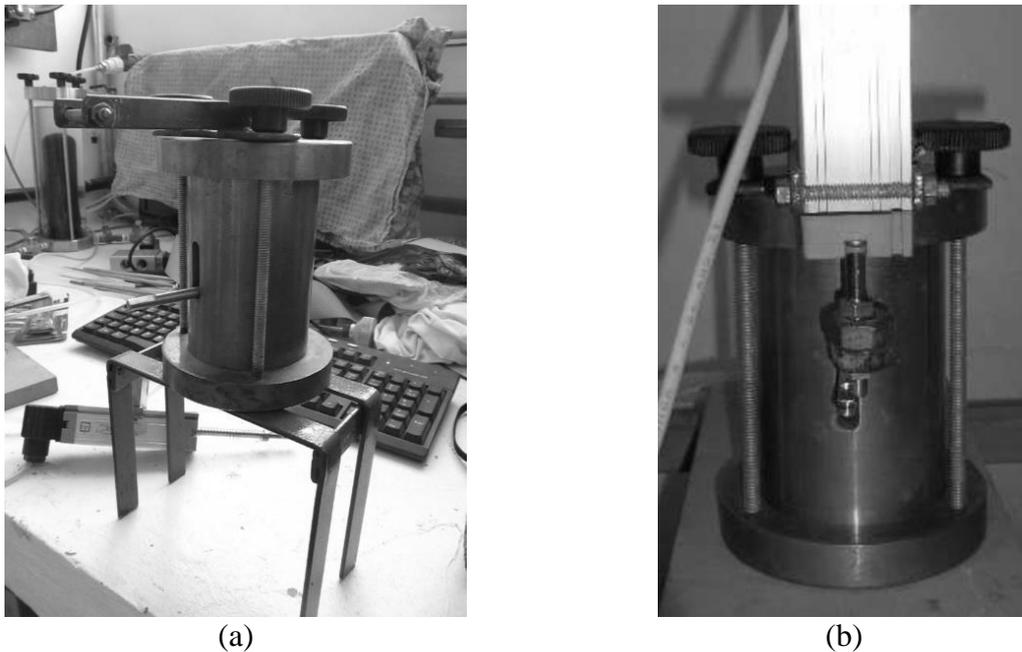


Figura 4.13: Medidor externo de variação volumétrica

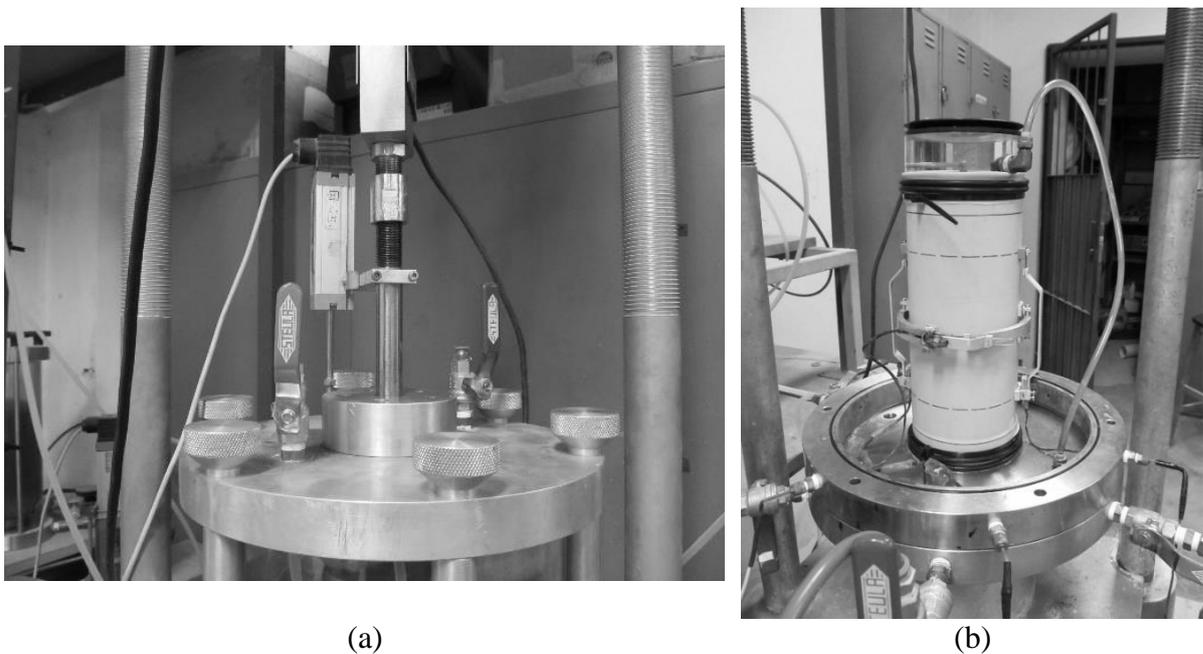


Figura 4.14: Sensores para medição de deslocamento: (a) Axial externo e (b) locais (axiais e radial)

4.3. ROTINA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

O programa de controle desenvolvida dentro do presente estudo teve como objetivo não apenas a execução dos ensaios que o compõem, mas também brindar a possibilidade de executar outros tipos de carregamentos para os quais o equipamento está fisicamente capacitado.

Para o desenvolvimento do programa procurou-se uma linguagem de uso estendido e de fácil obtenção de suporte, optando-se pelo Software LabVIEW criado pela empresa *National Instruments*, o qual permite para a maioria de usuários pouco experientes o emprego de uma lógica de programação em um ambiente gráfico, além de possuir livrarias de compatibilidade com as placas de controle adquiridas para o equipamento.

O programa foi desenvolvido por módulos independentes, sendo que cada um corresponde a uma etapa do ensaio. A estrutura do programa é apresentada na Figura 4.15.

Para auxiliar na compreensão do programa, os módulos foram agrupados em blocos com funções específicas em relação aos ensaios, tendo cada um o seguinte objetivo:

- a) início: neste bloco o usuário pode optar entre iniciar a execução de um ensaio ou a calibração da instrumentação;
- b) manutenção e ajustes: dentro destes módulos o usuário pode fazer as leituras necessárias para realizar a calibração de um ou vários dispositivos. Além disso, podem ser testadas de forma independente cada uma das válvulas de controle proporcional;
- c) etapas ensaio: neste bloco são executados os módulos necessários para preparar o corpo de prova para o cisalhamento, considerando que estes tendem a serem comuns à maioria dos ensaios. Foi definido considerando alguma nova fase que puder ser integrada no futuro conforme necessidades;
- d) execução: neste bloco são executadas as ações tanto durante o processo de saturação, assim como todas as opções de carregamentos propostos. Para o caso da trajetória de carregamento seguindo um valor de p' constante, o programa permite atingir um valor máximo para os casos de consolidação anisotrópica ou levar o corpo de prova à ruptura.

A aquisição de dados é feita em arquivos de extensão binários tipo TDMS, criados para serem usados em programas desenvolvidos em LabVIEW. Optou-se por este formato pela menor demanda de memória de processamento, diminuindo o risco de perda de dados e atrasos na

execução do ensaio.

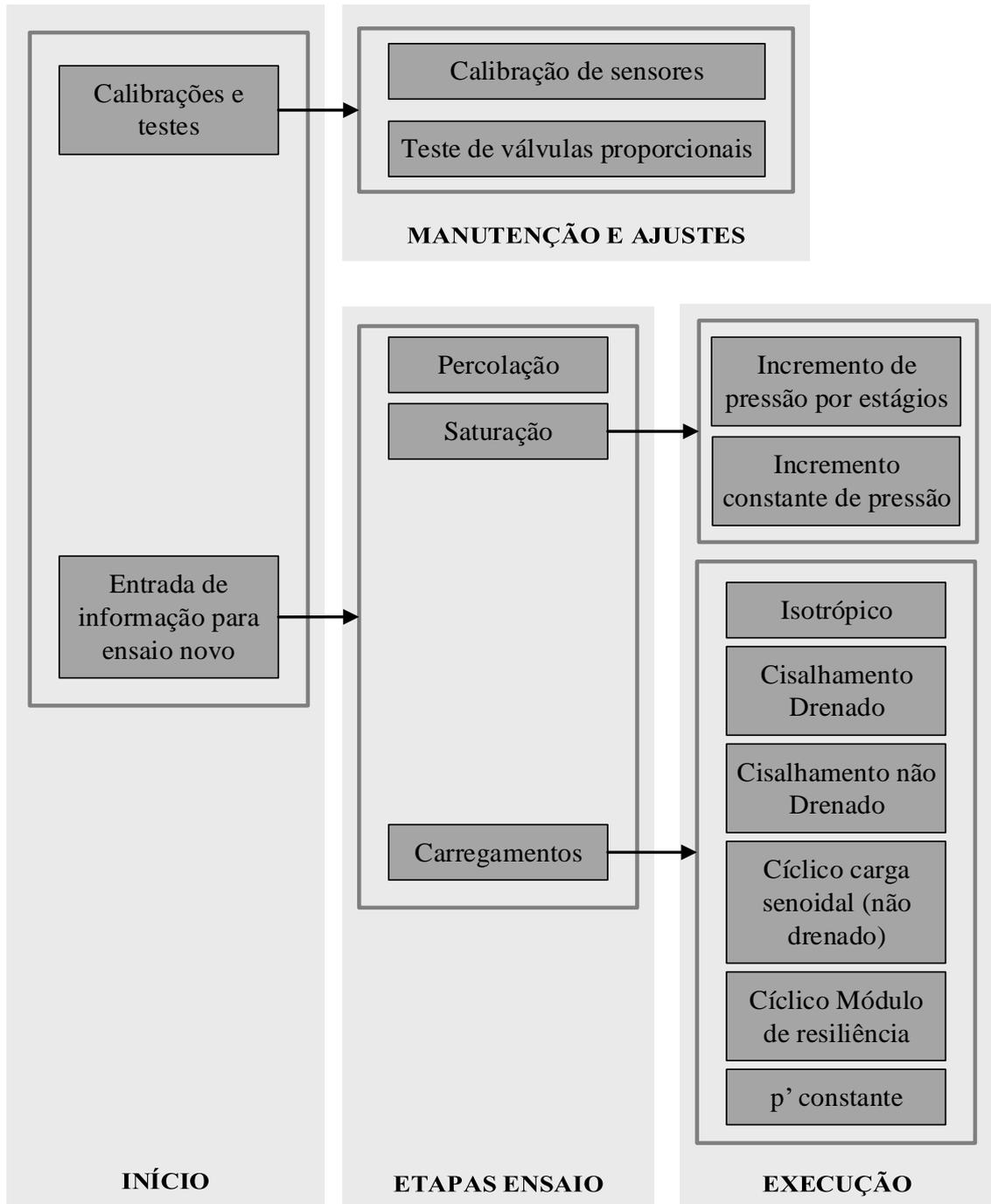


Figura 4.15: Estrutura do programa de controle e aquisição de dados para o equipamento triaxial

Com exceção dos carregamentos cíclicos, a taxa de aquisição pode ser determinada pelo operador em função dos níveis de deformação do corpo de prova. Para o ensaio cíclico senoidal foi determinada uma taxa fixa de 50 leituras por ciclo, número maior do que as 40 leituras exigidas pela norma ASTM D5311 (2011). Para o caso do ensaio de módulo de resiliência, o

sistema mostrou-se capaz de registrar 200 leituras por cada ciclo de carga, conforme definido pela norma AASHTO T-307-99 (2007).

Nas figuras apresentadas a seguir permitem visualizar as interfaces de usuário de alguns dos módulos desenvolvidos.

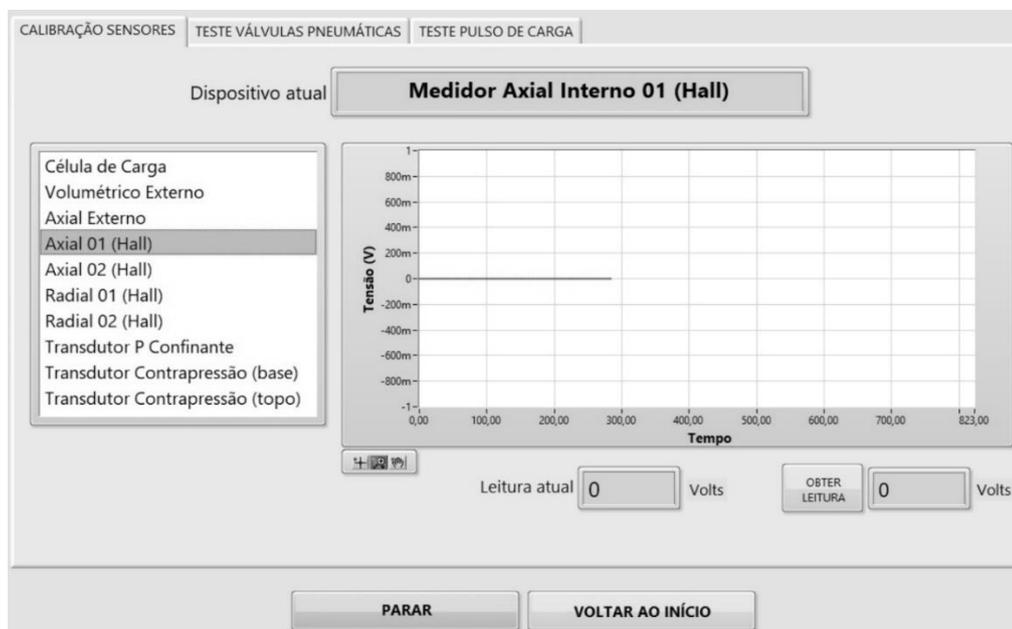


Figura 4.16: Interface de usuário – Módulo de calibração e teste válvulas

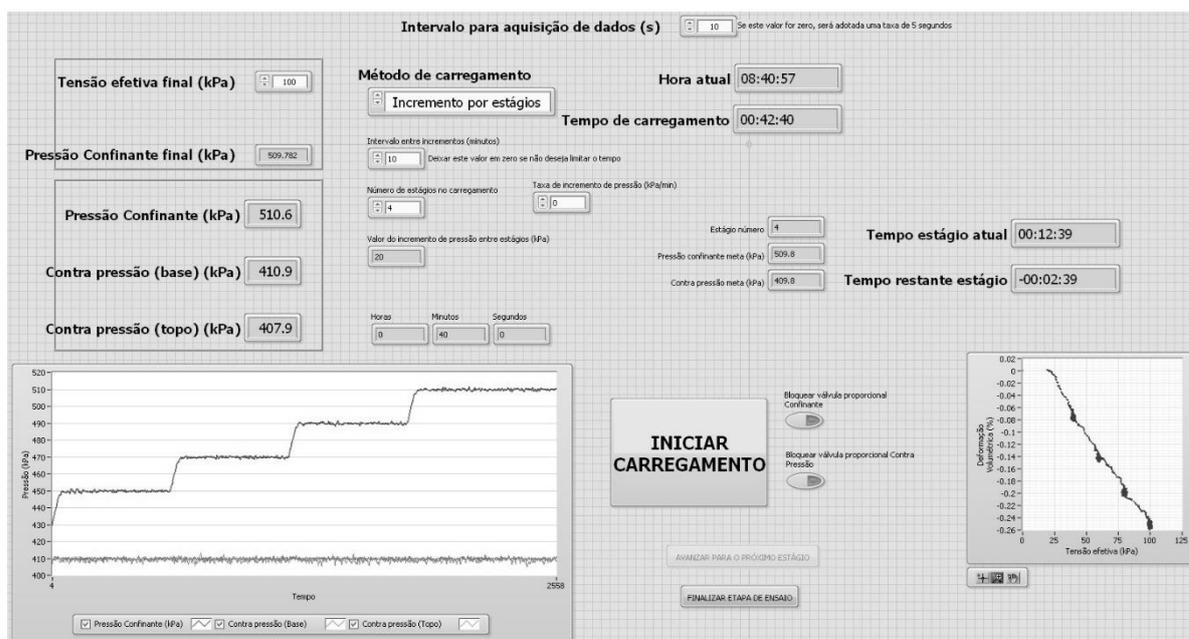


Figura 4.17: Interface de usuário – Módulo de compressão isotrópica

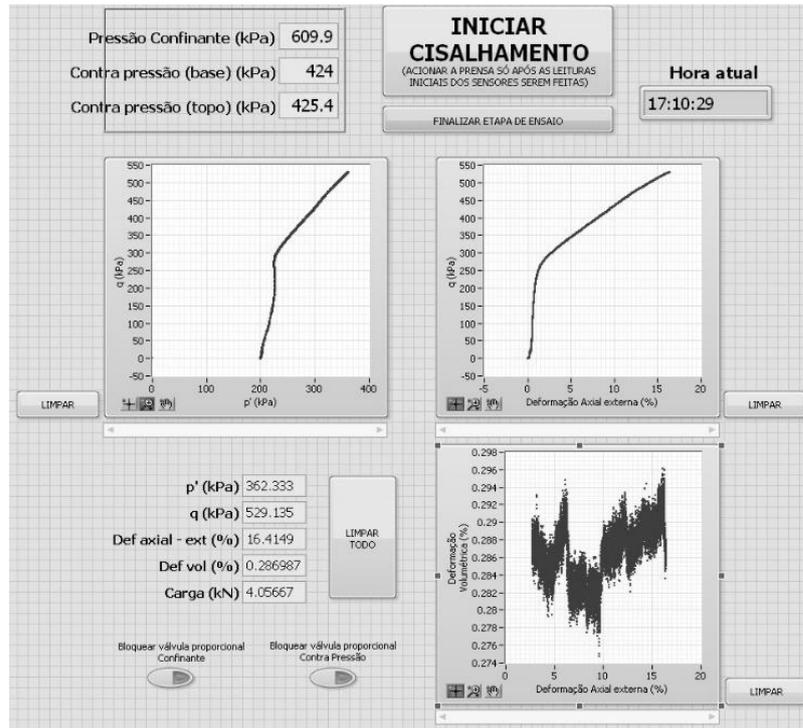


Figura 4.18: Interface de usuário – Módulo de cisalhamento estático não drenado

As rotinas de controle, tanto das pressões quanto das cargas axiais, foram concebidas como ciclos fechados (REES, 2014), nos quais é possível adaptar as condições de ensaio ao longo da execução, sejam elas constantes ou variáveis.

No caso do controle das tensões efetivas nos corpos de prova, o ciclo é executado concomitantemente para os valores de pressão confinante e para a contrapressão (Figura 4.19), não é definido um valor alvo para a tensão efetiva caso alguma das válvulas ou transdutores de pressão presente algum tipo de problema de funcionamento, o que impediria identificar o problema rapidamente.

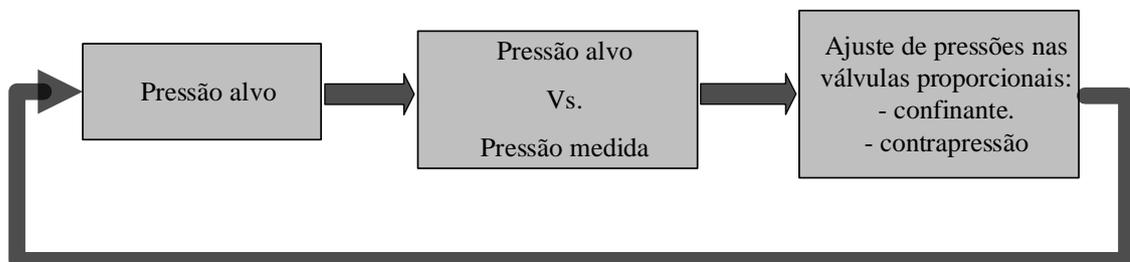


Figura 4.19: Fluxograma do processo de controle das pressões de confinamento e contrapressão.

Para o caso das tensões desvio em ensaios sob carga controlada, os valores de carga são

corrigidos pela área transversal do corpo de prova, e comparados com o valor alvo definido (Figura 4.20). Neste caso, o ajuste pode ser feito através das duas válvulas proporcionais que controlam o cilindro pneumático, ou com uma só em caso os valores da tensão desvio cíclica não sejam muito elevados.

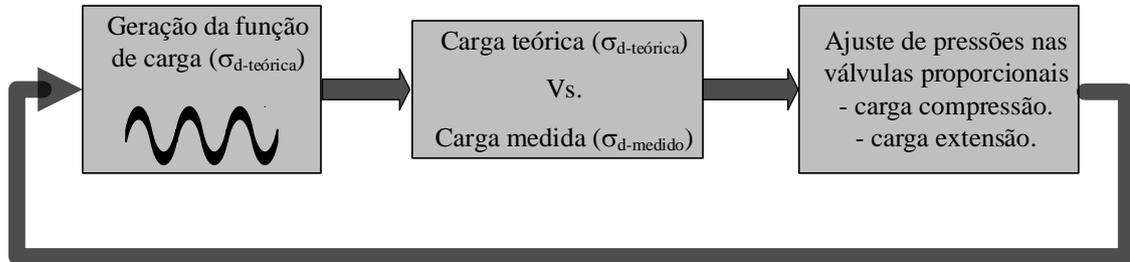


Figura 4.20: Conceptualização do processo de ajuste da tensão desvio durante procedimentos sob tensão controlada.

A calibração dos valores necessários para atingir as tensões desvio cíclicas seguindo um padrão senoidal de carregamento foram obtidas para os seguintes valores: ± 20 , ± 30 , ± 40 , ± 50 , ± 60 , ± 70 , ± 80 , ± 90 , ± 100 , ± 120 e ± 160 kPa. Os valores de tensão desvio cíclicas foram aplicados em corpos de prova com tensões efetivas iniciais de 100 e 200 kPa, com uma única frequência de 0,1 Hz.

Nas Figuras 4.21 a 4.23 são apresentadas algumas das curvas obtidas após o processo de calibração da onda de carga para ± 40 , ± 60 e ± 100 kPa. As linhas cheias correspondem às tensões desvio obtidas a partir dos valores medidos na célula de carga divididos pela seção transversal do corpo de prova, e as linhas tracejadas correspondem aos valores teóricos definidos pelo gerador de funções incluso no programa desenvolvido.

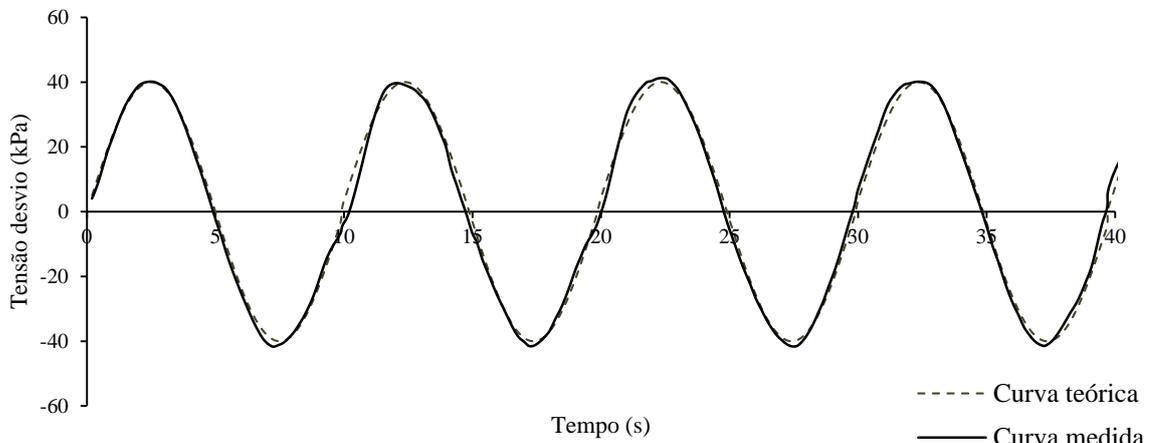


Figura 4.21: Pulso senoidal obtido, tensão desvio cíclica = ± 40 kPa

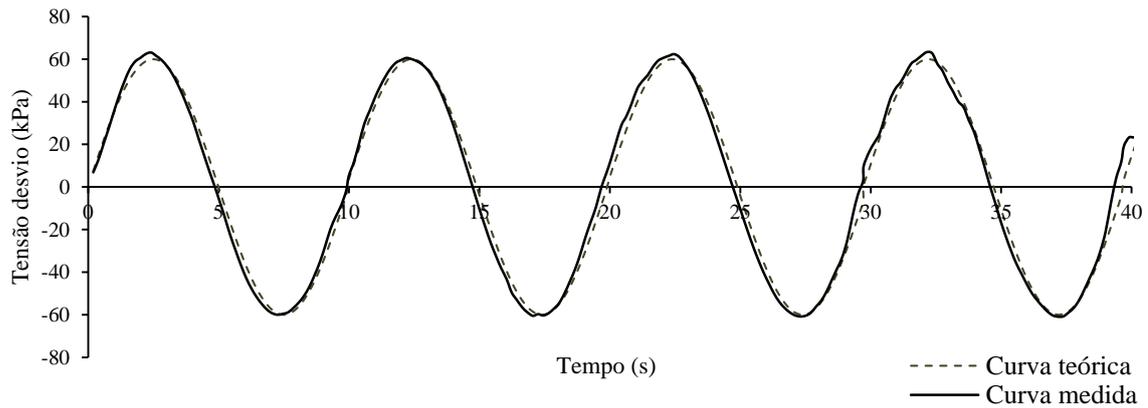


Figura 4.22: Pulso senoidal obtido, tensão desvio cíclica = ± 60 kPa

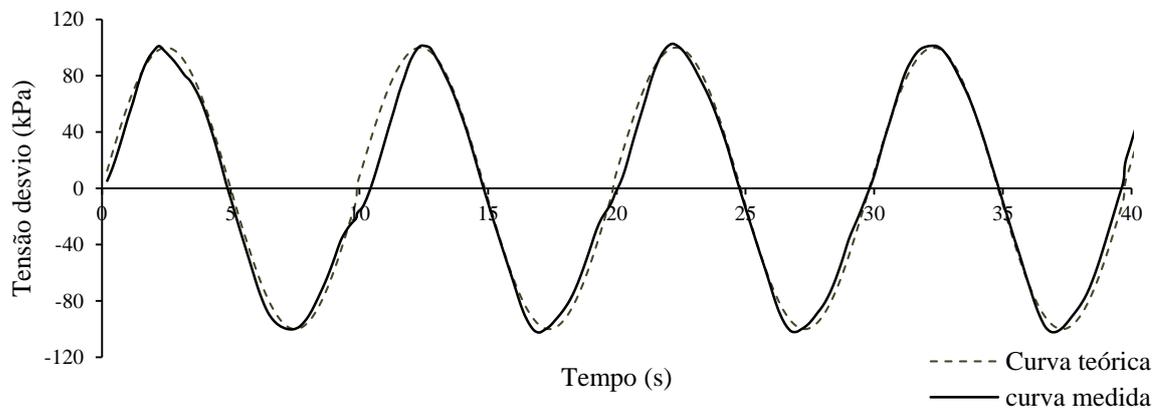


Figura 4.23: Pulso senoidal obtido, tensão desvio cíclica = ± 100 kPa

4.4. VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO E REPETIBILIDADE DOS RESULTADOS

A complementação e execução dos primeiros ensaios cíclicos no equipamento requereram a validação do equipamento, assim como a comprovação sobre a repetibilidade em termos dos resultados obtidos em ensaios sob amostras com as mesmas condições de moldagem.

Para a validação do equipamento triaxial no que diz da execução de ensaios cíclicos, foram adotadas algumas das condições de ensaio e moldagem executadas por Benahmed (2001) na areia de Hostun RF. Uma amostra deste material foi obtida graças à colaboração entre o LEGG (UFRGS) e os laboratório de Geotecnia da *University of Bristol* (Inglaterra).

4.4.1. Ensaios base para validação do equipamento

Neste caso, optou-se pela execução de ensaios triaxiais cíclicos não drenados sob tensão controlada em um material de referência, tendo sido selecionada para este propósito a areia Hostun RF, cuja descrição é feita no item 3.2.1.2.

Para a definição das condições de moldagem e ensaio, foram adotados alguns dos ensaios executados por Benahmed (2001), sendo que o programa experimental definido pela autora considerava corpos de prova com densidades relativas entre 0 e 70%, submetidos a ensaios cíclicos não drenados sob tensão controlada (ver Quadro 4.1).

Foram selecionados no total cinco ensaios, dos quais foram reproduzidos os quatro de maior nível de tensão desvio (ver Quadro 4.2).

Quadro 4.1. Fatores constantes na execução dos ensaios de referência (adaptado de Benahmed (2001))

| Parâmetro de moldagem / ensaio | Valor |
|--|--------------|
| Diâmetro corpo de prova | 70,6 mm |
| Altura do corpo de prova | 140 mm. |
| Densidade relativa (antes da consolidação) | 70 % |
| Frequência de ensaio | 0,1 Hz |
| p'_0 | 200 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |

Quadro 4.2. Parâmetros de ensaio executados no trabalho de referência (BENAHMED, 2001)

| Código ensaio | p'_0 (kPa) | $\pm\sigma_{dc}$ (kPa) | Número de ciclos até liquefação inicial (N_f) |
|----------------------|--------------------------------|--|---|
| TCRF 49 | 200 | ± 70 | 900 |
| TCRF 50 | | ± 80 | 82 |
| TCRF 51 | | ± 88 | 30 |
| TCRF 52 | | ± 105 | 7 |
| TCRF 53 | | ± 122 | 4 |

A seguir são apresentados os comportamentos para as amostras ensaiadas no estudo de referência: geração de poropressões (Figura 4.24), variação da deformação axial (Figura 4.25) e trajetórias de carregamento no plano p' vs. q' (Figura 4.26). A discussão sobre os resultados

obtidos é apresentada no **item ;Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Os resultados de cada ensaio são apresentados no Apêndice A.

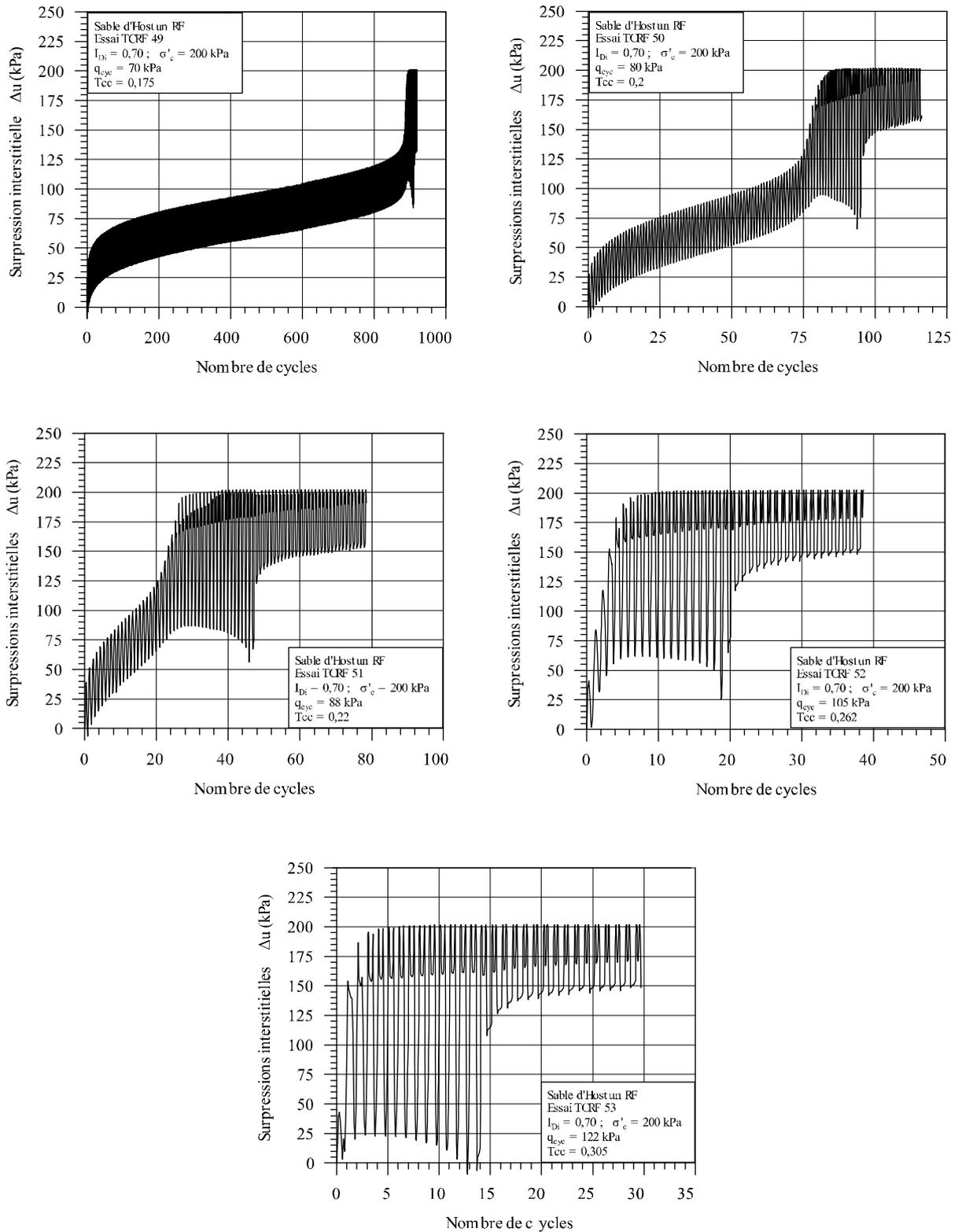


Figura 4.24: Geração de excesso de poropressão ao longo dos ensaios (BENAHMED, 2001)

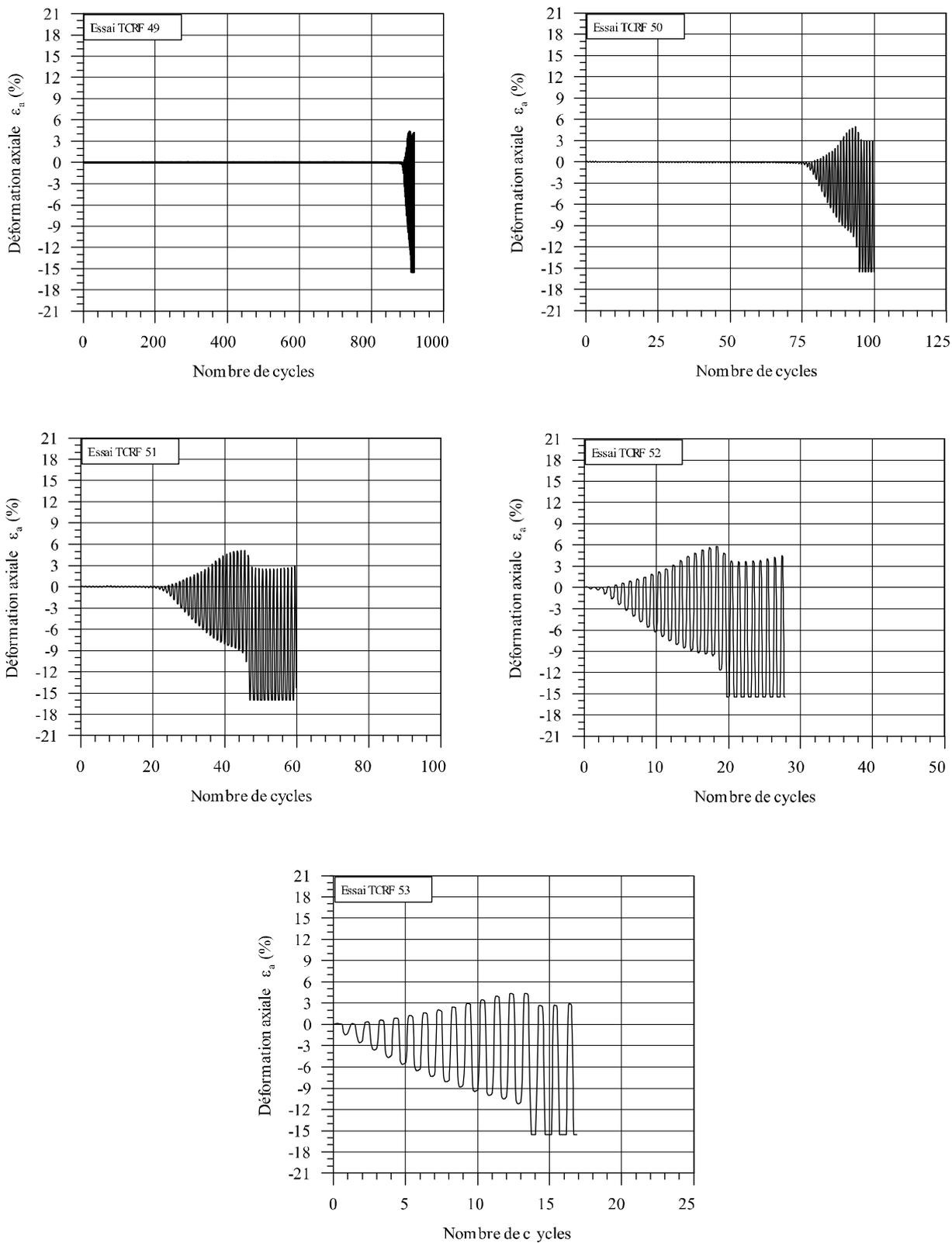


Figura 4.25: Comportamento da deformação axial ao longo dos ensaios (BENAHMED, 2001)

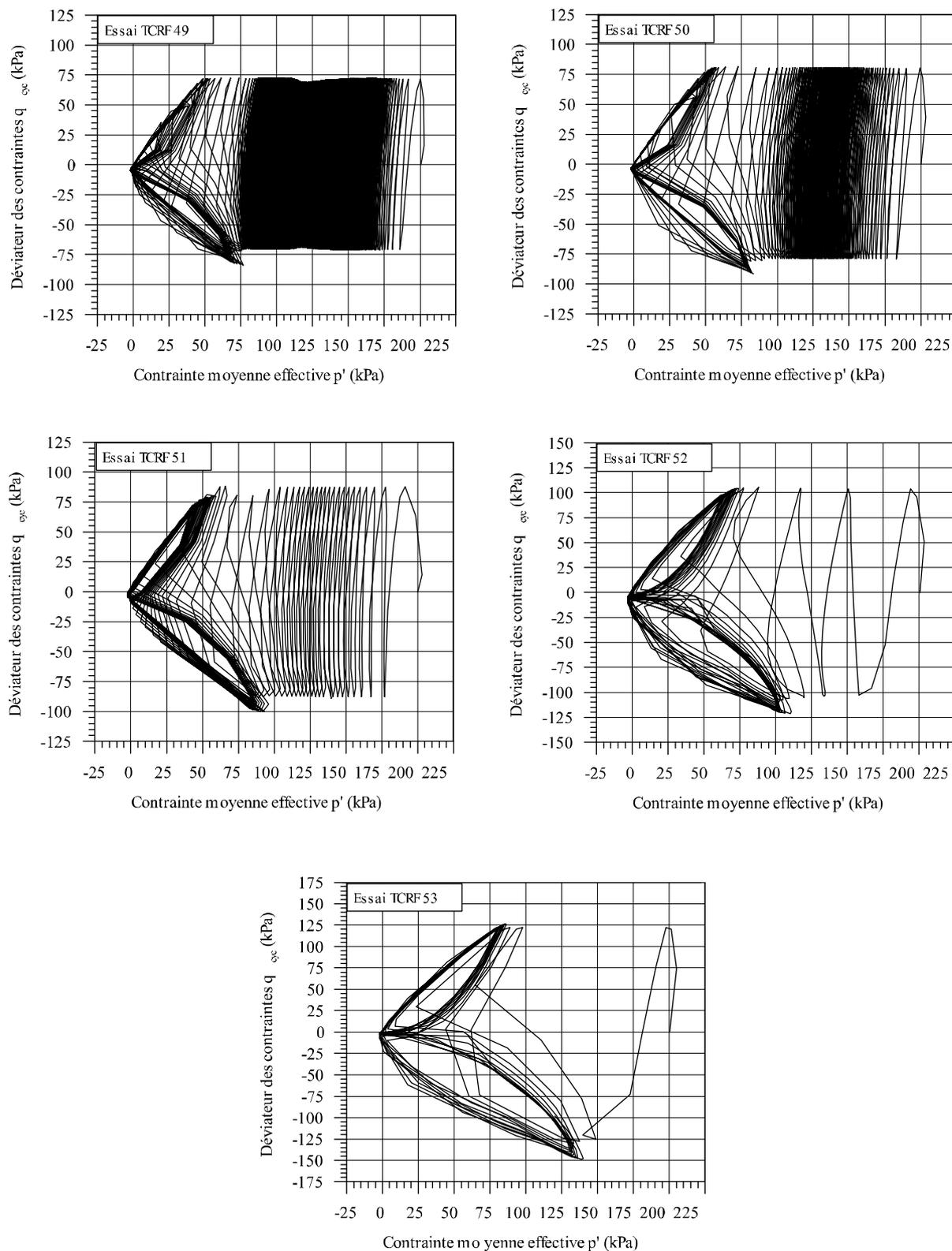


Figura 4.26: Trajetórias de carregamento no plano p' vs. q para os ensaios de referência (BENAHMED, 2001)

4.4.2. Resultados de ensaios de validação do equipamento

Ao longo do presente item será apresentada uma comparação entre os resultados obtidos por Benahmed (2001) e dentro do presente estudo, para o ensaio codificado como TCRF 53

Em geral, foi mantida uma tendência de maior quantidade de aplicações de carga nas amostras avaliadas dentro do presente do que no estudo de referência. Embora o critério de ruptura adotado para o presente estudo fosse de um valor de tensão efetiva $< 0,1 \sigma'_0$, e no estudo de referência foi de uma dupla amplitude de deformação de $\pm 5\%$, quando visualizado o valor de deformações nos corpos de prova no presente estudo, os números de ciclos apresentaram diferenças máximas de 2 ciclos, quando não foram exatamente coincidentes.

Para o ensaio TCRF 53, é apresentada uma sobreposição da evolução da deformação axial na Figura 4.27, na qual percebe-se uma maior rapidez no incremento da dupla amplitude de deformações para o ensaio de referência, ainda que a ruptura ocorra com valores próximos de N_f (4 para o ensaio de referência, 7 para o presente estudo).

Em ambos os casos, os níveis de deformação em compressão são notavelmente menores do que no componente de compressão, como apontado por Townsend (1978). É pertinente esclarecer que, após a ocorrência da ruptura dos corpos de prova, as leituras posteriores são apresentadas de maneira a permitir a visualização do comportamento pós-ruptura de uma maneira principalmente qualitativa. Os valores de deformação axial apresentados na Figura 4.27 para o ensaio executado no presente estudo, a partir da segunda metade do ciclo nove, ultrapassaram o curso dos sensores de efeito Hall, pelo qual aparece uma inversão dos valores de deformação nos picos, tanto em compressão quanto em extensão.

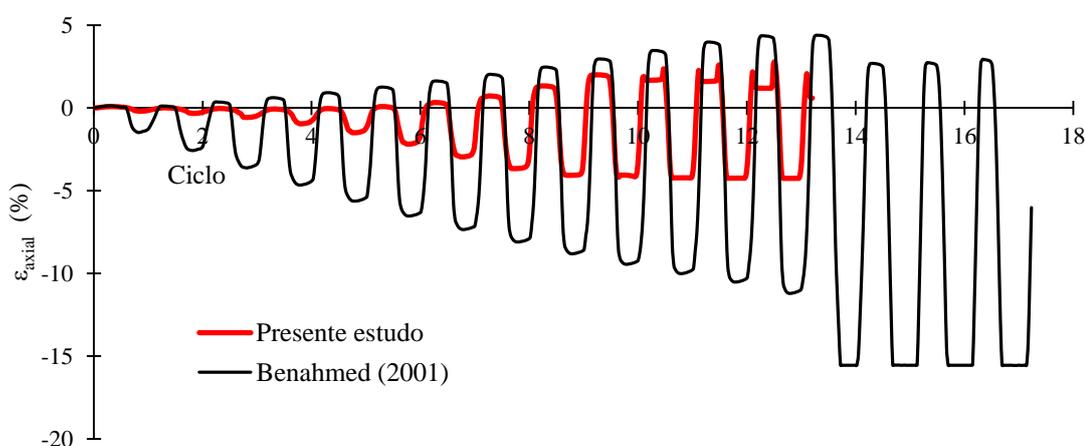


Figura 4.27: Sobreposição da evolução da deformação axial para o ensaio TCRF 53 executado por Benahmed (2001) e o executado dentro do presente estudo.

No que diz respeito à evolução dos excessos de poropressão ao longo do ensaio (Figura 4.28), o equipamento usado para o presente estudo, em razão ao uso de um atuador pneumático, quando comparado com um sistema eletromecânico do equipamento tipo Bishop – Wesley empregado por Benahmed (2001), apresenta dificuldade para atingir os valores de tensão desvio máxima na condição pós-ruptura (REES, 2014), criando uma grande distorção no corpo de prova e diminuindo, neste caso, o trecho de comportamento em mobilidade cíclica.

A situação é visível também na Figura 4.29, na qual são apresentadas as trajetórias $p' \times q$ experimentadas pelos corpos de prova em ambos os ensaios. No entanto, o sistema eletromecânico do triaxial Bishop-Wesley empregado nos ensaios de referência também mostrou dificuldade para atingir o valor mínimo de tensão desvio estabelecido na condição pós-ruptura.

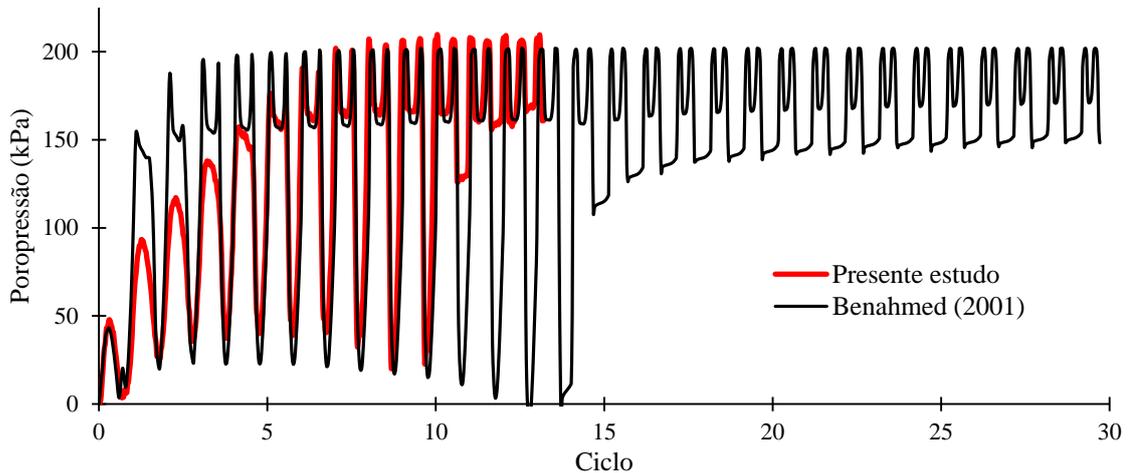


Figura 4.28: Sobreposição da evolução da excesso de poropressão para o ensaio TCRF 53 executado por Benahmed (2001) e o executado dentro do presente estudo.

Os resultados dos quatro ensaios executados, assim como os valores de referência se encontram no Quadro 4.3.

Quadro 4.3. Comparação dos resultados obtidos em termos do número máximo de ciclos para os ensaios executados e os de referência

| Código ensaio | $\pm\sigma_{dc}$ (kPa) | CSR | Benahmed (2001) | Presente estudo |
|---------------|------------------------|-------|-----------------|-----------------|
| TCRF 49 | ± 70 | 0,18 | 900 | Não executado |
| TCRF 50 | ± 80 | 0,2 | 82 | 276 |
| TCRF 51 | ± 88 | 0,220 | 30 | 100 |
| TCRF 52 | ± 105 | 0,26 | 7 | 14 |
| TCRF 53 | ± 122 | 0,31 | 4 | 7 |



Figura 4.29: Sobreposição das trajetórias de carregamento obtidas para o ensaio TCRF 53 executado por Benahmed (2001) e o executado dentro do presente estudo.

Em todos os ensaios executados foi atingida uma maior quantidade de ciclos de carga até o estado de ruptura, sendo esta diferença mais expressiva para tensões desvio cíclica menores. Nesse sentido, optou-se por dar prioridade aos ensaios com valores mais elevados de carga, totalizando assim quatro dos cinco ensaios de referência.

A comparação gráfica dos resultados obtidos é apresentada na Figura 4.30.

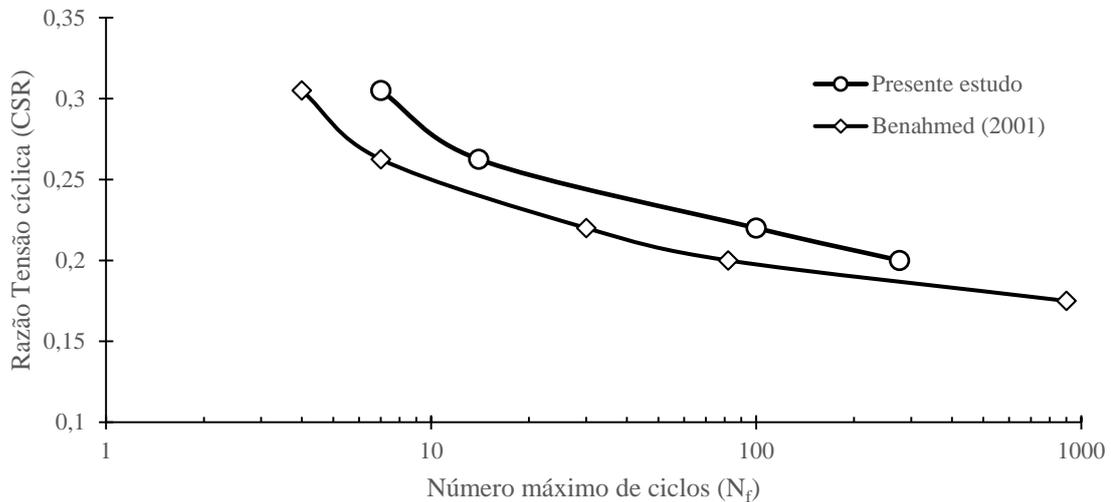


Figura 4.30: Variação do número máximo de ciclos (N_f) com a Razão de Tensão Cíclica (CSR) para os ensaios executados com areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)

Existiram dois fatores que não foram reproduzidos: primeiramente a célula de carga submersa instalada nos ensaios executados por Benahmed (2001), e a segunda os tamanho do corpo de prova.

Sobre o efeito do tamanho do corpo de prova, diferentes autores têm concordado com que o incremento no tamanho das amostras traz uma diminuição, geralmente não muito expressiva, na resistência alcançada (CHAUDHARY, 1971; TOWNSEND, 1978; OMAR; SADREKARIMI, 2015). É importante salientar que: os autores não encontraram diferenças muito importantes pelo efeito do tamanho do corpo de prova; alguns dos estudos mais recentes tem sido executados em corpos de prova cuja relação entre altura e diâmetro (h/d) é de 1.0.

Além dos valores mencionados acima, são fornecidos os resultados dos ensaios executados por Piffer (1992) *apud* Dupla (1995) para o mesmo material, seguindo duas condições de compactação (ver Figura 4.31). Sobre este estudo não se conhecem as condições de execução nem tipo de equipamento de ensaio.

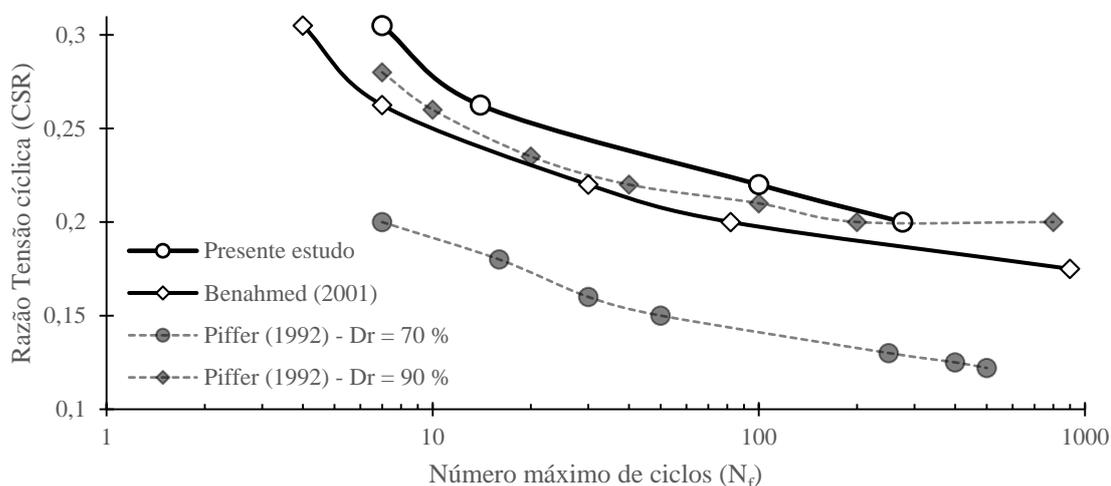


Figura 4.31: Comparação dos resultados discutidos com os obtidos por Piffer (1992) *apud* Dupla (1995)

Os três estudos demonstraram valores notadamente distintos nas curvas resultantes de cada condição de compactação. Infelizmente a ausência da informação referente às condições de moldagem dificulta a identificação de alguns fatores causantes dos efeitos.

O interesse da apresentação desta informação provém da dificuldade de estabelecer o valor de N_f como o principal fator de validação, o qual tem se mostrado bastante susceptível de gerar dispersão de resultados, ainda com um controle rigoroso das condições de moldagem e execução de ensaio, como descrito em 3.3 e 3.4.

A seguir são apresentadas as comparações nos resultados obtidos nos quatro ensaios executados (ver Figuras 4.32 a 4.35), a partir da informação disponibilizada pela cortesia de Nadia Benahmed.

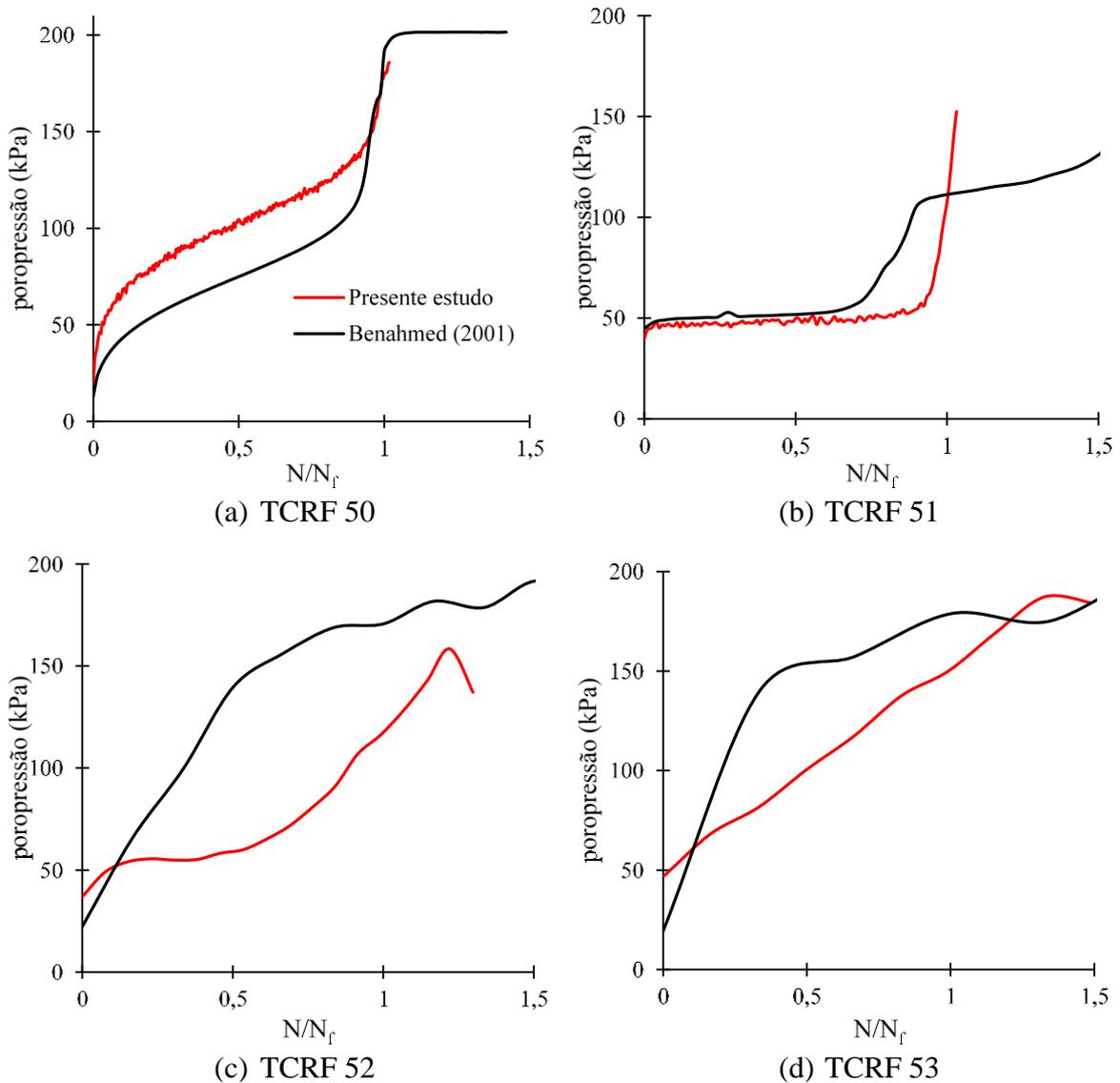


Figura 4.32: Comparação da evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado na areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)

Na anterior figura surgem diferentes tendências de comportamento, sendo que a evolução da poropressão medida a partir do seu valor residual exibe taxas de evolução relativamente consistentes (parte a e b), com amplitudes de poropressão bastante similares para as menores tensões desvio cíclicas. Para as maiores tensões desvio cíclicas, os ensaios executados por Benahmed (2001) exibiram maiores taxas de incremento nas poropressões com maiores amplitudes deste parâmetro, consistente com uma menor rigidez dos corpos de prova, sendo que a saturação em ambos os estudos foi executada seguindo os mesmos procedimentos.

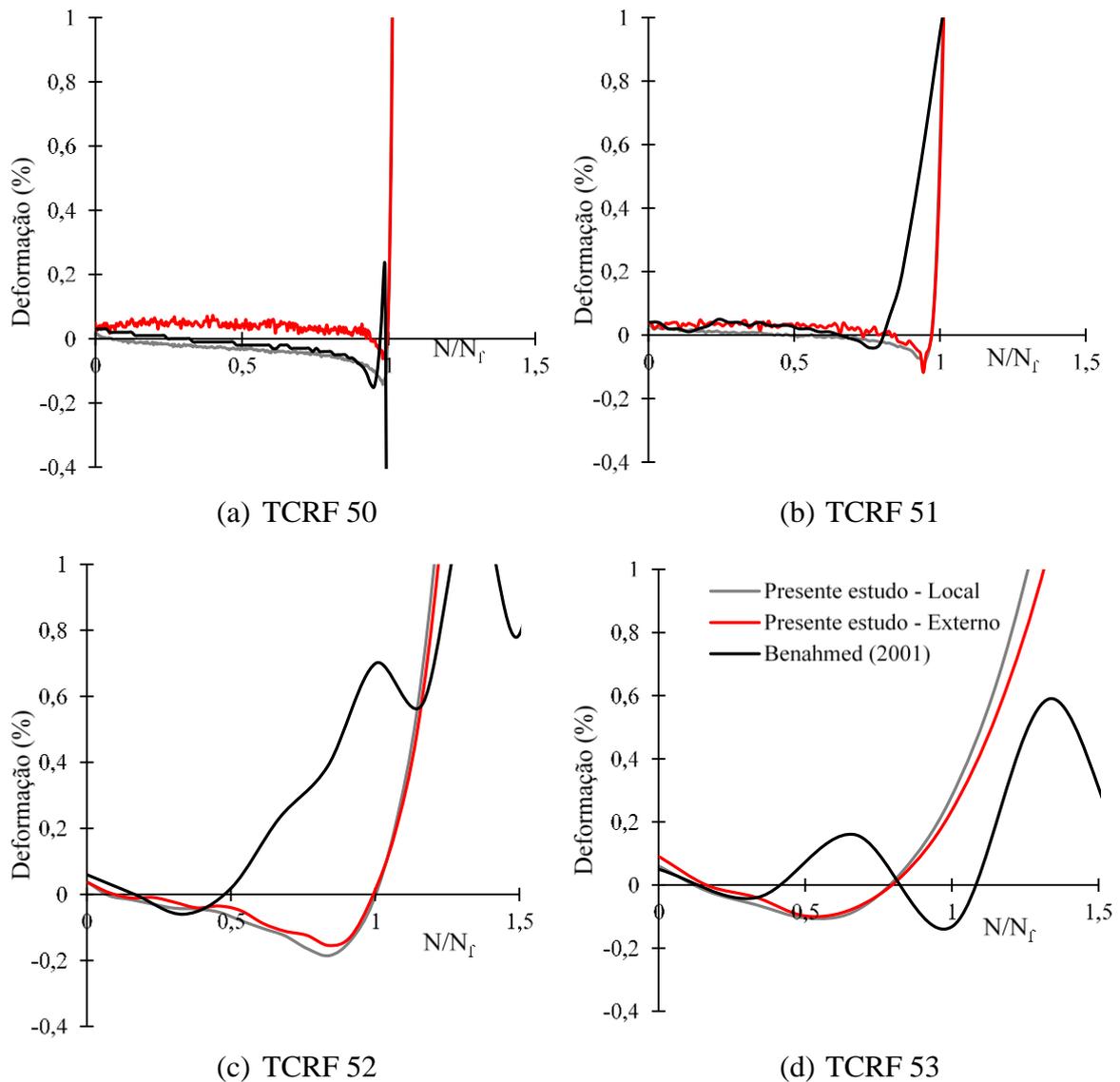


Figura 4.33: Comparação da evolução das deformações permanentes com o número de ciclos normalizado na areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)

Em termos de acumulação de deformações permanentes, a tendência foi similar à apresentada na Figura 4.32, tendo uma relativa correspondência entre os níveis de deformação exibidos pelos corpos de prova de ambos os estudos. São apresentadas as curvas para as medidas locais de deformação (sensores de efeito Hall) e para a medida externa (LVDT), considerando que o equipamento usado nos ensaios de referência tinha unicamente medidas externas de deslocamento. A tendência nos quatro casos foi a de gerar acúmulos de deformação na região de extensão.

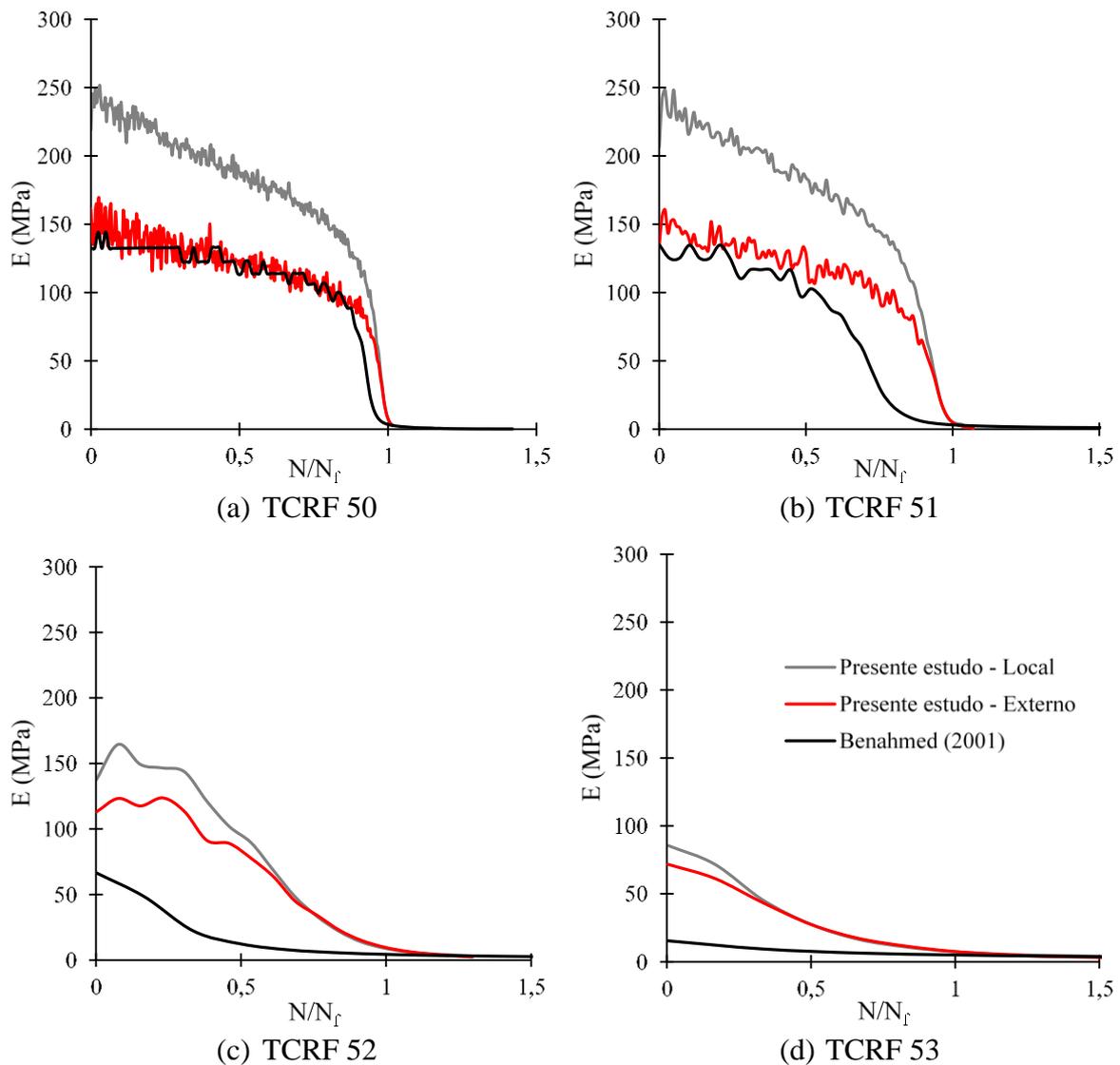


Figura 4.34: Comparação da degradação do módulo de elasticidade secante com o número de ciclos normalizado, na areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)

Considerando que a amplitude de deformações dos corpos de prova ensaiados sob tensões desvio menores teve boa correspondência, os valores determinados para o módulo de elasticidade secante, determinado a partir das medidas externas, guarda uma boa correspondência entre os ensaios executados no presente estudo e os de referência.

No caso das maiores tensões desvio, os corpos de prova da referência exibiram uma maior deformabilidade, não apenas medida no acúmulo de deformações permanentes, mas também na amplitude descrita ao longo dos ensaios.

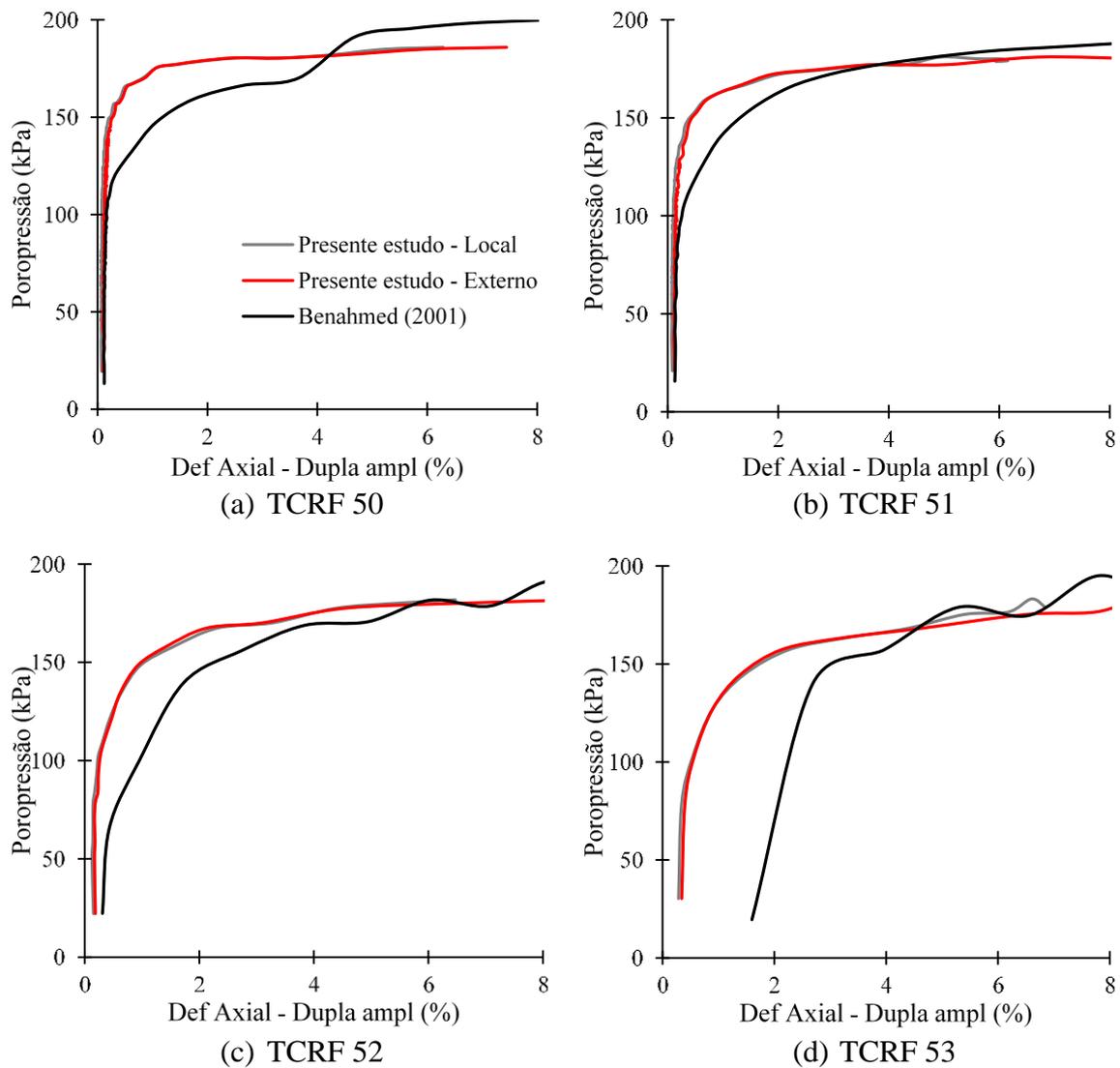


Figura 4.35: Comparação da evolução da poropressão residual com a dupla amplitude de deformação na areia Hostun RF, presente estudo e Benahmed (2001)

Finalmente, no que diz da evolução na poropressão residual, em todos os casos os corpos de prova ensaiados dentro do presente estudo exibiram tendências menos dúcteis do que no caso dos ensaios de referência. A leitura da poropressão em ambos os estudos foi feita logo na saída da câmara triaxial, pelo qual acredita-se não existe um processo de dissipação nas linhas, principalmente nas flexíveis.

4.4.3. Ensaio para avaliar a repetibilidade dos resultados

Foram executados dois grupos de ensaios para avaliar a repetibilidade usando o material do presente estudo (areia de Osório), nas condições definidas no Quadro 4.4. Os ensaios foram executados com o material sem adição de fibras.

Quadro 4.4. Condições de moldagem e ensaio para ensaios de repetibilidade

| Índice de Vazios | p'_0 (kPa) | $\pm\sigma_{dc}$ (kPa) | Quantidade de ensaios |
|------------------|--------------|------------------------|-----------------------|
| 0,63 | 100 | ± 60 | 4 |
| | | ± 80 | 3 |

4.4.4. Resultados de ensaios para avaliar a repetibilidade dos resultados

Nos seguintes itens são apresentados as comparações e discussões sobre os ensaios executados para avaliar a repetibilidade dos resultados. Os resultados individuais são apresentados no Apêndice A.

4.4.4.1. Ensaio executados com tensão desvio cíclica de ± 60 kPa

Para os quatro ensaios executados sob mesmas condições, obteve-se uma dispersão bastante importante de resultados, como apresentado no Quadro 4.5.

Quadro 4.5. Número máximo de ciclos alcançados em amostras com iguais condições de moldagem e ensaio ($\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa)

| Código de ensaio | N_f |
|------------------|-------|
| R1 | 40 |
| R2 | 177 |
| R3 | 120 |
| R4 | 422 |

A geração de poropressões ao longo dos ensaios é apresentada na Figura 4.36. Ainda que não existiu uma correspondência no parâmetro N_f , é visível uma semelhança para o comportamento das curvas obtidas.

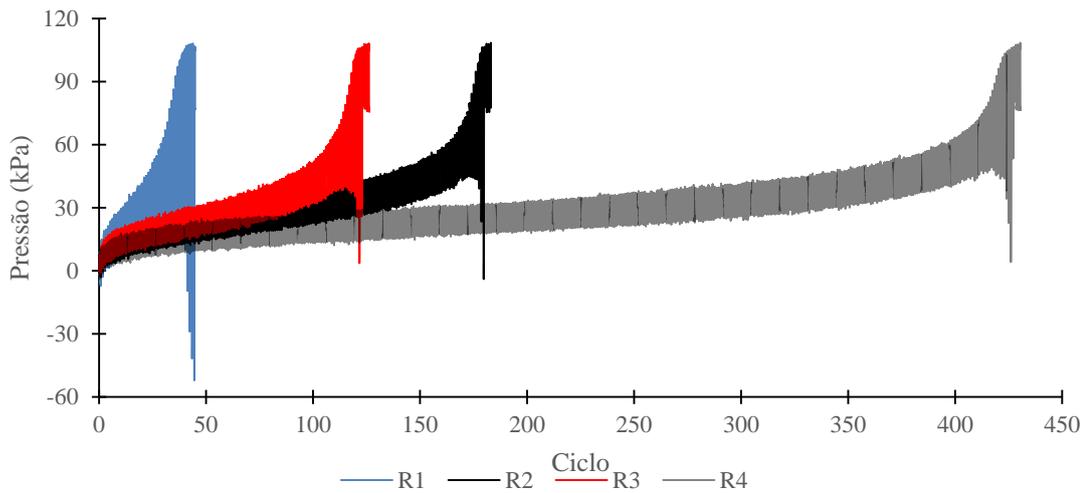


Figura 4.36: Resultados obtidos em corpos de prova com $e = 0,63$, $p'_0 = 100$ kPa e tensão desvio cíclica = ± 60 kPa (sem fibras), para revisão de repetibilidade

Com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados, os resultados são apresentados em termos da poropressão residual para cada ciclo de carga (ver Figura 4.37).

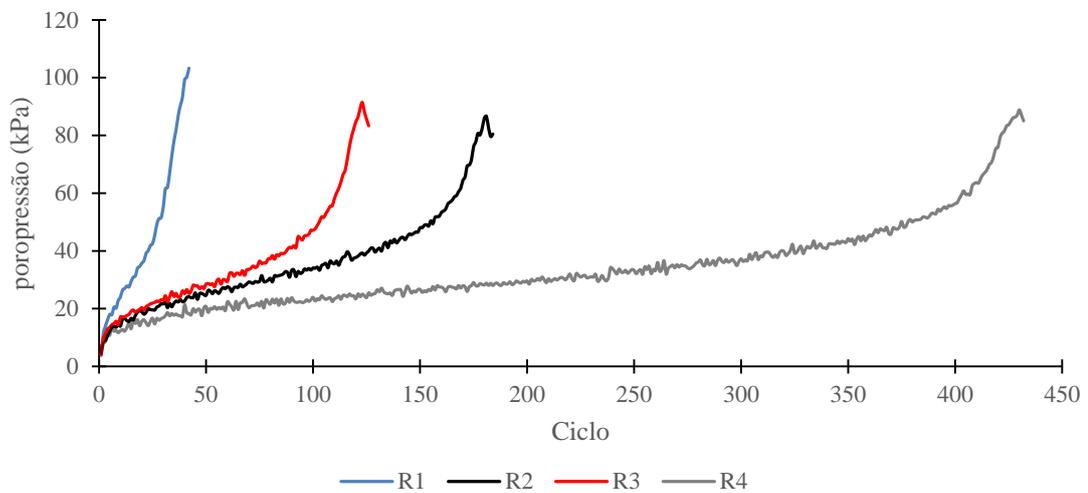


Figura 4.37: Poropressão residual, ensaios para repetibilidade, com $\pm \sigma_{dc} = \pm 60$ kPa

O efeito do número de ciclos é diminuído através da normalização dos ciclos de carga com relação ao número máximo para cada ensaio (ver Figura 4.38).

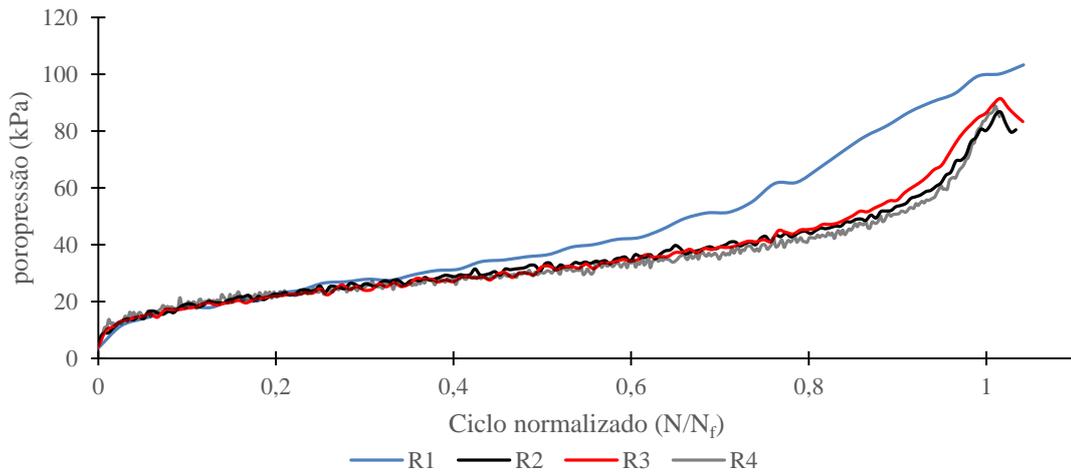


Figura 4.38: Poropressão residual com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa

Nesta representação surge uma boa correspondência para três dos quatro ensaios realizados, permitindo identificar uma clara tendência de comportamento do material para o nível de carregamento imposto, situação visível também nos ensaios executados por Benahmed (2001).

No que concerne ao acúmulo de deformações ao longo dos ensaios, a normalização do número de ciclos, a resposta do material permite, não apenas a identificação de uma tendência de comportamento, mas também a visualização de valores de deformação similares para a condição de ruptura do material (Figura 4.39).

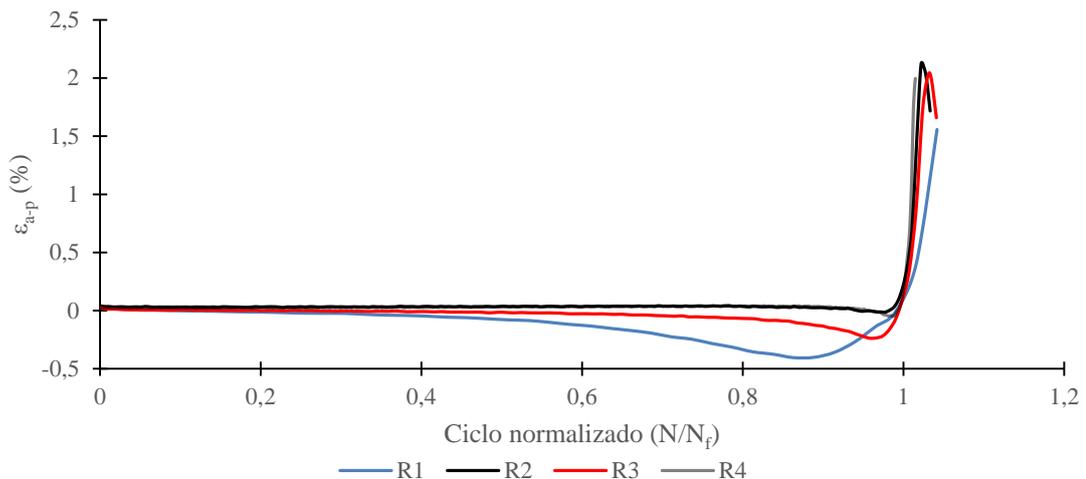


Figura 4.39: Acúmulo de deformações permanentes com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa

Se comparados os ensaios em termos diferentes ao número de ciclos, como sugere a Figura

4.40, surge correspondência para a dupla amplitude de deformações gerada pelas amostras.

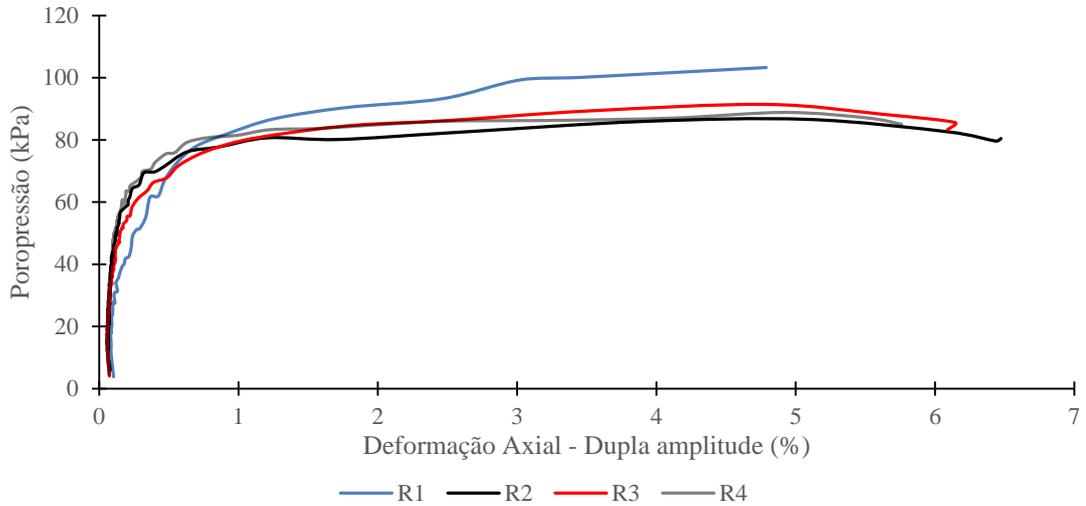


Figura 4.40: Geração de excessos de poropressão com o incremento na dupla amplitude de deformação, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa

A correspondência para a dupla amplitude de deformações, em ensaios com iguais magnitudes de carregamento, permite obter valores absolutos para o módulo de elasticidade secante muito próximos (ver Figura 4.41).

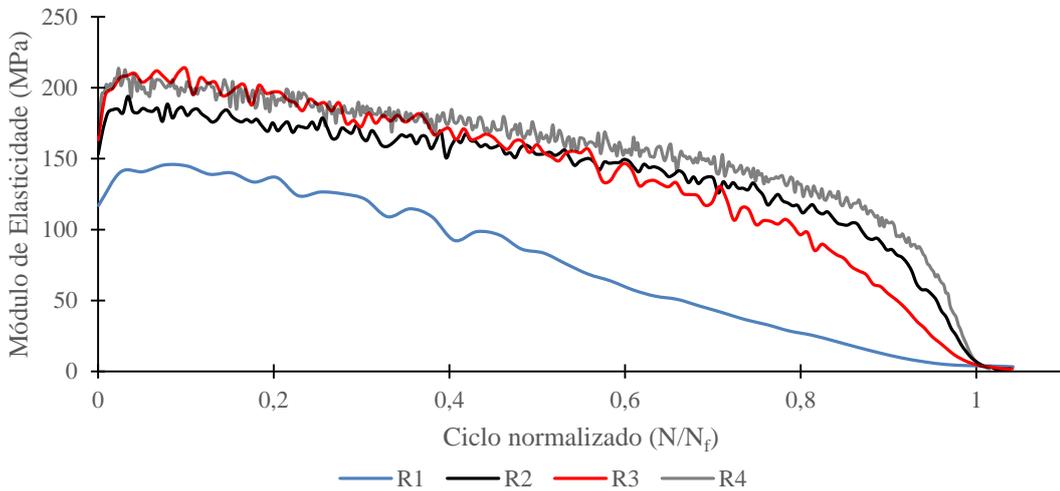


Figura 4.41: Degradação do módulo de elasticidade secante com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa

Em termos da energia dissipada por ciclo de carga, consistente na somatória das áreas criadas pelas curvas tensão – deformação para cada ciclo de carga, surge uma boa correspondência de

comportamento nas amostras ensaiadas Figura 4.42.

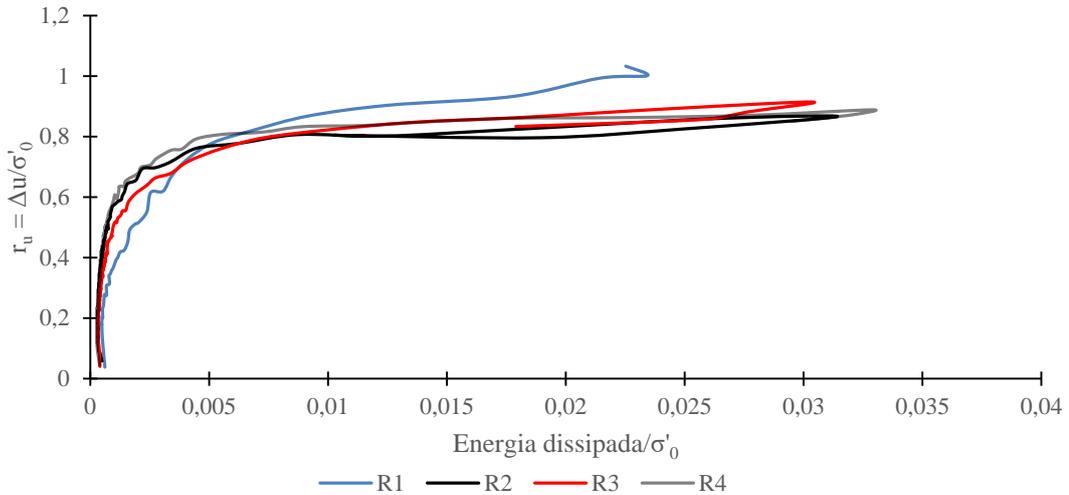


Figura 4.42: Variação da energia dissipada por ciclo normalizada, com o incremento no parâmetro de poropressão, em ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa

4.4.4.2. Ensaios executados com tensão desvio cíclica de ± 80 kPa

Neste caso, foram executados três ensaios seguindo as condições descritas no Quadro 4.4. Neste caso, obteve-se uma menor dispersão de resultados, correspondente a um nível de carregamento mais exigente do que no caso anterior (ver Quadro 4.6).

Quadro 4.6. Número máximo de ciclos alcançados em amostras com iguais condições de moldagem e ensaio ($\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa)

| Código de ensaio | N _f |
|------------------|----------------|
| R1 | 11 |
| R2 | 29 |
| R3 | 36 |

Embora a menor dispersão, as curvas de geração de poropressões mostraram uma menor semelhança para o comportamento do ensaio R1 quando comparado com os restantes (Figura 4.43), a qual é discutida nas seguintes ao longo deste item.

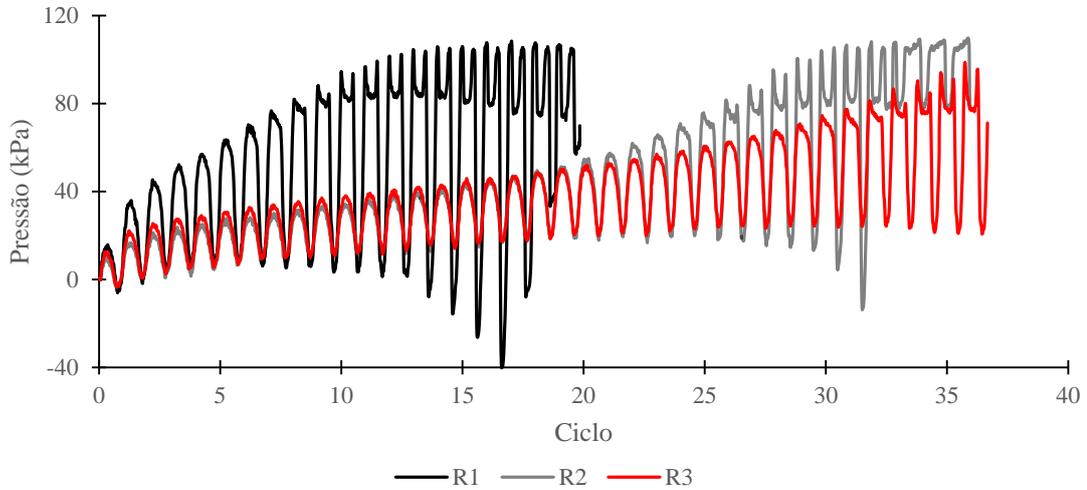


Figura 4.43: Resultados obtidos em corpos de prova com $e = 0,63$, $p'_0 = 100$ kPa e tensão desvio cíclica $= \pm 80$ kPa (sem fibras), para revisão de repetibilidade

A geração de acréscimos de poropressão definidos pelo valor residual permite visualizar uma boa correspondência entre dois dos três ensaios, sendo que o ensaio restante apresentou uma tendência mais forte de neste sentido, afetando a semelhança entre os três (Figura 4.44).

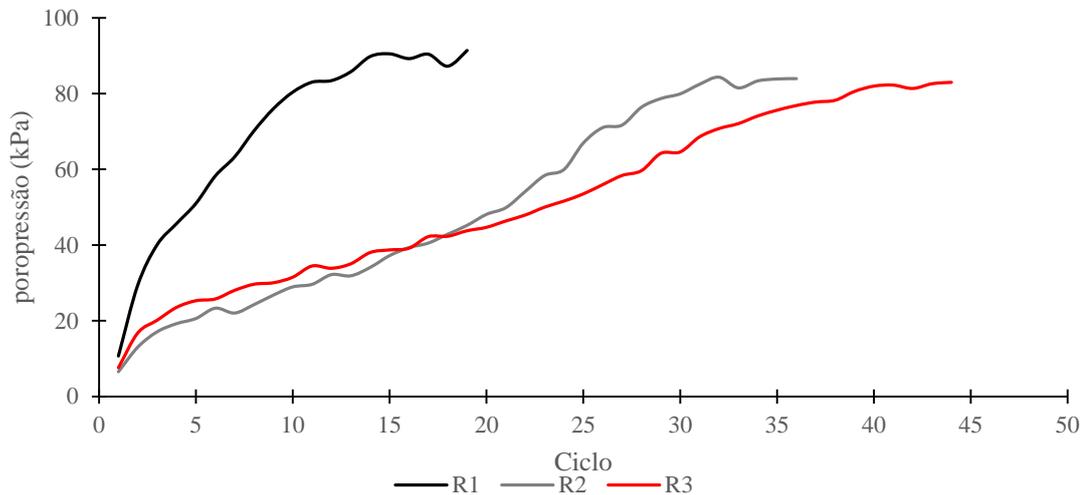


Figura 4.44: Poropressão residual, ensaios para repetibilidade, com $\pm \sigma_{dc} = \pm 80$ kPa

A normalização dos ciclos de carga permite identificar a maior tendência de acúmulo de poropressão no ensaio R1 no estágio inicial do cisalhamento, seguido por um comportamento mais similar ao dos outros dos ensaios. Nos três casos, a tendência generalizada de

comportamento das amostras é de um colapso incremental praticamente ao longo do ensaio (Figura 4.45).

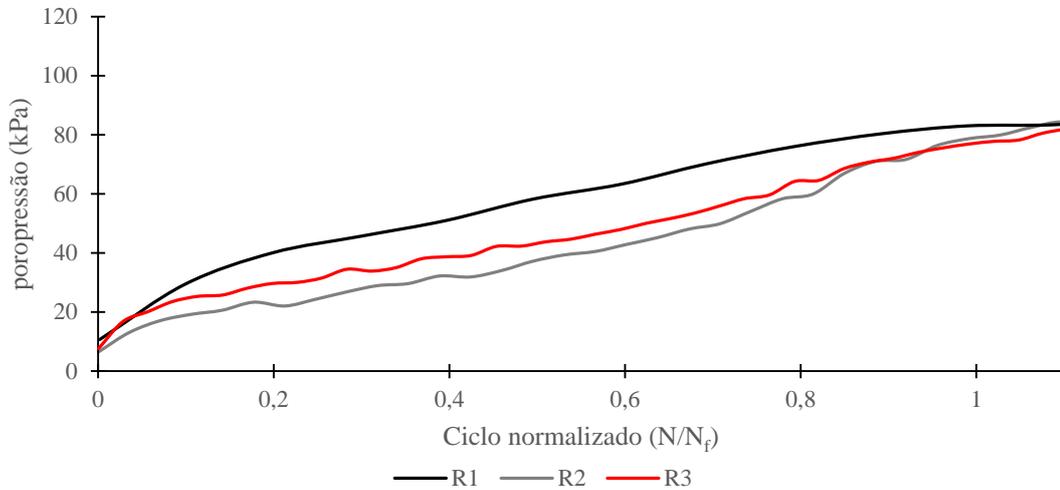


Figura 4.45: Poropressão residual com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa

A maior tendência de extensão do ensaio R1 (Figura 4.46) somado ao fato de apresentar maiores amplitudes de deformação do que nos outros dois ensaios (Figura 4.47) afetou de forma importante o processo de comparação, porém, os dois ensaios restantes mantêm uma boa correspondência tanto em termos de valores como pela tendência de comportamento.

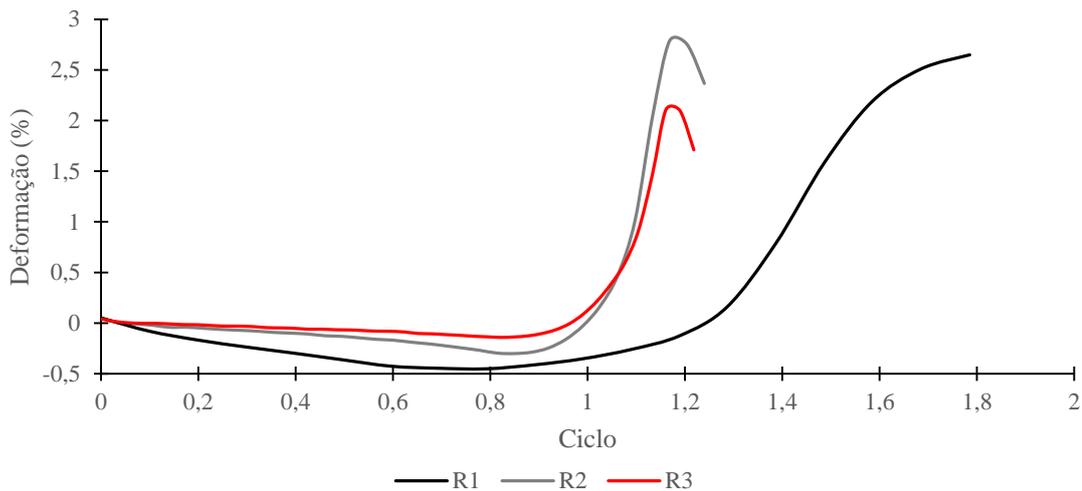


Figura 4.46: Acúmulo de deformações permanentes com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa

Ao eliminar o número de ciclos como uma variável visível dentro do comportamento, os comportamentos dos ensaios melhoram a correspondência, como apresentado na Figura 4.47.

No entanto, a maior deformabilidade experimentada no ensaio R1, mantêm uma diferença visível com os ensaios restantes.

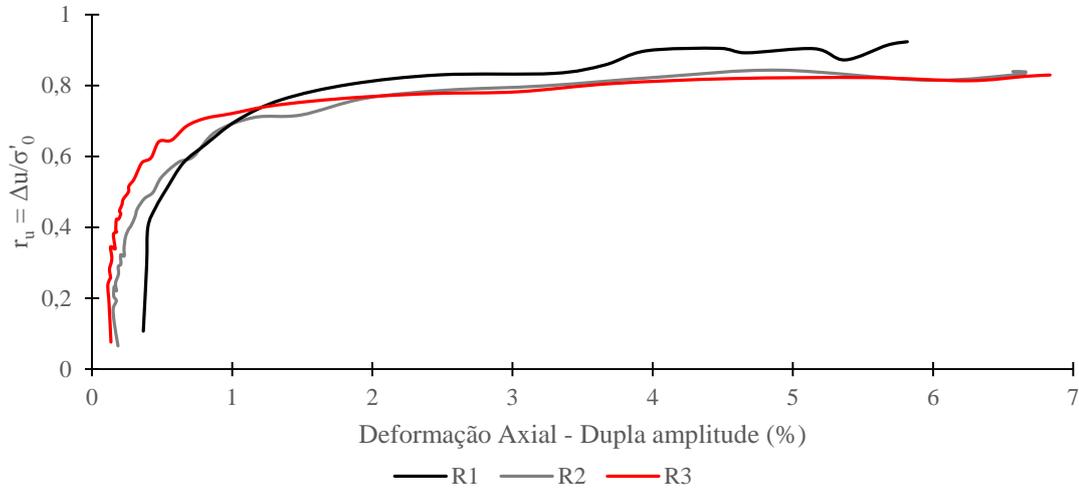


Figura 4.47: Geração de excessos de poropressão com o incremento na dupla amplitude de deformação, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa

O nível de carregamento imposto às amostras com as decorrentes deformações, fez com que os módulos de elasticidade secante obtidos gerassem maior dispersão de leituras, mas com algum nível de correspondência entre os ensaios R2 e R3 (ver Figura 4.48).

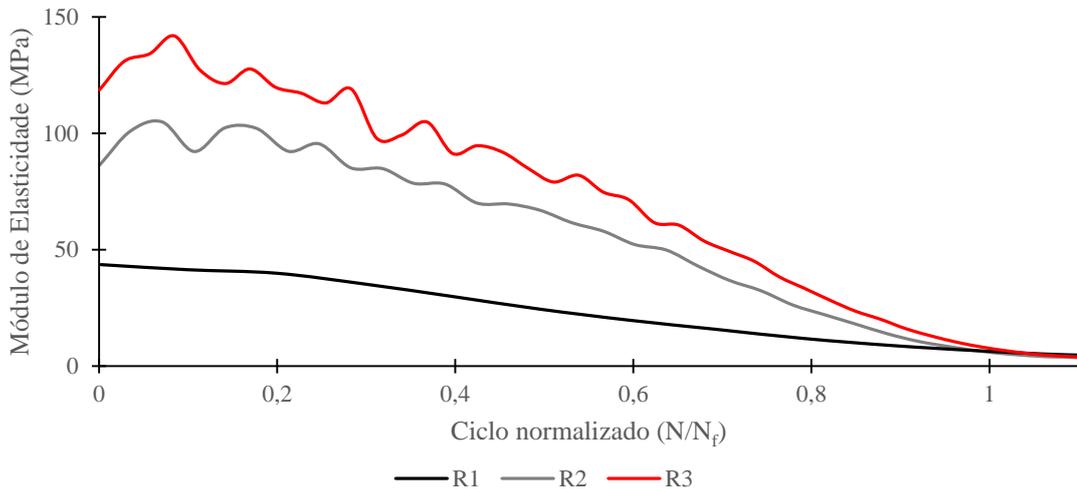


Figura 4.48: Degradação do módulo de elasticidade secante com normalização do número de ciclos, ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa

A dissipação de energia exibida pelos corpos de prova (Figura 4.49) manteve a tendência de maior capacidade (relacionada à deformabilidade e baixo módulo de elasticidade) de dissipação

para o ensaio R1 do que para os restantes do grupo. O comportamento do mesmo ensaio para o final do comportamento são apenas valores obtidos após a ruptura, surgindo leituras aparentemente inconsistentes.

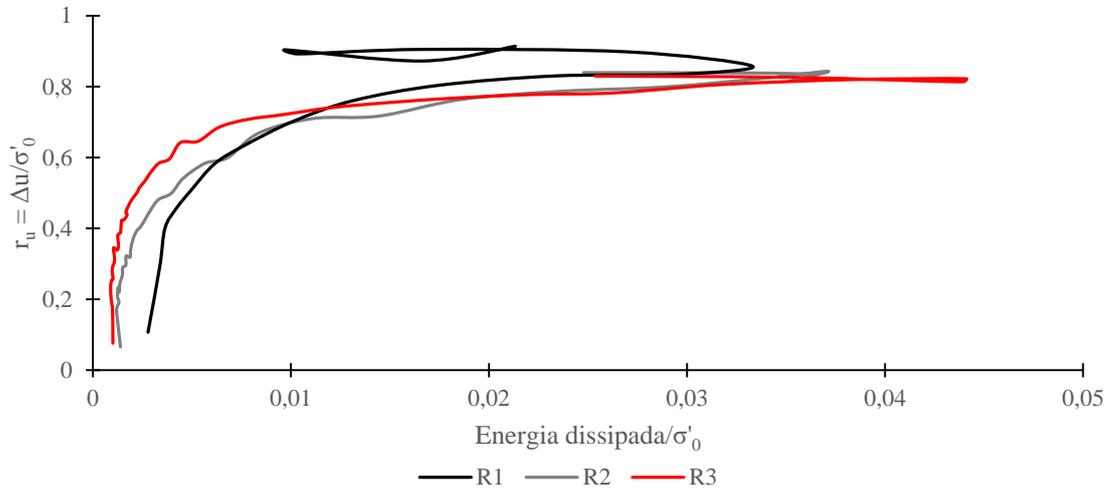


Figura 4.49: Variação da energia dissipada por ciclo normalizada, com o incremento no parâmetro de poropressão, em ensaios para repetibilidade, com $\pm\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa

5. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

Ao longo do presente capítulo serão apresentados os resultados do processo experimental, tanto no que concerne à presente pesquisa quanto aos ensaios executados em alguns trabalhos anteriores. A partir desta informação será propostas uma série de análises, com as quais se tentará aportar para o avanço da linha de conhecimento dos solos melhorados com a adição de fibras.

A totalidade dos ensaios cíclicos apresentados neste capítulo usando areia de Osório foi executada dentro da presente pesquisa. Já alguns dos ensaios estáticos monotônicos foram executados por Festugato (2008, 2011).

De maneira a auxiliar na leitura e interpretação dos resultados apresentados, primeiramente é feita uma explicação das notações empregadas sobre os diferentes parâmetros considerados nos ensaios.

Posteriormente são apresentados os resultados dos ensaios estáticos monotônicos, objetivando nos resultados dos ensaios em condição não drenada. A partir dos valores obtidos nestes ensaios são definidas as envoltórias de ruptura e parâmetros de resistência ao cisalhamento para cada condição avaliada.

Nesta sequência, são apresentados os principais resultados de ensaios cíclicos executados em condição não drenada sob tensão controlada.

Finalmente, é feita uma discussão sobre os diferentes comportamentos observados quando consideradas as diferenças entre os materiais, densidades e as magnitudes dos carregamentos impostos.

5.1. DEFINIÇÕES E NOTAÇÕES BÁSICAS

Os valores para os invariantes de tensão p' (tensão efetiva média normal) e q (tensão desvio), utilizados na apresentação gráfica dos resultados, são definidos como:

$$p' = \frac{1}{3} (\sigma'_1 + 2 \sigma'_{2,3}) \quad \text{Equação 5.1}$$

$$q' = (\sigma'_1 - \sigma'_{2,3}) \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde: σ'_1 : tensão efetiva axial;

$\sigma'_{2,3}$: tensão efetiva radial;

Para os ensaios cíclicos, define-se a poropressão normalizada ou parâmetro de poropressão, assim:

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_0} \quad \text{Equação 5.3}$$

Onde: Δu : Excesso de poropressão gerada durante o cisalhamento cíclico;

σ'_0 : Tensão confinante efetiva no início da fase de cisalhamento;

Dito parâmetro adota valores entre 0,0 (no início do ensaio) e 1,0 (após ter atingido a condição de ruptura).

Também, para efeitos de interpretação, define-se a poropressão residual como a correspondente obtida para uma tensão desvio cujo valor seja igual ao inicial da fase de cisalhamento não drenado (ver Figura 5.1). Dentro do presente estudo, já que o adensamento dos corpos de prova ocorreu sob condições isotrópicas, o valor da tensão desvio considerada foi zero para a determinação da poropressão residual.

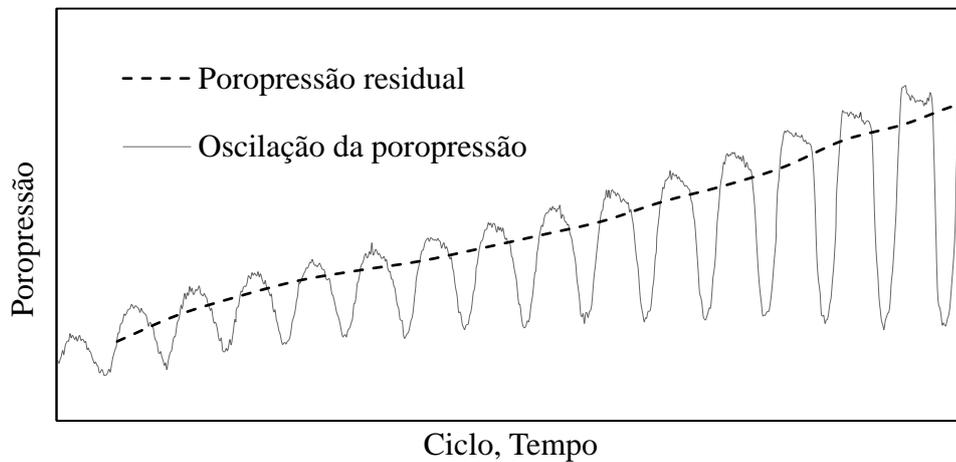


Figura 5.1: Representação gráfica da poropressão residual (Fonte: Presente estudo)

Na mesma condição definida para a poropressão residual, foi obtido o valor da deformação axial acumulada para cada ciclo, nomeada como deformação permanente (ver Figura 5.2).

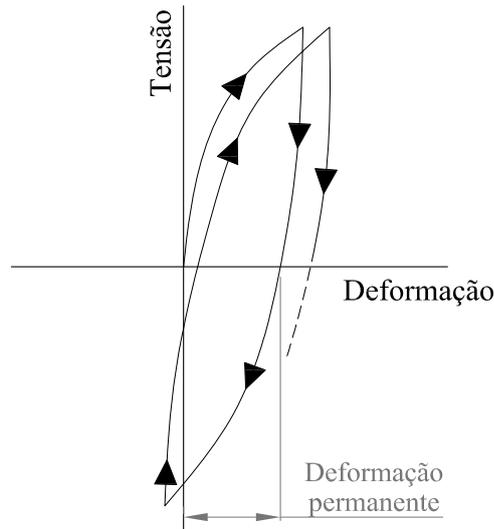


Figura 5.2: Representação gráfica da deformação permanente associada com um ciclo de carga

Para efeitos da análise de deformabilidade nas amostras avaliadas, é considerada a dupla amplitude de deformação, a qual corresponde ao intervalo de deformação existente entre as duas parcelas do ciclo de carga (carga máxima e mínima). Ao ser um módulo, este parâmetro é sempre positivo, ainda que o corpo de prova pudesse estar experimentando deformações permanentes predominantes de extensão (ver Figura 5.3).

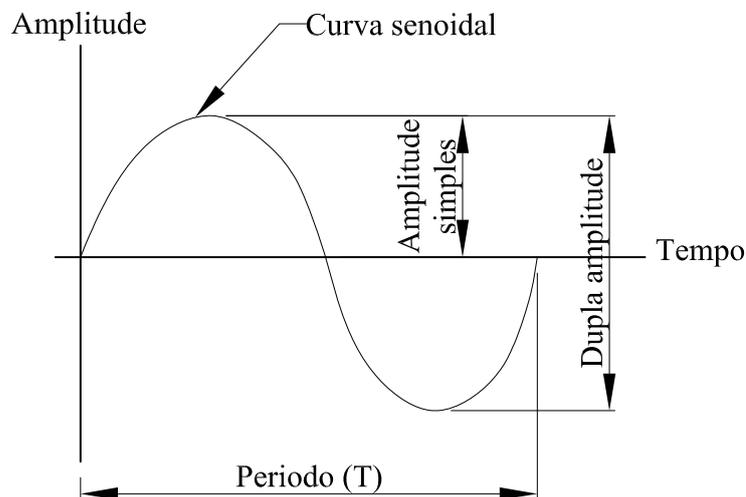


Figura 5.3: Representação da dupla amplitude de deformação considerada no ensaio (ASTM-D3999, 2011)

O módulo de elasticidade secante, como ilustrado na Figura 5.4, corresponde à declividade da linha reta definida entre os pontos de máxima deformação para cada ciclo. A energia dissipada em cada ciclo de carga corresponde a área contida dentro do ciclo de carga na curva tensão vs. deformação, representada na mesma figura.

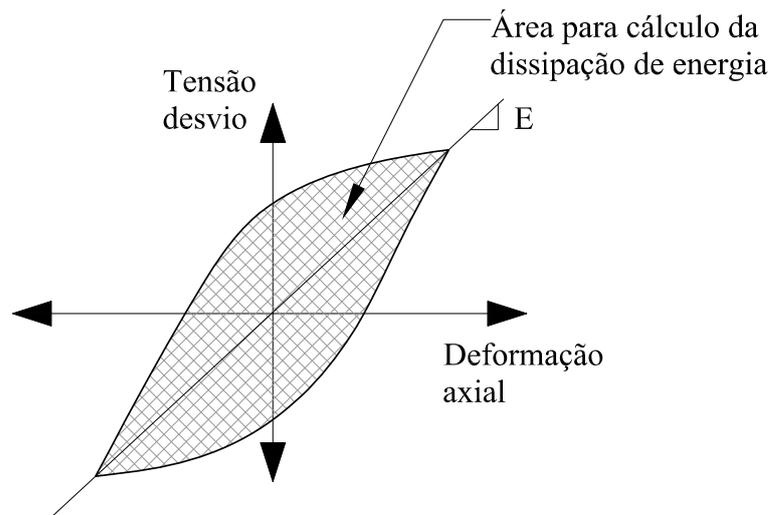


Figura 5.4: Ciclo típico de carga e definição do módulo de elasticidade secante

5.2. COMPORTAMENTO TENSÃO - DEFORMAÇÃO

A seguir são apresentados os resultados dos diferentes ensaios executados, tanto nas condições monotônicas (drenada e não drenada) quanto na condição cíclica não drenada.

5.2.1. Carregamento monotônico drenado e não drenado

Dentro do presente estudo foram executados ensaios triaxiais em condição CIU seguindo as mesmas condições de dosagem e moldagem estabelecidas para os ensaios cíclicos. Da mesma forma, são apresentados os resultados dos ensaios executados por Festugato (2011), principalmente para condição drenada de cisalhamento. No total, são apresentados os resultados de 24 ensaios triaxiais, sendo metade deles sob condição drenada e a metade restante sob condição não drenada. No Quadro 5.1 são sumarizadas as condições dos corpos de prova avaliados assim como os parâmetros e tipo de ensaio adotados em cada caso.

Os ensaios triaxiais consolidados - não drenados foram executados visando a definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para cada tipo de condição, assim como para avaliar o efeito da compactação e da inclusão das fibras na matriz.

Para os ensaios executados ao longo do presente estudo foi definida para o sistema de carga uma velocidade de deslocamento constante de 0,6 mm/min, equivalente a uma taxa de deformação axial de 0,03 %/min. Nos ensaios executados por Festugato (2011) foi definida uma velocidade de deslocamento de 0,015 mm/min, correspondente a uma taxa de deformação axial de 0,0075 %/min.

Quadro 5.1. Condições de dosagem e moldagem dos corpos de prova estudados, e tipos de condições de ensaio consideradas

| Índice de vazios (e) | % Fibra | Tipo de ensaio | Tensões efetivas de confinamento (kPa) | Fonte | Localização |
|----------------------|---------|----------------|--|------------------|----------------------------|
| 0,75 | 0 | CID | 50, 100 e 200 | Festugato (2008) | Figura 5.5 Figura 5.6 |
| | | CIU | 20, 100 e 200 | Presente estudo | |
| | 0,5 | CID | 20, 100 e 200 | Festugato (2008) | Figura 5.7 Figura 5.8 |
| | | CIU | 20, 100 e 200 | Festugato (2011) | |
| 0,63 | 0 | CID | 20, 100 e 200 | Festugato (2011) | Figura 5.9 Figura 5.10 |
| | | CIU | 20, 100 e 200 | Presente estudo | |
| | 0,5 | CID | 20, 100 e 200 | Festugato (2011) | Figura 5.11 Figura 5.12 |
| | | CIU | 20, 100 e 200 | Presente estudo | |

Para cada condição de índice vazios assim como para as condições sem e com fibras e tipo de ensaio (drenado ou não drenado), são fornecidas as seguintes curvas de comportamento:

- trajetórias de carregamento no plano p' vs. q ;
- comportamento tensão desvio vs deformação axial;
- variação da deformação volumétrica com o incremento na deformação axial;
- geração de poropressões com o incremento na deformação axial.

Na Figura 5.5(a) são apresentadas as trajetórias obtidas para as amostras de areia sem fibras sob carregamento não drenado, com um índice de vazios de 0,75 correspondente com uma densidade relativa de 50%. A envoltória de resistência para o mesmo material obtida através de ensaios drenados é apresentada na Figura 5.6.

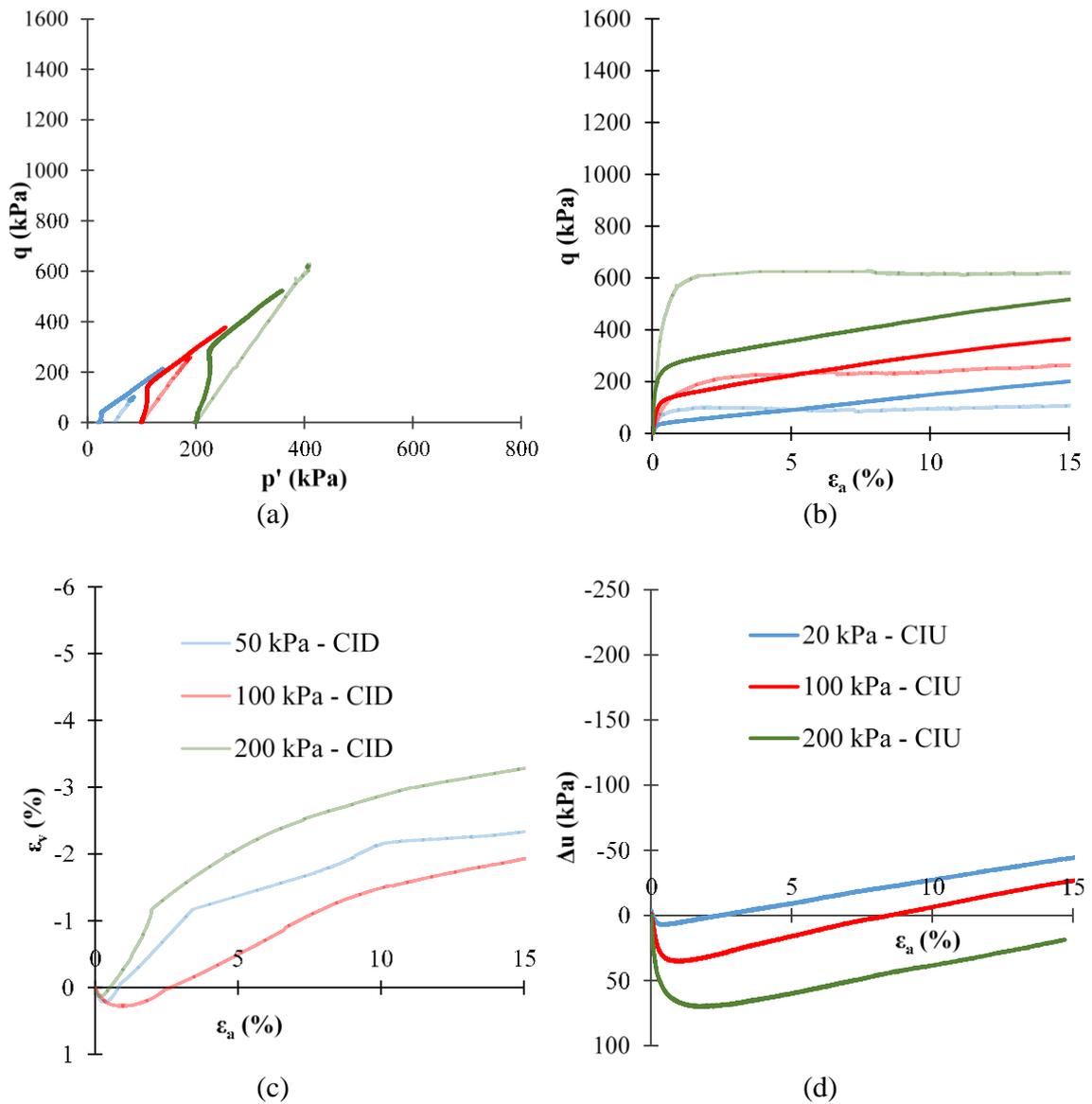


Figura 5.5: Comportamento de amostras de areia sob carregamento monotônico em condições drenadas e não drenadas ($e = 0,75$ – sem fibras)

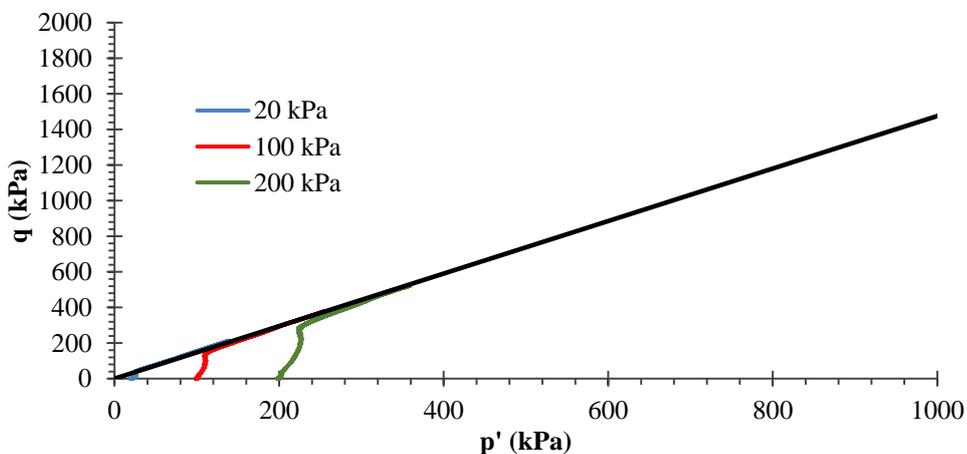


Figura 5.6: Comportamento de areia sob carregamento monotônico em condições não drenadas ($e = 0,75$ – sem fibras)

O comportamento das amostras nesta condição exibe uma tendência de incremento nas poropressões nas três amostras ensaiadas, durante os primeiros estágios do cisalhamento. Esta tendência alcança seus máximos valores para níveis de deformação axial inferior de 2%. Após este comportamento, as amostras começam a se aproximar da envoltória de resistência, para finalmente continuar suas trajetórias seguindo o caminho desta última.

Salienta-se o fato da convergência nas trajetórias de tensões em direção a uma única envoltória de resistência, seja na condição drenada ou não drenada.

Na Figura 5.7 (a) são apresentadas as trajetórias de carga sob condição não drenada obtidas para misturas de areia e 0,5% de fibras, mantendo um índice de vazios de 0,75.

Ainda com a tendência compressiva e de incremento nas poropressões que exibem as amostras, a tendência dilatante obtida com a inclusão das fibras na matriz, cria uma maior tendência de diminuição nos níveis de poropressão. O comportamento da curva tensão desvio Vs. deformação axial não permite a exibição de um valor pico característico de resistência para nenhuma das duas condições (com e sem fibras), surgindo uma tendência constante de crescimento na tensão desvio com o aumento das deformações axiais.

A sobreposição de trajetórias de tensões obtidas tanto para a condição drenada quanto para a condição não drenada, ainda que não apresente convergência a qual permita descrever uma única envoltória de resistência, dá uma noção da proximidade entre aquela descrita pelos ensaios drenados e os não drenados (ver Figura 5.8).

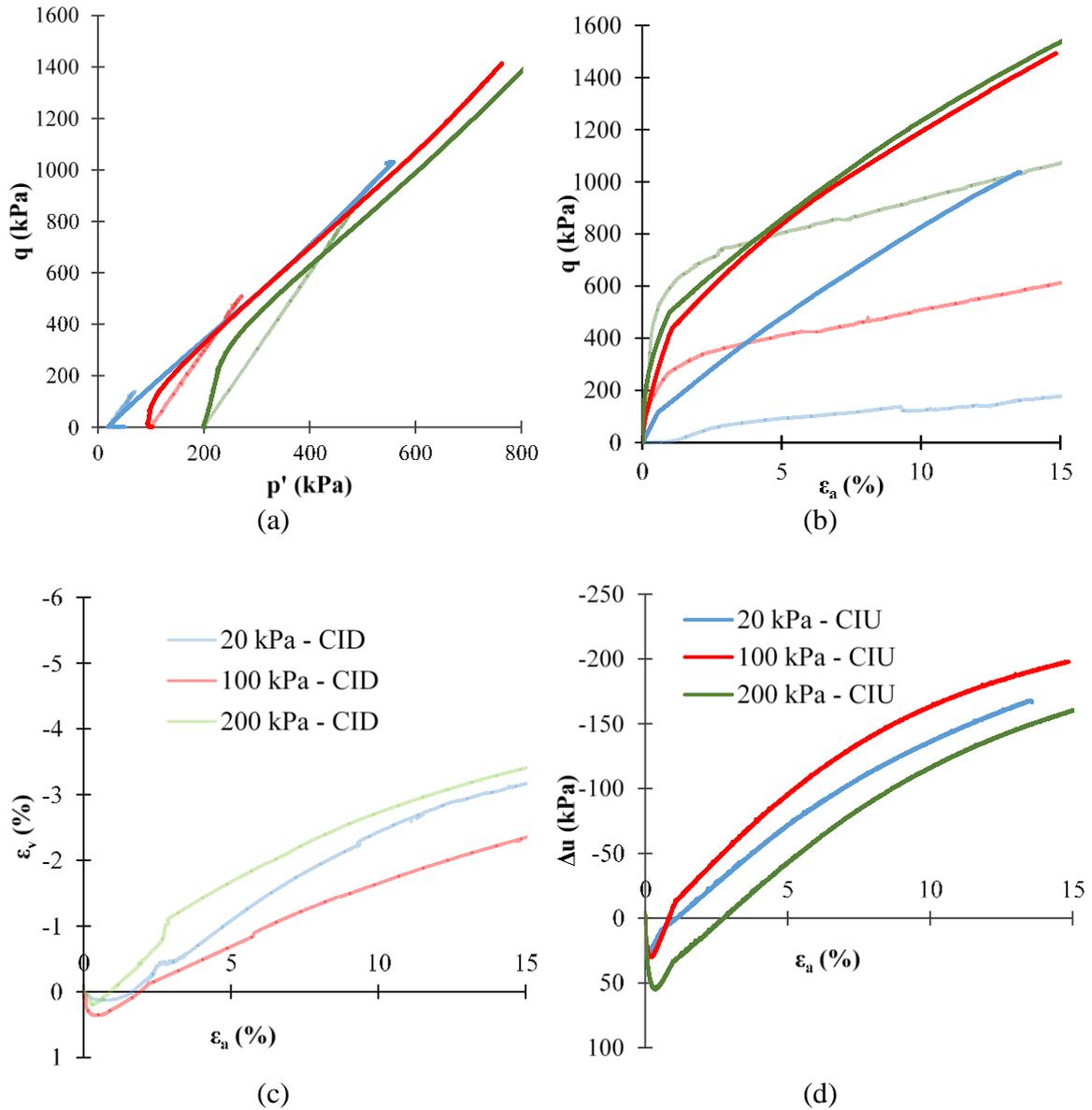


Figura 5.7: Comportamento de amostras de areia sob carregamento monotônico em condições drenadas e não drenadas ($e = 0,75 - 0,5\%$ fibras)

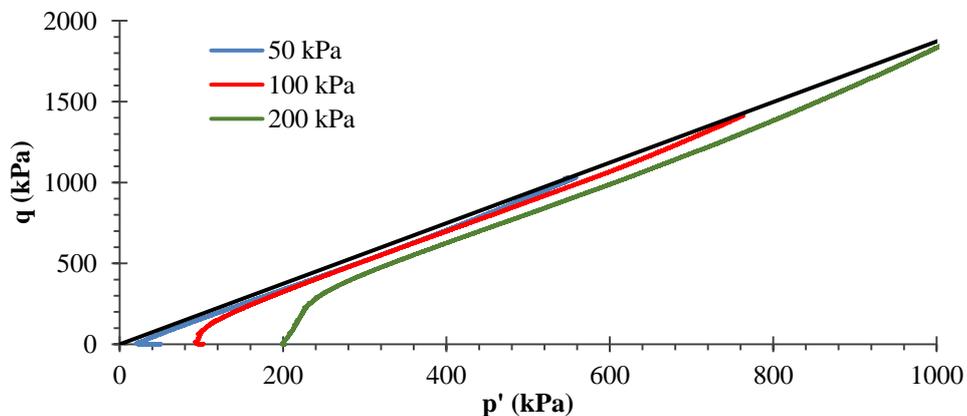


Figura 5.8: Comportamento de areia sob carregamento monotônico em condições não drenadas ($e = 0,75 - 0,5\%$ de fibras)

A seguir são apresentados os resultados, tanto sob condição não drenada quanto drenada, para amostras compactadas até um índice de vazios de 0,63, sem fibras (Figura 5.9) e com inclusão de 0,5 % de fibras (Figura 5.11).

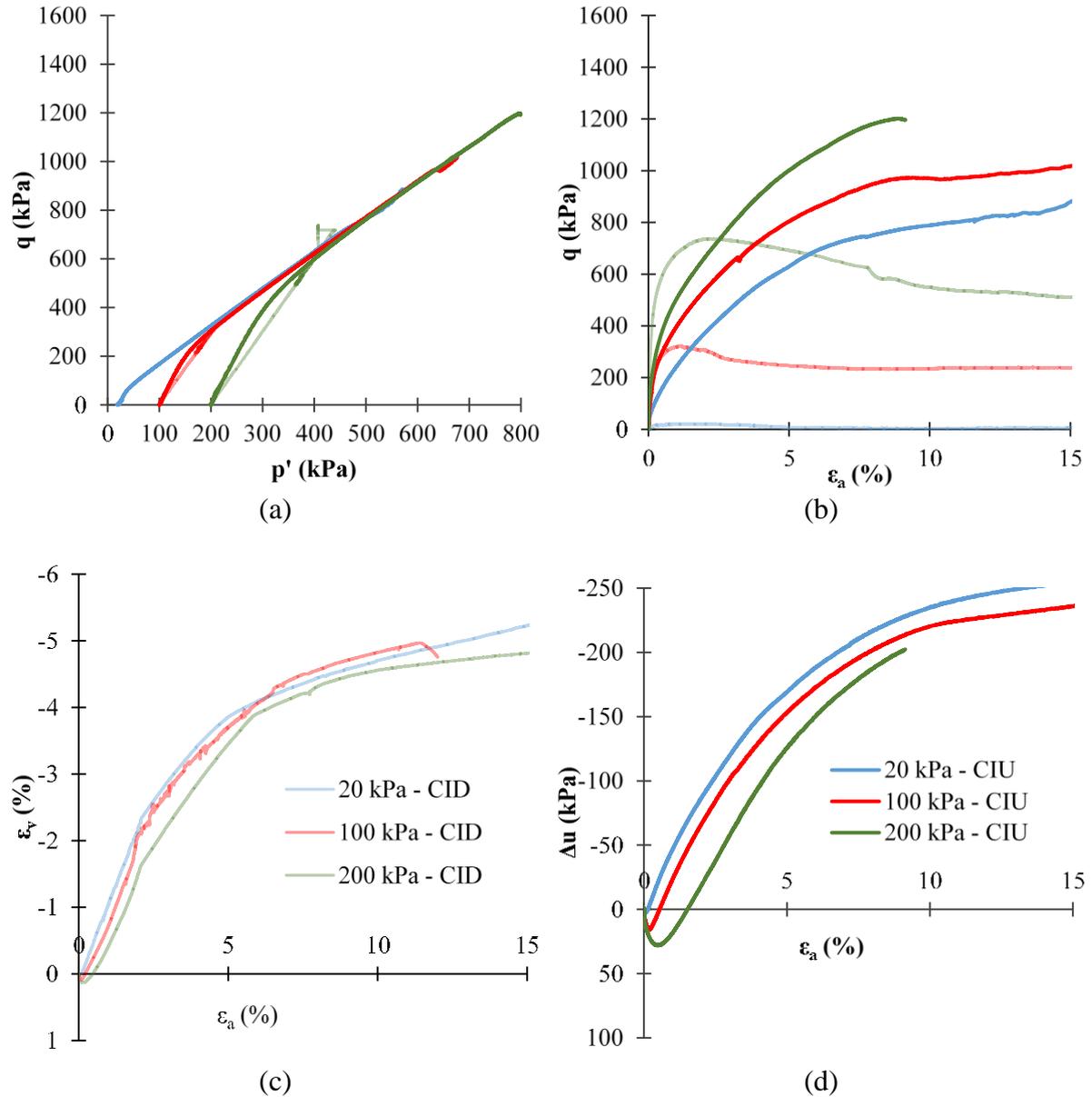


Figura 5.9: Comportamento de amostras de areia sob carregamento monotônico em condições drenadas e não drenadas ($e = 0,63$ – sem fibras)

A evolução das poropressões nos ensaios não drenados mostram uma pequena parcela de comportamento compressivo do material, seguido por um comportamento fortemente dilatante, o que condiz com os formatos das trajetórias de tensões obtidas nos três corpos de prova ensaiados.

A boa correspondência apresentada entre os ensaios drenados e não drenados é apresentada na

Figura 5.10. Nela é possível apreciar a envoltória descrita pela sobreposição dos resultados dos seis ensaios executados.

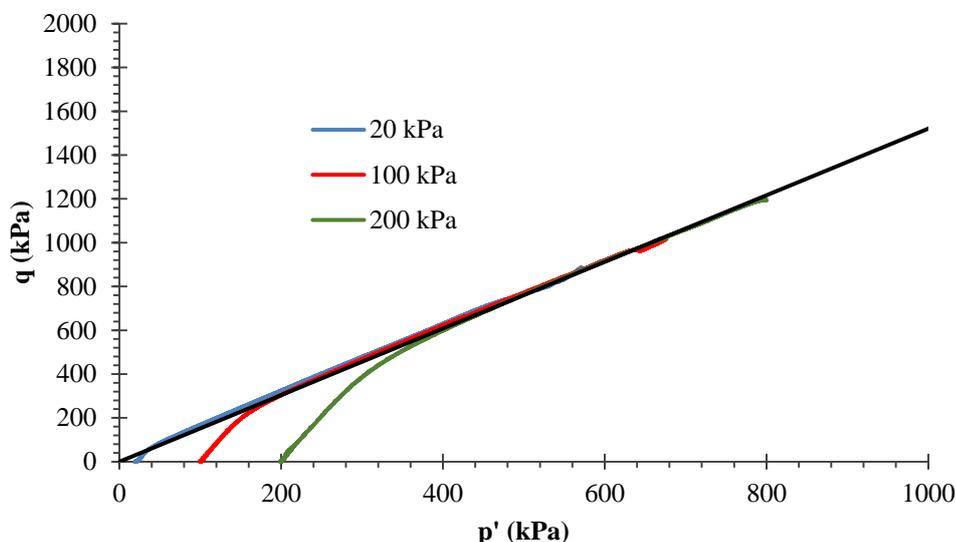


Figura 5.10: Comportamento de areia sob carregamento monotônico em condições não drenadas ($e = 0,63$ – sem fibras)

Inicialmente, as trajetórias de tensões representadas na Figura 5.10 correspondem ao material sem adição de fibras. Considerando que para o índice de vazios de 0,63 corresponde uma densidade relativa de 90%, o comportamento exibido pelas amostras se ajusta ao correspondente a um material compacto, exibindo (para o caso das amostras submetidas a carregamento drenado) picos de resistência bem definidos, com quedas posteriores na resistência.

A seguir são apresentados os resultados sob condição não drenada em amostras de areia com a adição de 0,5% de fibras (ver Figura 5.11). É apresentada também a envoltória de resistência obtida a partir dos ensaios drenados executados por Festugato (2011) nas mesmas condições de dosagem e índice de vazios.

Neste caso, a incorporação das fibras trouxe, além de importantes acréscimos na resistência a compressão monotônica, uma melhoria importante no comportamento pós-pico sob condição drenada, quando comparada à condição sem adição de fibras.

A comparação entre as trajetórias drenadas e não drenadas para este material oferece importantes diferenças entre os valores a serem adotados para a definição da trajetória de resistência (ver Figura 5.12), situação gerada pelas marcadas diferenças de comportamento das curvas tensão desvio vs. Deformação axial, sendo que para a condição com fibras não foi evidente nenhum pico de resistência.

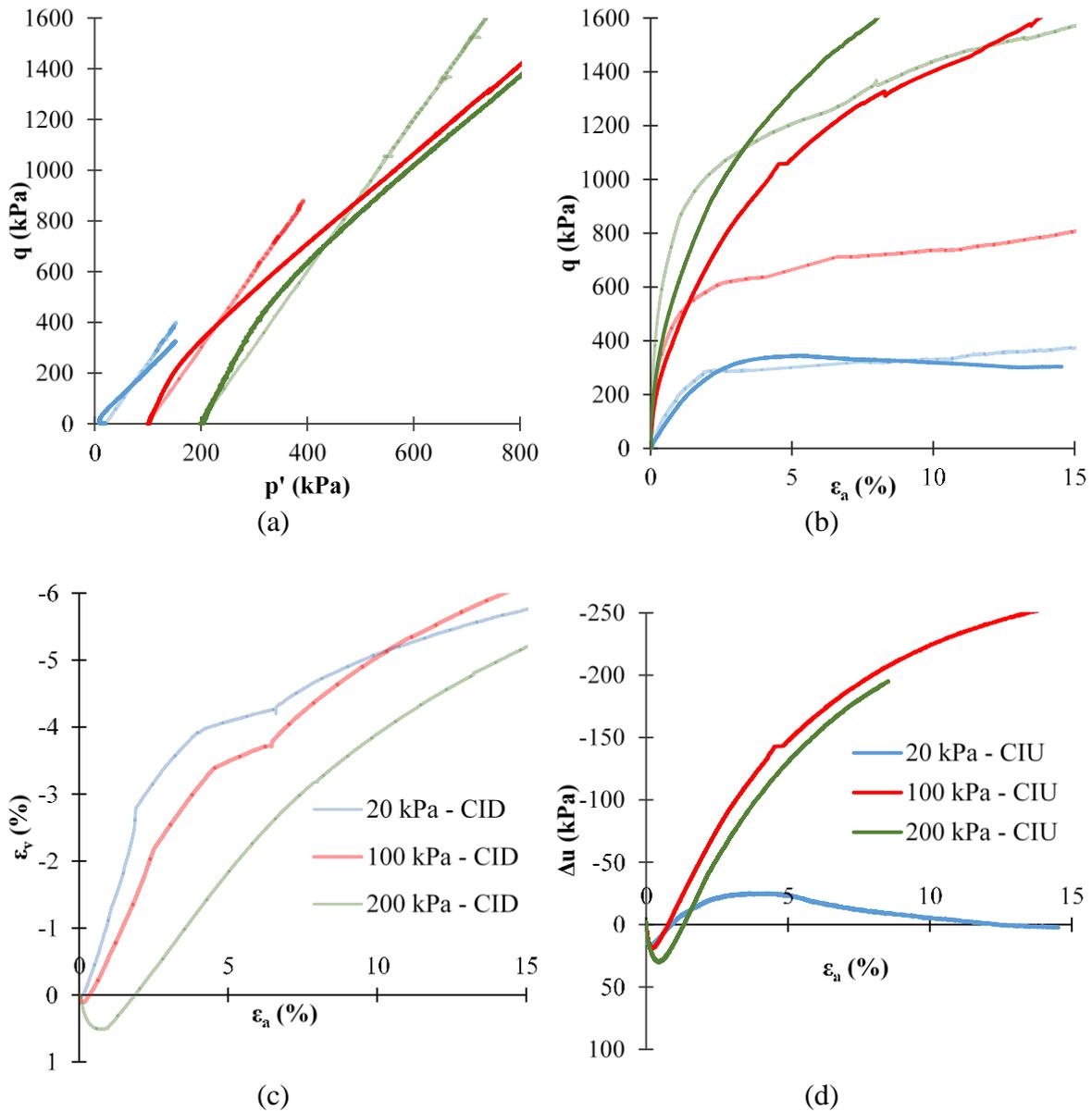


Figura 5.11: Comportamento de amostras de areia sob carregamento monotônico em condições drenadas e não drenadas ($e = 0,63 - 0,5\%$ fibras)

Na amostra ensaiada sob condição não drenada e pressão confinante efetiva de 20 kPa, ocorreu uma marcada diferença em seu comportamento tensão vs deformação, surgindo um pico de resistência e uma queda posterior na resistência, distinto às outras amostras avaliadas sob as mesmas condições de ensaio. A queda de resistência é compatível com o novo desenvolvimento de poropressões positivas após o pico de resistência.

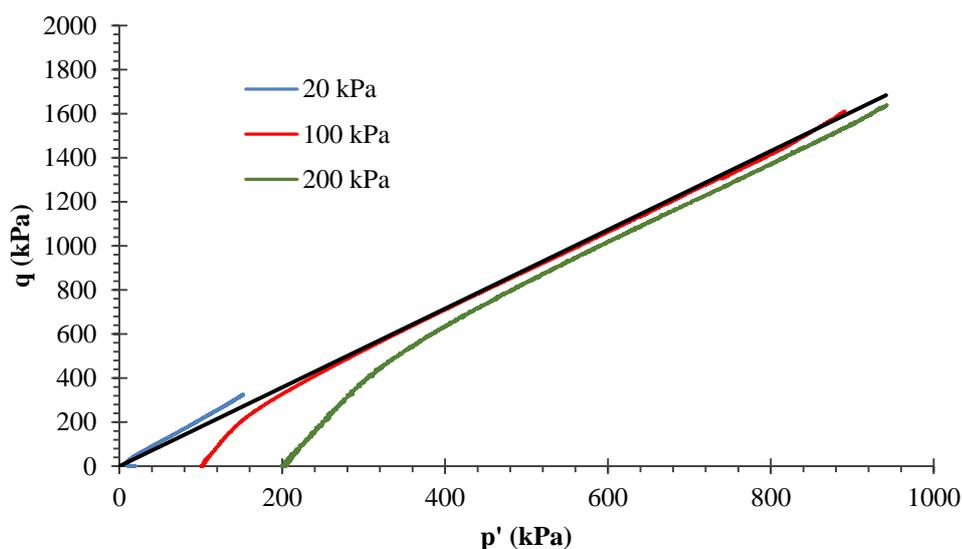


Figura 5.12: Comportamento de areia sob carregamento monotônico em condições não drenadas ($e = 0,63 - 0,5\%$ de fibras)

5.2.2. Parâmetros de resistência ao cisalhamento

A partir dos resultados dos ensaios apresentados no item 5.2.1 foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito interno ϕ' , e intercepto coesivo, c') para cada uma das condições avaliadas.

Nos casos em que, as amostras quando cisalhadas, não apresentassem um pico de resistência, foi adotada a tensão desvio correspondente a um valor de deformação axial de 10% como critério de ruptura. Os valores obtidos são apresentados no Quadro 5.2. As envoltórias de resistência no espaço p' vs. q são apresentadas na Figura 5.13.

Quadro 5.2. Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para as mostras avaliadas

| e | % Fibras | ϕ' (°) | |
|------|-------------|-------------|----------|
| | | CIU | CID |
| 0,75 | 0 | 36,22 | 37 (*) |
| | 0,5 | 37,2 | 48,3 (*) |
| 0,63 | 0 | 45,21 | 39,8 (*) |
| | 0,5 | 43,31 | 53,5 (*) |

(*) Valores foram determinados por Festugato (2008, 2011)

Para o caso particular da areia com incorporação de fibras e índice de vazios de 0,75, Festugato (2008) determinou a existência de dois trechos lineares, cuja origem pode estar explicada no deslizamento sofrido pelas fibras antes de certo valor de tensão efetiva. O valor do ângulo de

atrito para o segundo trecho no material mencionado é 33.9° .

Nos ensaios conduzidos sob condições não drenadas, não houveram acréscimos tão significativos nos valores do ângulo de atrito em decorrência da incorporação das fibras como nos valores reportados por Festugato (2011). Nestes ensaios, embora exista uma maior tendência dilatante pela adição das fibras, o efeito da incorporação das mesmas não resulta muito expressivo em razão da geração de poropressões, o que pode ser confirmado pelos menores valores resultantes para o ângulo de atrito em todos os casos, quando comparados aos resultados dos ensaios sob condição drenada.

Salienta-se a correspondência entre as tendência de comportamento apresentadas pelos materiais, ao considerar o fato de serem dois programas experimentais executados por duas pessoas em dois momentos. Aclara-se que, além dos materiais, o equipamento no qual foram ensaiadas as amostras foi o mesmo.

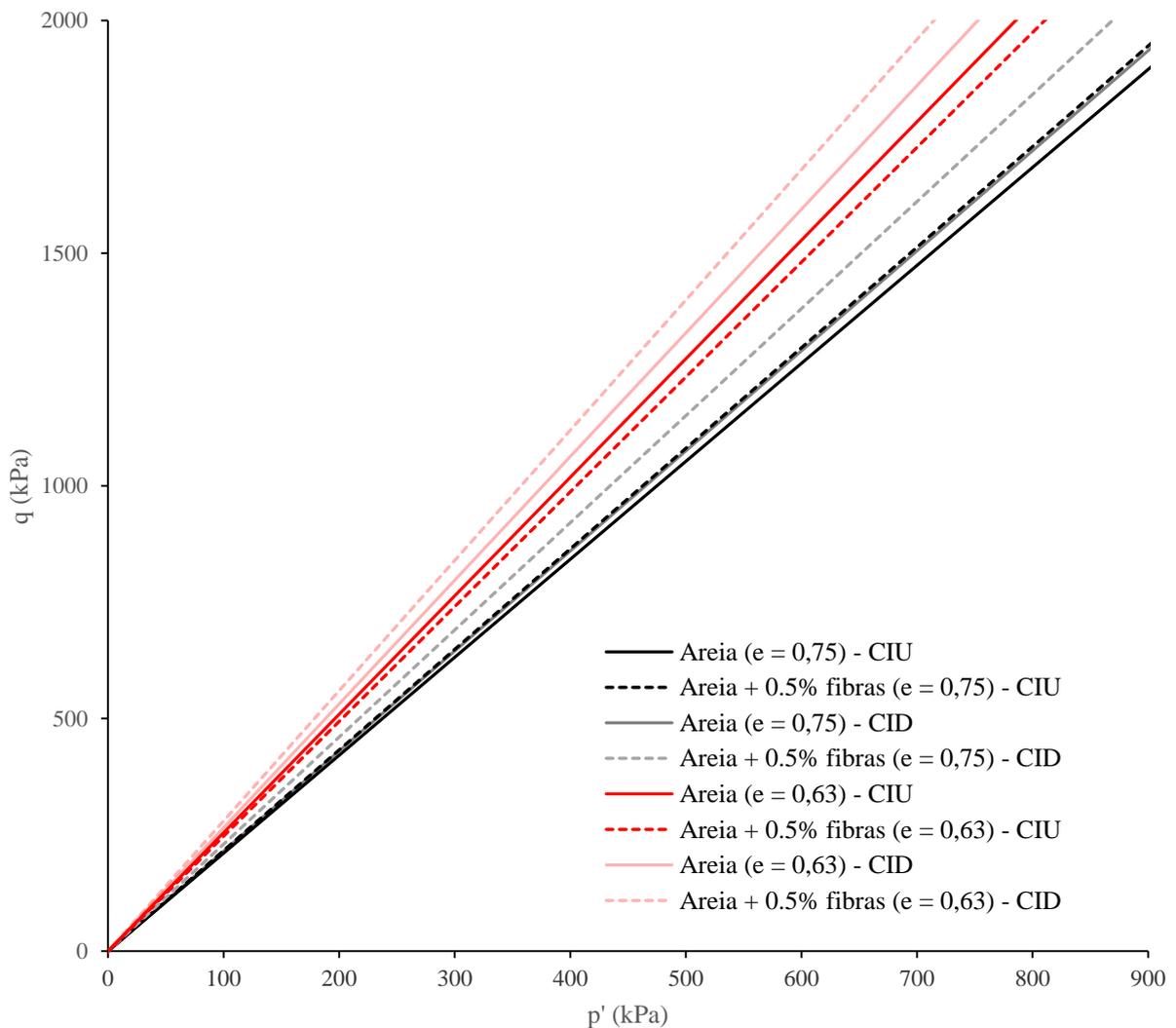


Figura 5.13: Envoltórias de resistência para as amostras avaliadas

5.2.3. Carregamento cíclico sob tensão controlada

No total foram executados vinte (20) ensaios, sendo a metade deles em corpos de prova de areia e metade restante para as mesmas condições de compactação porém com a adição de fibras, conforme descrito no Quadro 5.3.

O procedimento de ensaio seguiu o descrito na norma ASTM D5311 (2011) com exceção das amostras ensaiadas com uma tensão efetiva inicial de 200 kPa. Em todos os casos foi mantida uma frequência constante para a carga cíclica de 0,1 Hz.

Quadro 5.3. Resumo dos ensaios triaxiais cíclicos executados

| e | P' ₀ (kPa) | % Fibras | ± σ _{dc} (kPa) | N _f | Localização |
|------|--------------------------|----------|----------------------------|----------------|-------------|
| 0,75 | | 0 | 20 | 234 | Figura 5.43 |
| | | | 40 | 6 | Figura 5.47 |
| | | | 60 | 1 | Figura 5.51 |
| | | 0,5 | 20 | 365 | Figura 5.43 |
| | | | 40 | 14 | Figura 5.47 |
| | | | 60 | 3 | Figura 5.51 |
| 0,63 | 100 | 0 | 40 | 962 | Figura 5.15 |
| | | | 60 | 36 | Figura 5.19 |
| | | | 80 | 11 | Figura 5.23 |
| | | | 100 | 2 | Figura 5.27 |
| | | 0,5 | 40 | 1652 | Figura 5.15 |
| | | | 60 | 89 | Figura 5.19 |
| | | | 80 | 15 | Figura 5.23 |
| | | | 100 | 5 | Figura 5.27 |
| | 200 | 0 | 80 | 3246 | Figura 5.31 |
| | | | 120 | 84 | Figura 5.35 |
| | | | 160 | 6 | Figura 5.39 |
| | | 0,5 | 80 | > 25000 | Figura 5.31 |
| | | | 120 | 112 | Figura 5.35 |
| | | | 160 | 13 | Figura 5.39 |

No quadro anterior foram apresentados também os números de ciclos máximos alcançados pelas amostras até sua ruptura. O único corpo de prova que não atingiu esta condição foi a mistura areia +0,5% de fibras com índice de vazios 0,63, ensaiada com uma tensão efetiva inicial de 200 kPa, e uma tensão desvio cíclica de ± 80 kPa. Os resultados da totalidade dos ensaios encontram-se no Apêndice A.

A partir dos resultados experimentais, foi definida uma condição de ruptura para as amostras quando a tensão efetiva ao longo do ensaio atingia um valor inferior a 10 kPa. Nos corpos de prova ensaiados sob altas tensões desvio cíclicas, o instante de ruptura não fica muito bem definido pela curta duração do processo de cisalhamento ($N_f \approx 1$).

5.2.3.1. Evolução dos parâmetros associados com a poropressão e transformação do número de ciclos ou “ciclos normalizados” (N/N_f)

Nas curvas apresentadas a seguir são feitas as comparações entre areia e areia + fibras, para cada condição de compactação e de execução de ensaio. Visando permitir a comparação entre a resposta dos materiais, as curvas são plotadas tanto com seus respectivos números de ciclos até a ruptura, quanto com uma transformação destes em função do valor máximo obtido para cada ensaio, assim como com a normalização de alguns outros parâmetros.

Para cada condição do material, são apresentadas três figuras com curvas relacionadas, assim: A primeira figura de cada condição permite a visualização da evolução do ensaio, a partir da descrição da faixa de poropressões gerada ao longo do processo de cisalhamento cíclico.

Já na segunda figura é representada a poropressão residual, a qual corresponde ao valor da poropressão obtida quando a tensão desvio alcança o valor inicial do ensaio, zero no caso dos ensaios executados dentro do presente estudo.

Finalmente, a terceira figura ilustra o módulo da variação máxima da poropressão por ciclo.

A seguir, começando na Figura 5.15 até a Figura 5.53 são apresentadas a evolução das poropressões ao longo dos ensaios conduzidos em amostras com $e = 0,63$, com e sem adição de fibras.

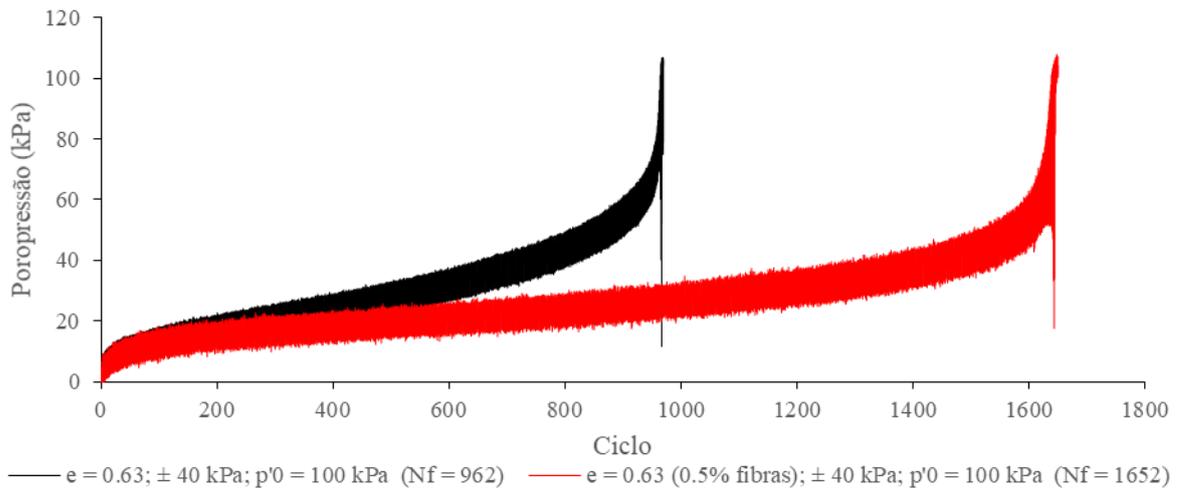


Figura 5.14: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

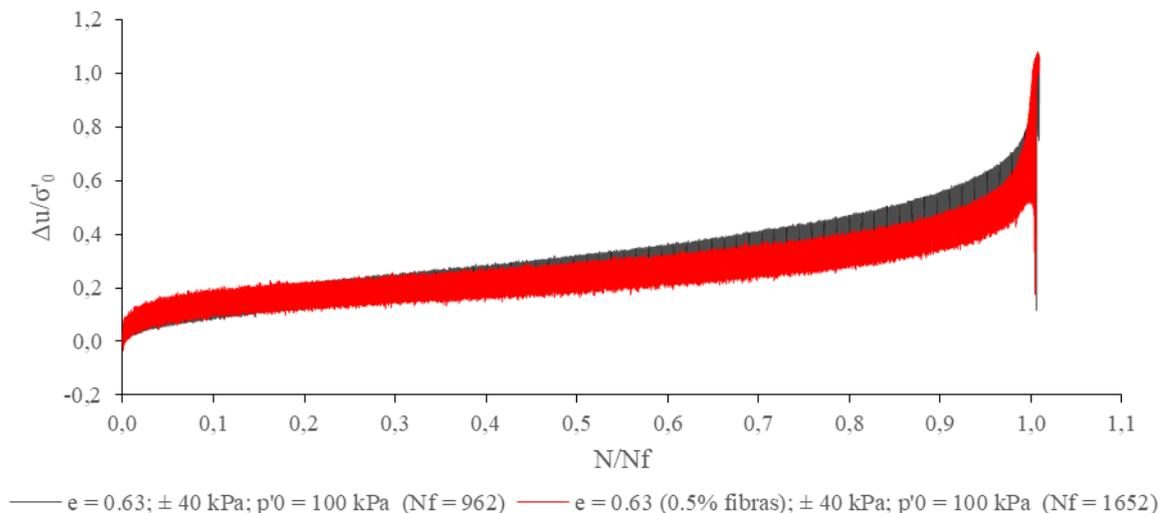


Figura 5.15: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Para o menor nível de carregamento ($0,4 p'_0$) a que foram submetidos os corpos de prova com $e = 0,63$, identifica-se um forte controle das fibras no que concerne ao desenvolvimento de poropressões nas amostras, condição visível aproximadamente a partir do 30% do N_f . Neste tipo de corpos de prova a faixa de variação das poropressões por ciclo encontra-se em torno de 10% da tensão desvio, incrementando relativamente pouco ao longo dos ensaios até o momento da ruptura. No entanto, a adição de fibras ajudou no controle da evolução das poropressões no corpo de prova, apresentando uma maior restrição com o avanço do cisalhamento, tendência

mantida até a ruptura.

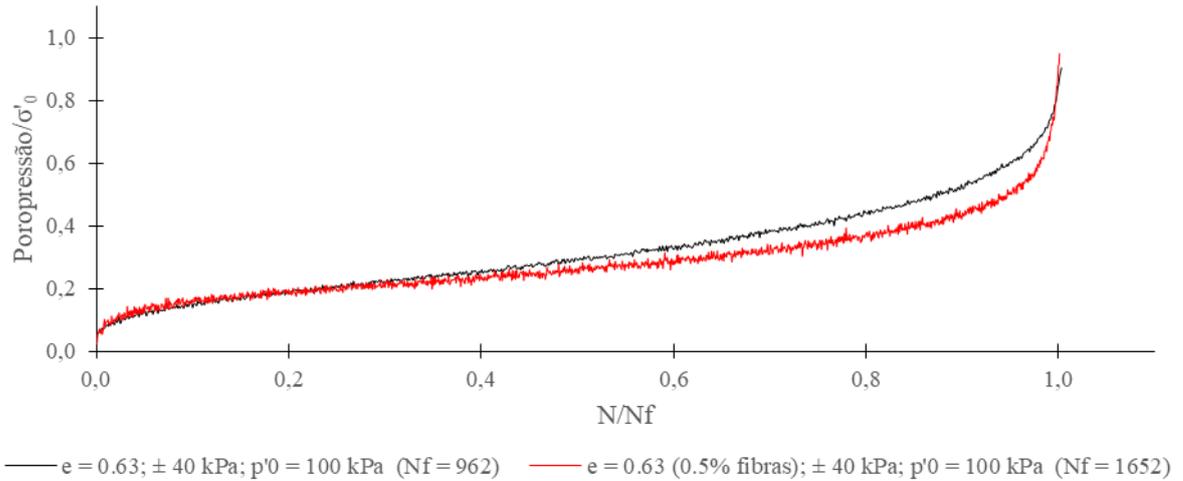


Figura 5.16: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 40 \text{ kPa}$; $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

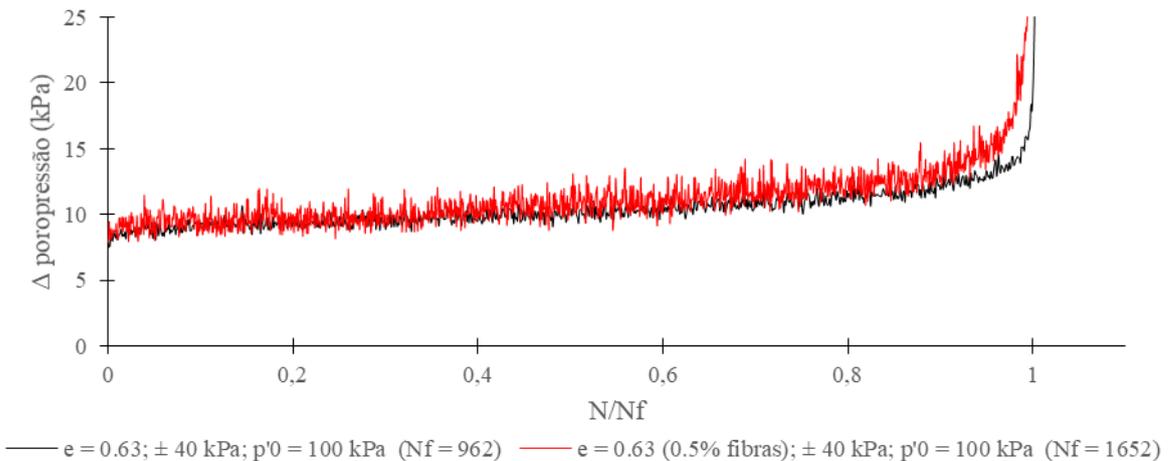


Figura 5.17: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 40 \text{ kPa}$; $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

O início da fase de degradação rápida das amostras até a condição de liquefação inicial, em ambos os casos, foi atingida restando aproximadamente 90 ciclos para o valor final (N_f) (convém lembrar que, com o incremento de pouco mais de 70% no valor de N_f para a condição com adição de fibras, o formato da curva pode criar a impressão de um processo de colapso súbito).

Nesta condição de carregamento, a identificação de mecanismo de mobilidade cíclica

(CASAGRANDE, 1976; CASTRO; POULOS, 1977) não é muito clara, visto que as pequenas variações das poropressões levam os corpos de prova a manter uma condição de tensão efetiva abaixo de 10%, e não ocorrem valores que levem às amostras a recuperar sua rigidez.

Para os ciclos iniciais ou pós-compactação, a incorporação das fibras não cria um efeito visível, situação que é discutida no item 5.2.3.2 em termos da evolução das deformações nas amostras ensaiadas.

Para os materiais apresentados na Figura 5.18 e na Figura 5.19, o nível de tensão desvio (0,6 p'_{0}) imposto às amostras permite que as fibras entrem em funcionamento, visto pelo controle na evolução das curvas de poropressão, não apenas no que respeita aos acréscimos entre ciclos, mas também pela amplitude máxima de variação da poropressão dentro de um mesmo ciclo de carga.

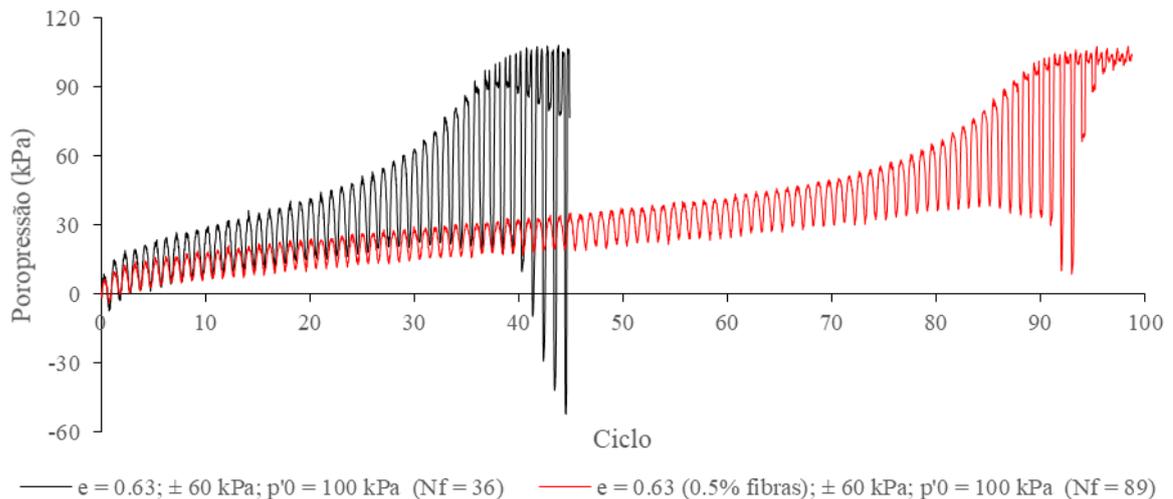


Figura 5.18: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 60 \text{ kPa}$; $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

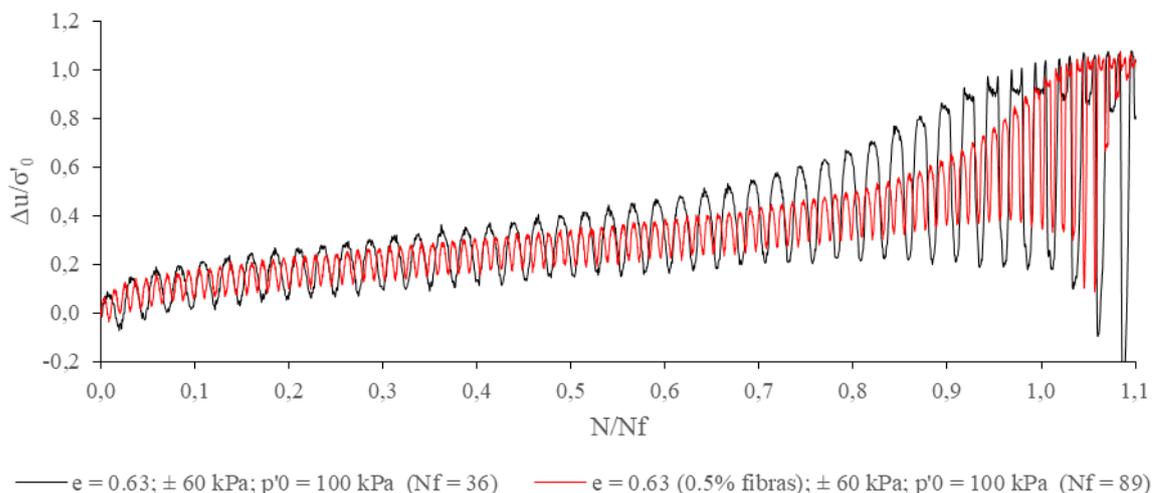


Figura 5.19: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Nestas amostras é identificável o processo de ruptura por mobilidade cíclica, podendo ser observado pela diferença existente entre as curvas de evolução do parâmetro r_u (ver Figura 5.19) e da poropressão residual (Figura 5.20).

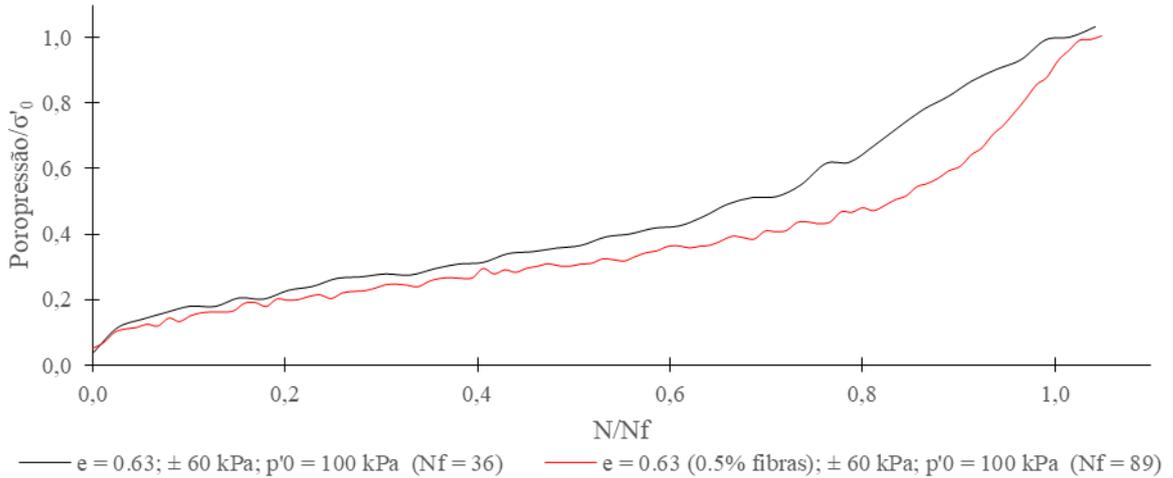


Figura 5.20: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Nestas amostras, ainda que a ruptura coincida com o valor de N/N_f igual a 1,0, a amplitude nas tensões desvio após a ruptura permitiu que o corpo de prova mantivesse seu formato cilíndrico sem alterações significativas (CASTRO, 1969) durante alguns ciclos. Finalmente, as distorções geradas nos corpos de prova levaram o corpo de prova a não conseguir recuperar algo de rigidez durante as reversões de tensões.

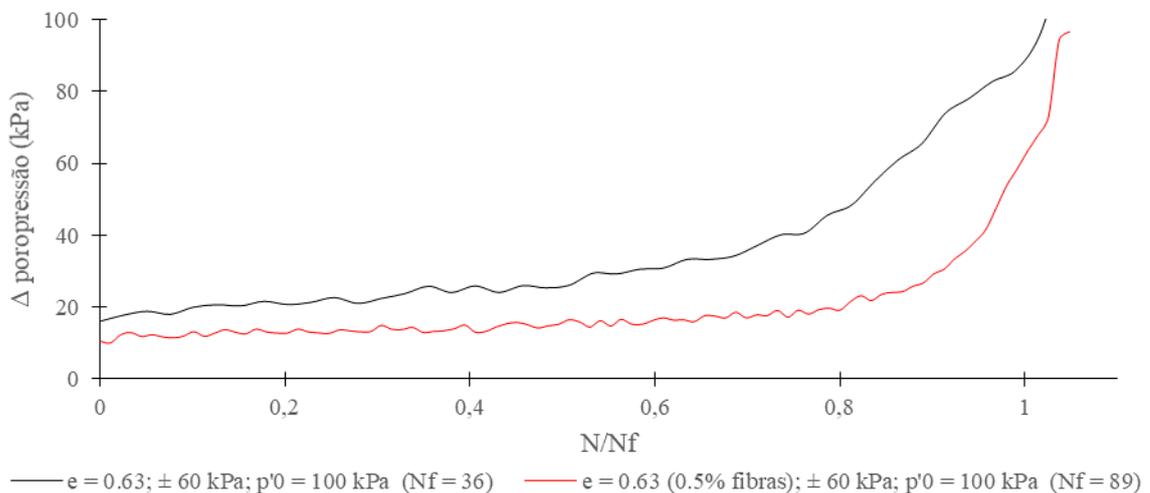


Figura 5.21: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Na Figura 5.21 é identificável o controle gerado pela adição de fibras desde o início do ensaio, além da diminuição na taxa de degradação da amostra ao considerar a menor declividade da curva de variação máxima da poropressão.

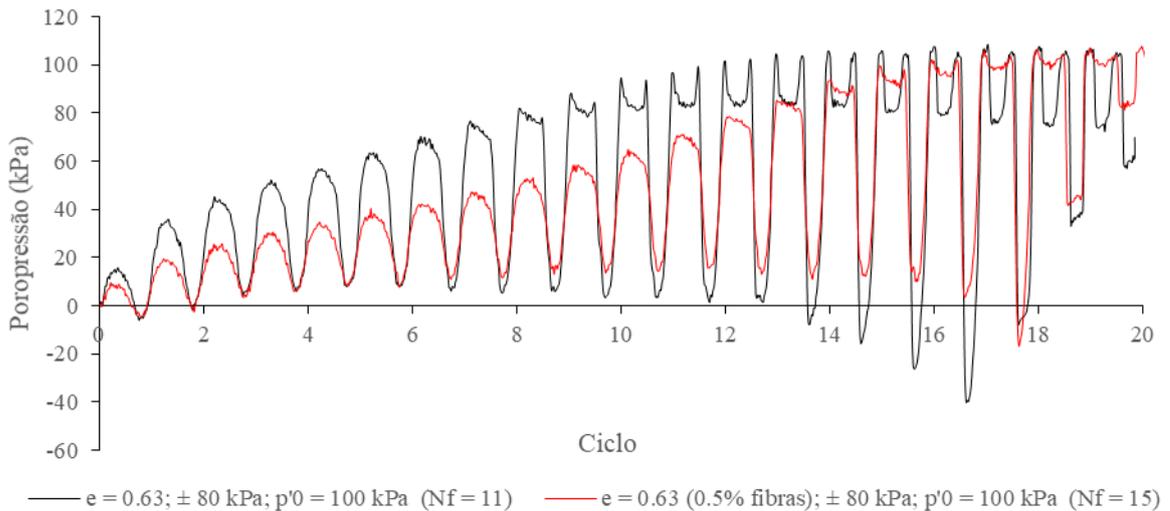


Figura 5.22: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

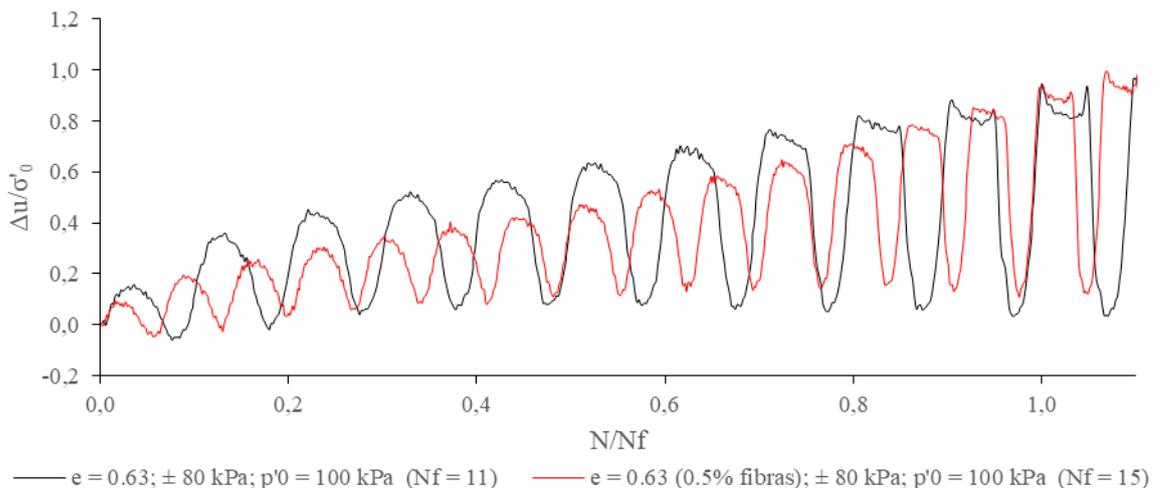


Figura 5.23: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

A tendência apresentada pelas amostras apresentadas acima é mantida neste caso (ver Figuras

5.22 e 5.23), porém não é claro o momento do início do colapso incremental.

No entanto o anterior fato, o aporte da adição das fibras controla a geração de poropressões de uma forma importante, não apenas pelo valor das poropressões residuais (ver Figura 5.24) mas também pela faixa de variação deste valor (ver Figura 5.25).

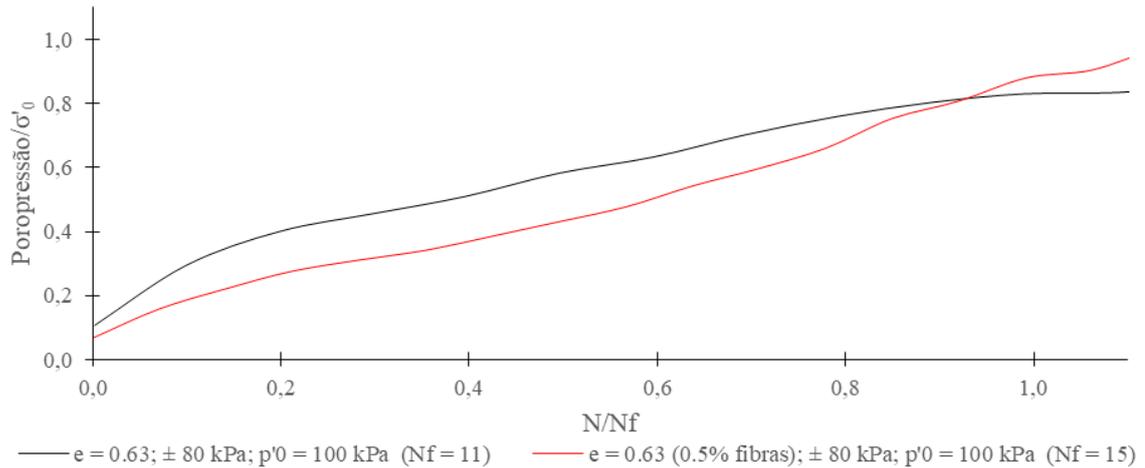


Figura 5.24: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80 \text{ kPa}$; $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

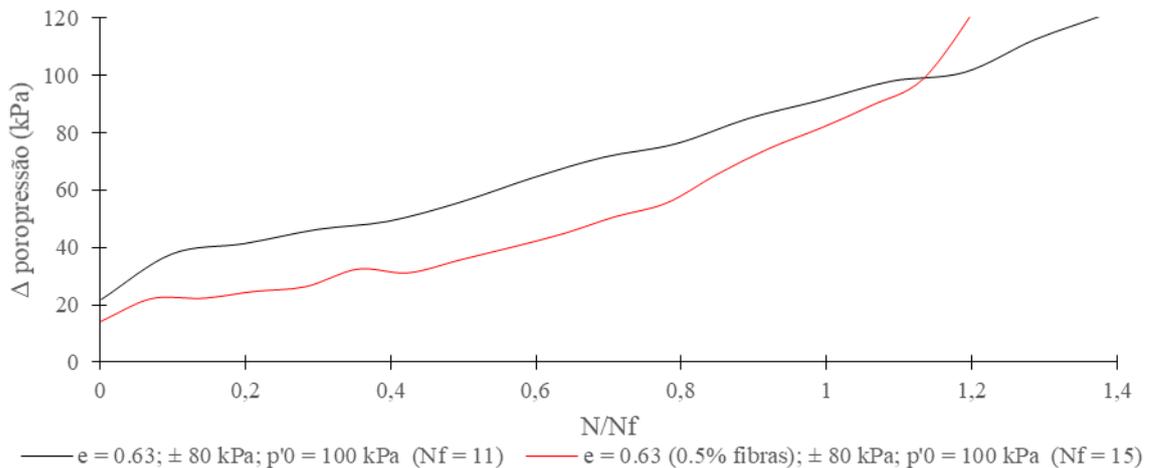


Figura 5.25: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80 \text{ kPa}$; $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

A resposta das amostras submetidas aos máximos níveis de carregamento ($\pm 100 \text{ kPa} \equiv 1,0 p'_0$) sugere, para o caso da areia sem presença de fibras, uma condição de colapso incremental imediato, situação confirmada no limitado valor de N_f (2) (ver Figuras 5.26 e 5.27).

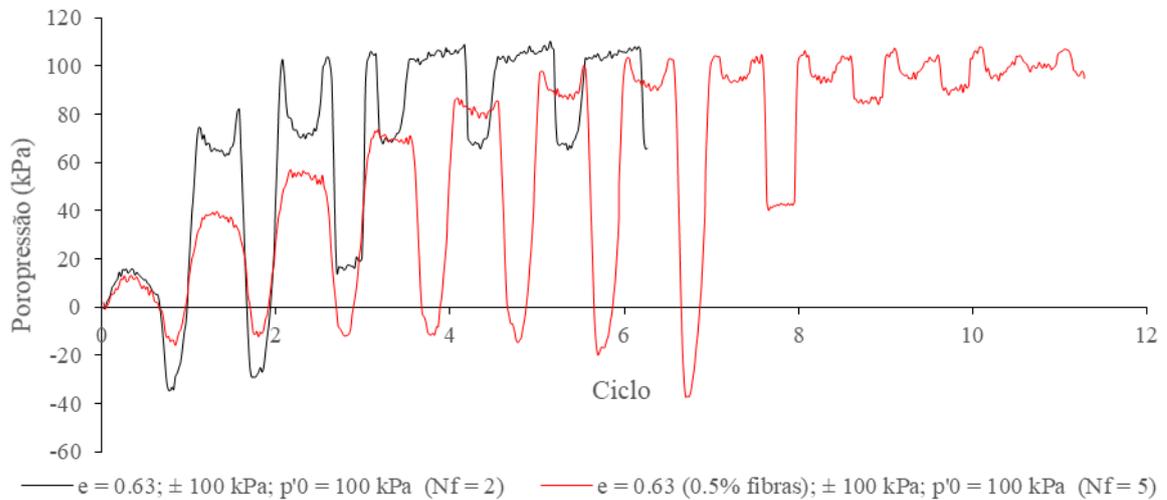


Figura 5.26: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 100 \text{ kPa}$; $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

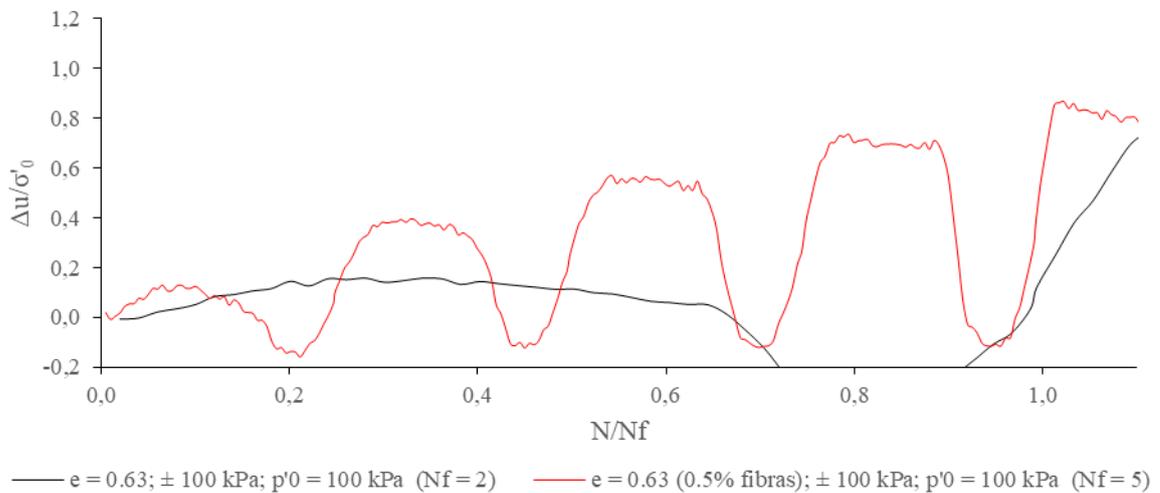


Figura 5.27: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 100 \text{ kPa}$; $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Para estas amostras surge um comportamento distinto se comparado com as anteriores: a ocorrência de maiores poropressões residuais do material com adição de fibras se comparado à condição sem elas (ver Figura 5.28).

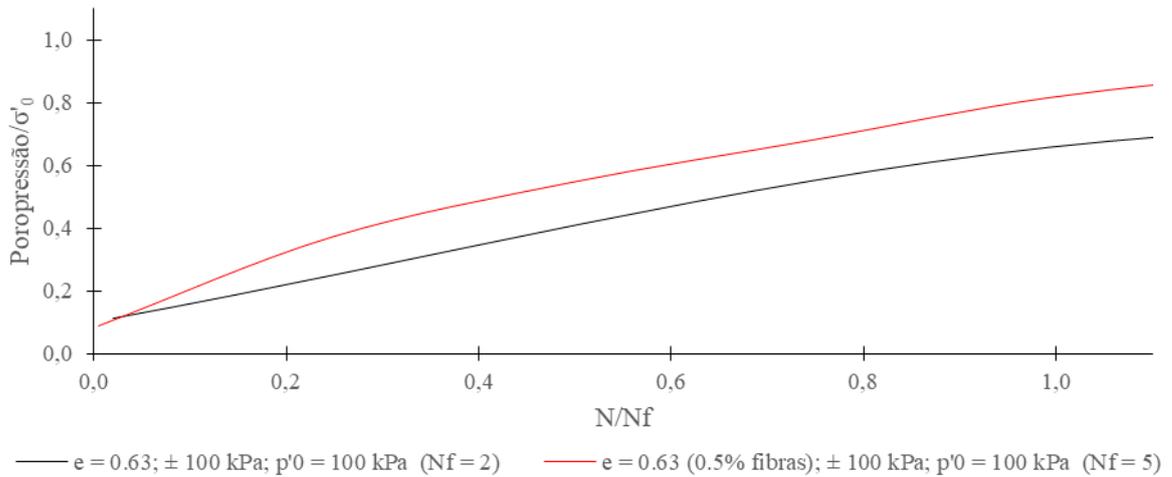


Figura 5.28: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 100$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Sobre o comportamento surgido na figura acima, é necessário considerar o número reduzido de ciclos de carga em ambos os casos, mas principalmente para condição sem fibras ($N_f = 2$). Embora os acréscimos na poropressão para o material criem um resultado menos sensível, tem que se considerar a curva apresentada na Figura 5.27, que concorda com uma distorção rápida do corpo de prova, como foi identificado durante sua execução.

Salienta-se que ainda com a situação acontecida com as poropressões residuais, a tendência de maior controle da faixa de variação de poropressões é mantida igual que nas outras amostras (Figura 5.29).

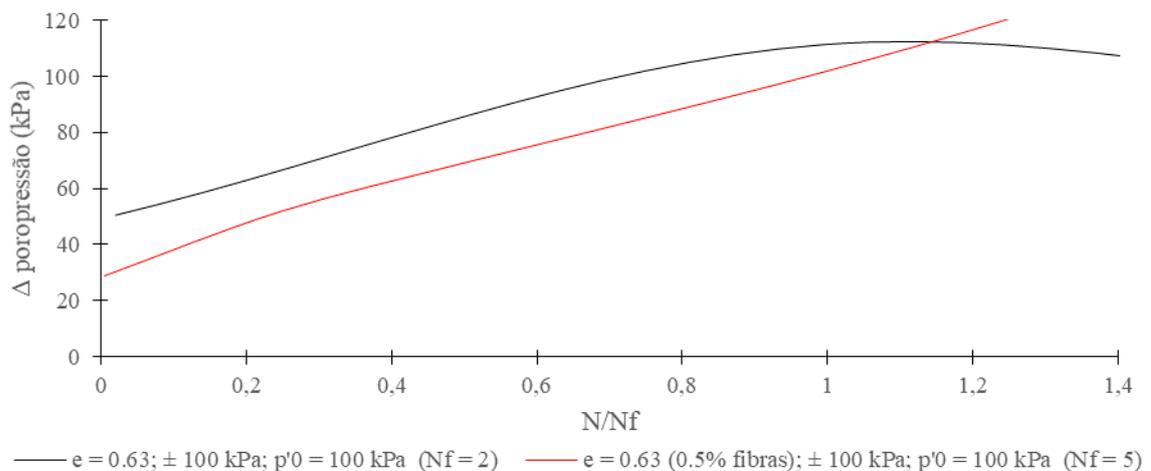


Figura 5.29: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 100$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

A seguir são apresentados os resultados de ensaios em corpos de prova com as mesmas condições dos anteriores ($e=0,63$; sem fibras e com 0,5% de fibras), fixando uma tensão efetiva inicial para o cisalhamento de 200 kPa. Nesse sentido, a escolha das tensões desvio cíclicas foi feita de maneira a garantir que os valores da tensão cíclica, em termos de p'_0 , fossem iguais aos utilizados para as anteriores amostras (0,4; 0,6 e 0,8 p'_0).

Com exceção dos corpos de prova submetidos a valores de tensão desvio cíclica de ± 160 kPa (0,8 p'_0), as amostras tiveram um melhor desempenho em termos do valor N_f quando comparadas à condição com $p'_0 = 100$ kPa.

O primeiro conjunto de resultados corresponde à condição com tensão desvio cíclica ± 80 kPa, o que equivale com 0,4 p'_0 (ver Figura 5.30).

Em razão ao elevado número de dados produzidos por cada ensaio, ainda que a aquisição tivesse sido feita para a totalidade dos ensaios na quantidade exigida pela norma ASTM D5311 (2011) (50 aquisições por ciclo), foram considerados os seguintes intervalos para elaboração das curvas aqui apresentadas:

- a) ciclo 1 – 100: a cada 1 ciclo;
- b) ciclo 100 – 300: a cada 10 ciclos;
- c) ciclo 300 – 500: a cada 20 ciclos;
- d) ciclo 500 – 1000: a cada 50 ciclos;
- e) ciclo 1000 – 5000: a cada 100 ciclos;
- f) ciclo 5000 - ...: a cada 200 ciclos;

Em razão do número de ciclos resistidos pelo corpo de prova sem fibras (3246), após atingir os 500 ciclos, a aquisição para análise foi mantida a cada 50 ciclos. Também, para uma adequada caracterização do instante da ruptura do corpo de prova, foram usadas as aquisições dos últimos 20 ciclos.

Sob esta condição de ensaio, o corpo de prova com adição de fibras não atingiu um estado de ruptura, tendo que finalizar o ensaio após 22740 ciclos. Nesse sentido, o valor para o cálculo do número de ciclos normalizado foi adotado igual a 25000, o qual não reflete necessariamente o valor de N_f .

Este corpo de prova manteve uma tendência de incremento nas poropressões até um certo valor a partir do qual, os valores começaram a cair, afastando-o da tendência exibida pelo material sem adição de fibras.

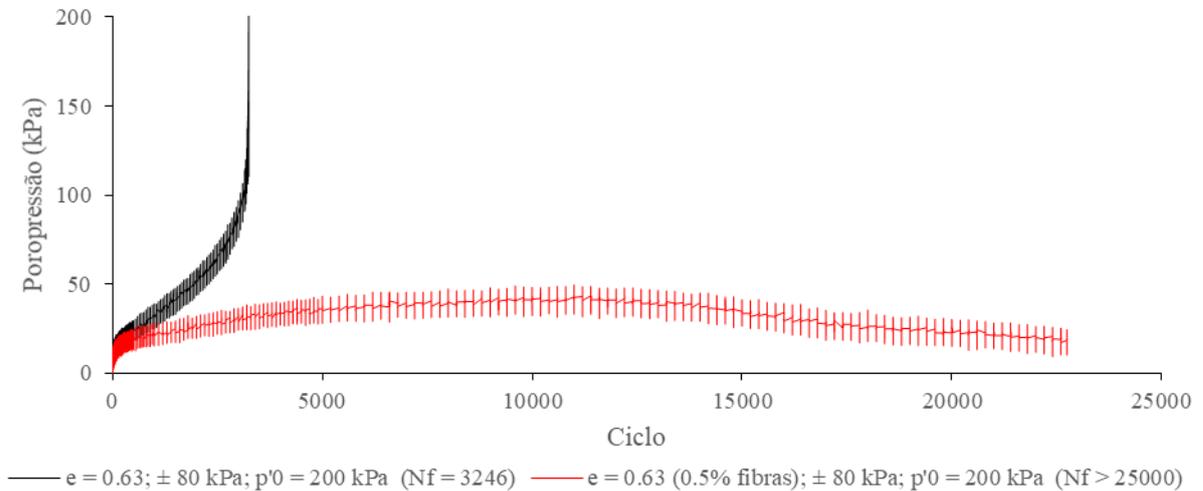


Figura 5.30: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80 \text{ kPa}$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

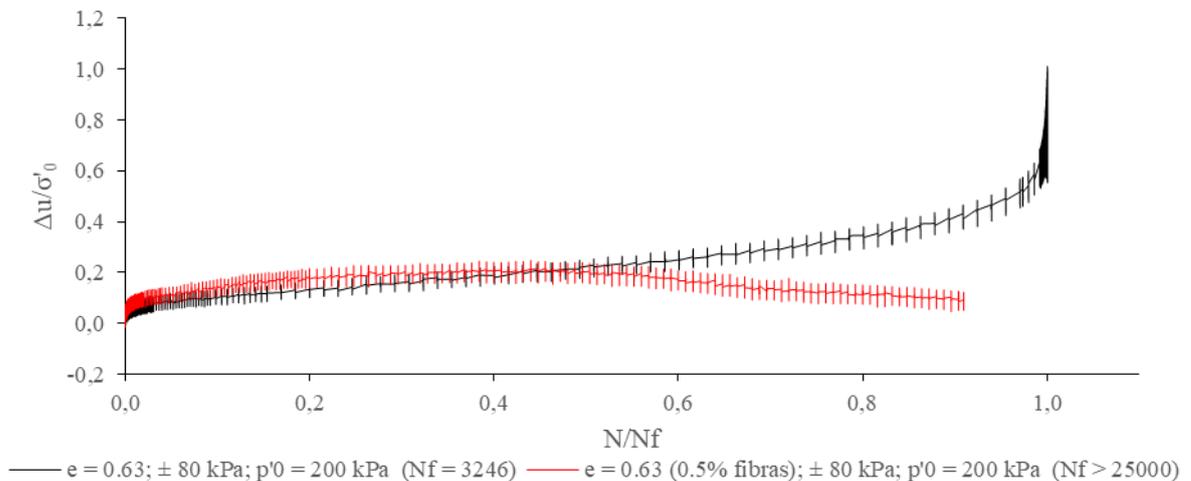


Figura 5.31: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80 \text{ kPa}$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Além disso, chama a atenção como a tendência de criar maiores acúmulos de poropressão no material com fibras ao longo dos primeiros ciclos, ou pelo menos de não existir um efeito positivo das fibras nestes primeiros ciclos, é visível também sob esta condição de carga (ver Figura 5.32).

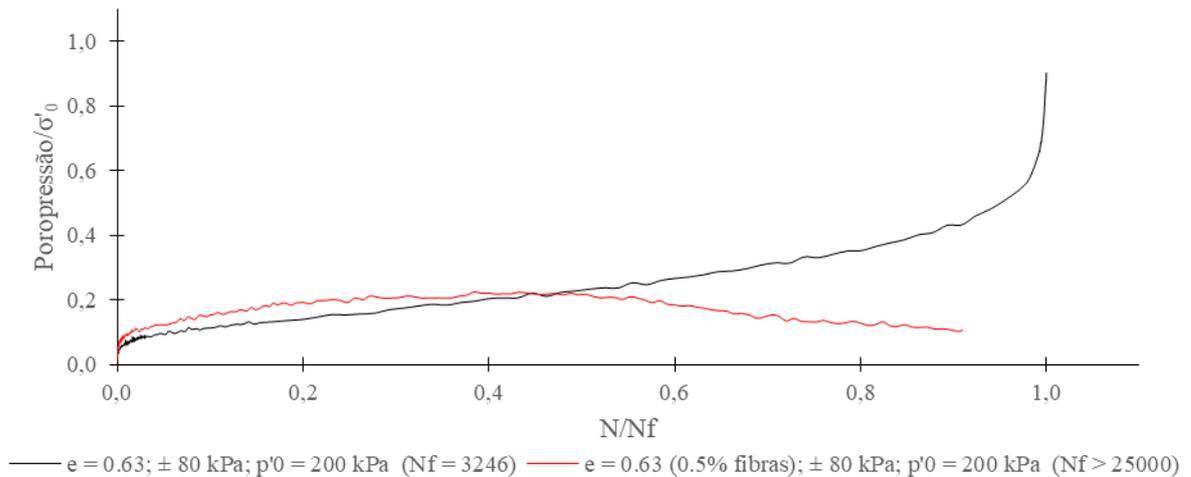


Figura 5.32: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

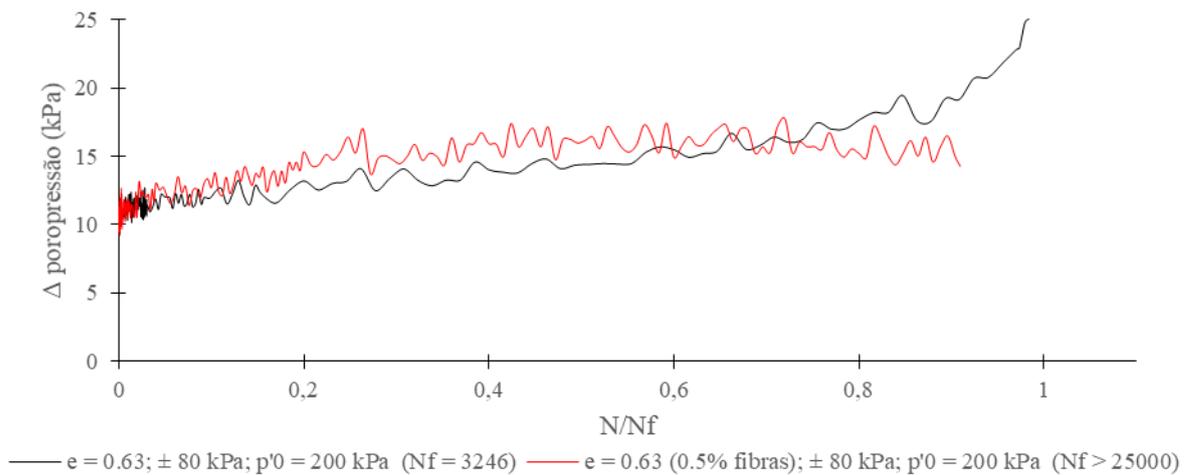


Figura 5.33: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 80$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

A situação descrita pode ser apreciada na Figura 5.33, mas pela condição particular de não ruptura do corpo de prova, sendo só após um certo nível de deformação sofrido ao longo do ensaio pelo material com fibra, nota-se uma mudança em seu comportamento, mantendo a mesma variação nas poropressões próximas de um valor relativamente constante.

A seguir são apresentados os resultados para amostras de areia com e sem fibras, submetidas a tensões desvio cíclicas de ± 120 kPa ($0,6 p'_0$) (ver Figura 5.34).

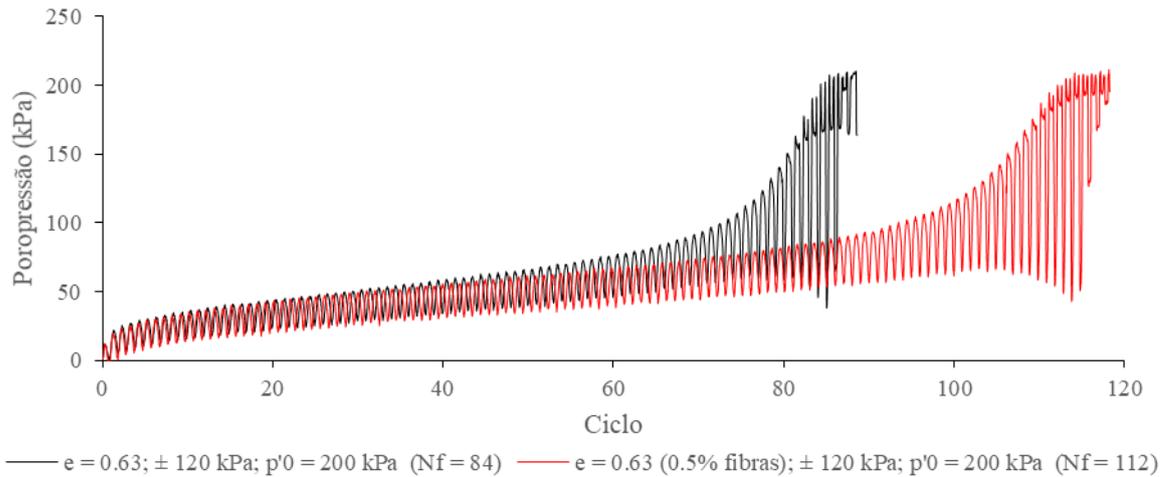


Figura 5.34: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 120$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

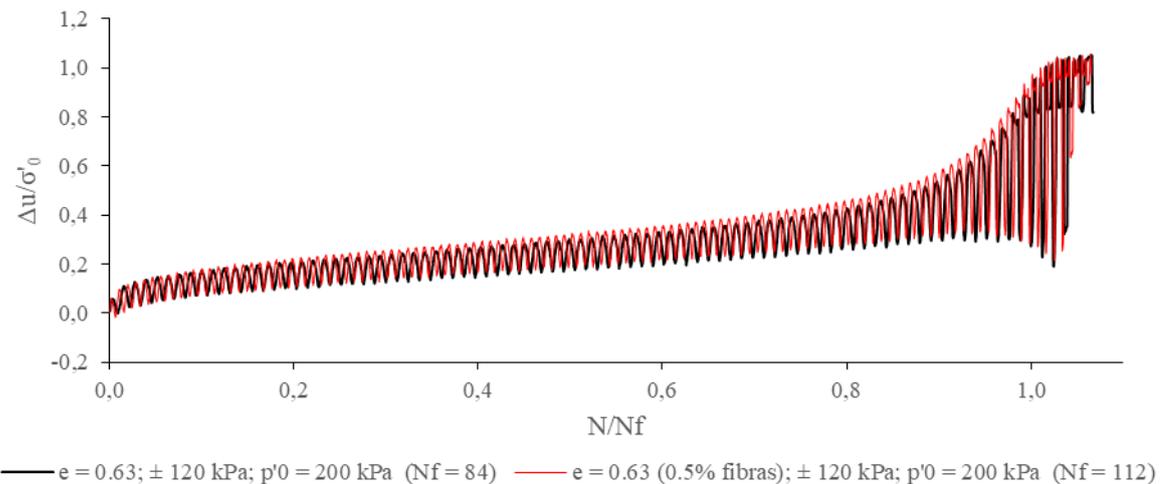


Figura 5.35: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 120$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Sob esta condição, ainda que o valor de N_f obtido com a adição de fibras fosse maior, a proporção do incremento conseguido quando comparado à condição sem fibras foi bem menor do que no caso anterior, tendo uma proporção maior de 7 no caso de materiais submetidos a $0,4 p'_0$, mas estando próxima de 1 para a condição discutida ($0,6 p'_0$).

A tendência de evolução da poropressão coloca acima ao material com adição de fibras, no que concerne aos valores de poropressão máximos associados com a aplicação da tensão desvio de compressão. A existência desta situação também criou maiores tendências de acúmulo, tanto

em termos das poropressões residuais (Figura 5.36) quanto na amplitude deste valor (Figura 5.37).

É importante apontar a semelhança de comportamentos nos materiais com e sem a presença de fibras, a qual sugere uma perda do aporte deste último material com o incremento na tensão efetiva inicial. É claro que a tensão desvio aplicada não é igual à aplicada nos materiais representados na Figura 5.19, mas o critério para definição deste valor em termos relativos ($0,6p'_0$) permitiu obter comportamentos bastante similares em termos do comportamento se comparados os formatos de ambas as curvas.

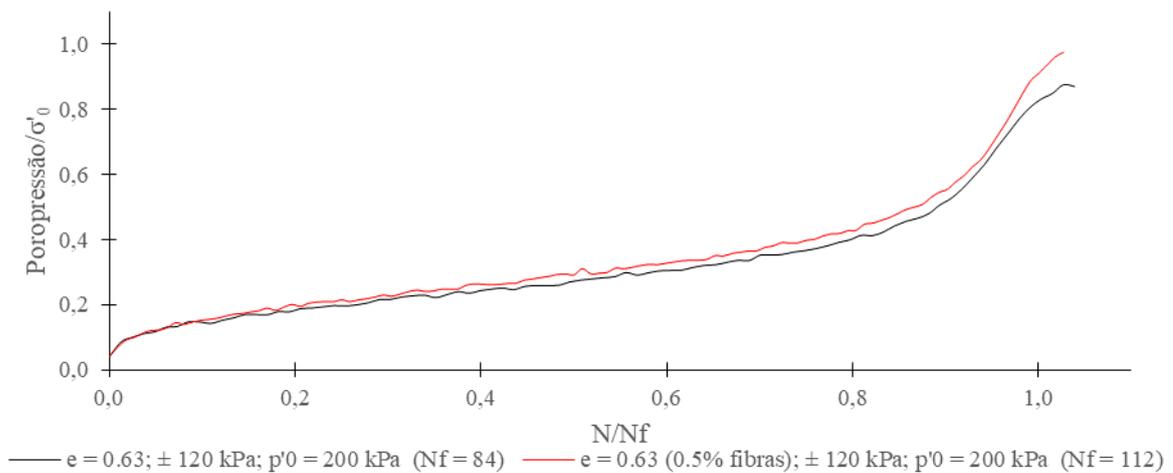


Figura 5.36: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 120 \text{ kPa}$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

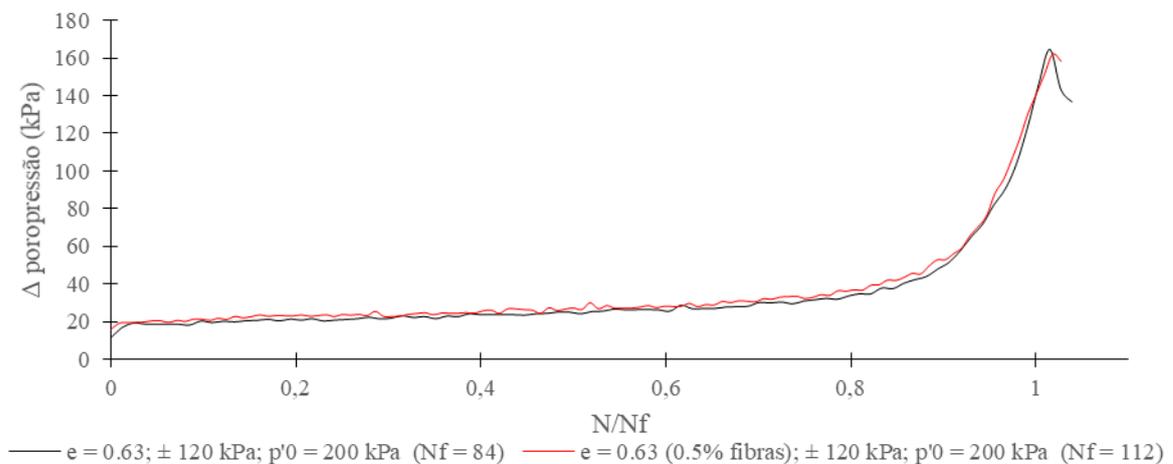


Figura 5.37: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 120 \text{ kPa}$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Na resposta dos materiais submetidos a tensões desvio de ± 160 kPa ($0,8 p'_0$), ainda que existindo um incremento no valor de N_f com a adição de fibras, ocorre uma diminuição se comparado com a mesma condição em amostras sob tensão confinante de 100 kPa (ver Figura 5.23).

A tendência de maiores acúmulos de poropressão nas amostras com adição de fibras é mantida neste caso (ver Figuras 5.38 e 5.39) mas com uma tendência um pouco menos evidente, já que o comportamento do material no que concerne a sua capacidade de geração de excesso de poropressão parecesse como se não tivesse sofrido maior alteração (se consideradas escalas normalizadas na avaliação do comportamento) (ver Figuras 5.40 e 5.41).

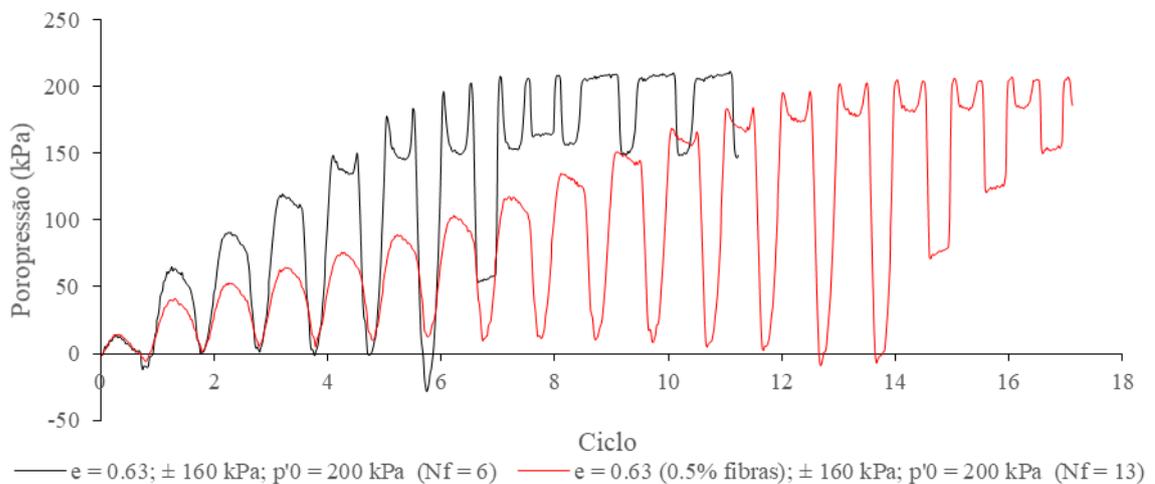


Figura 5.38: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 160$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

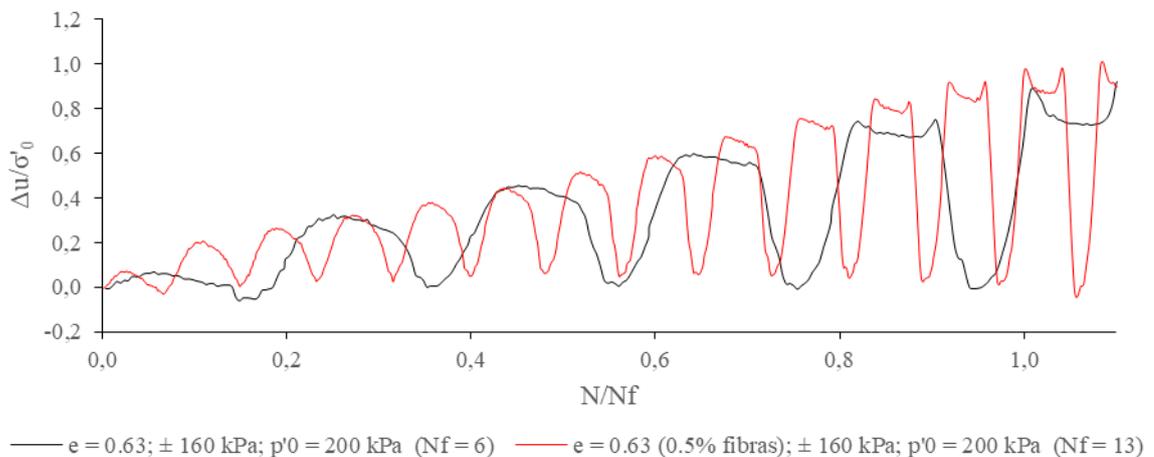


Figura 5.39: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 160$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

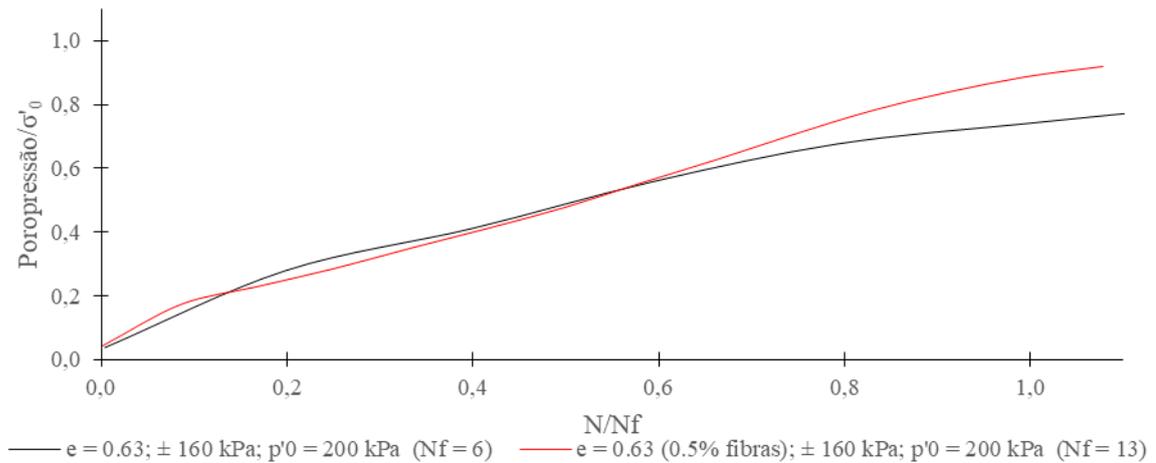


Figura 5.40: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 160 \text{ kPa}$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

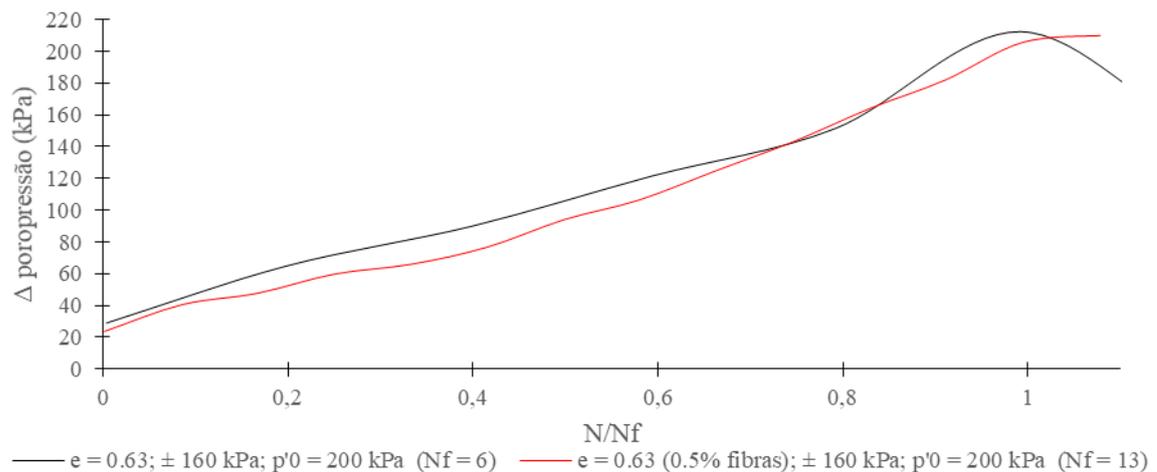


Figura 5.41: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,63$; $\sigma_{dc} = \pm 160 \text{ kPa}$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$ (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

A seguir são apresentados os resultados nos ensaios executados em corpos de prova com $e=0,75$. Ainda que o foco do presente estudo não sejam materiais pouco compactos, considerou-se importante sua avaliação no que concerne ao efeito das fibras, como uma maneira de fornecer informação que permita caracterizar as rupturas associadas a este tipo de materiais.

Os resultados para as amostras submetidas a tensão desvio cíclica de $\pm 20 \text{ kPa}$ ($0,2 p'_0$) começam pela Figura 5.42.

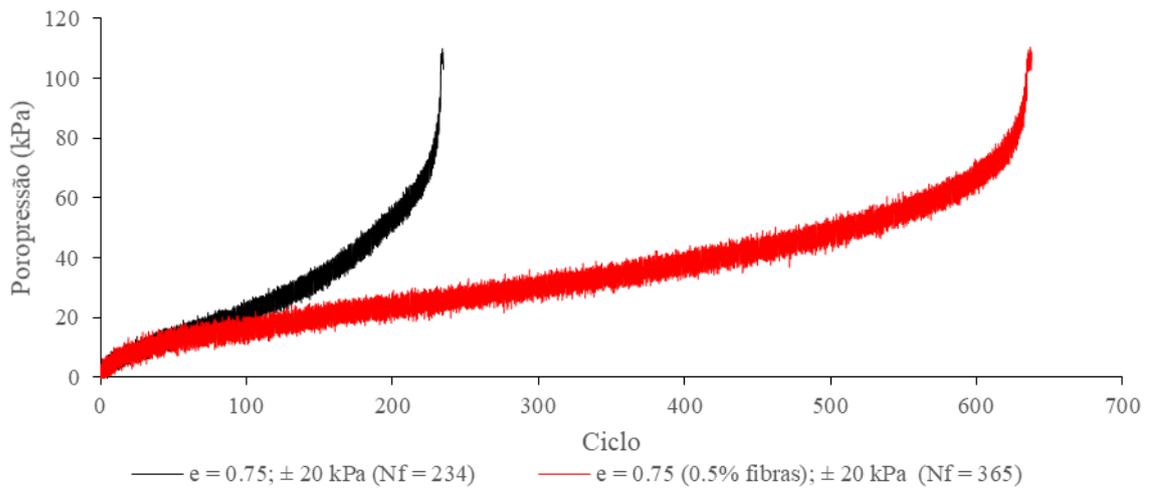


Figura 5.42: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 20$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

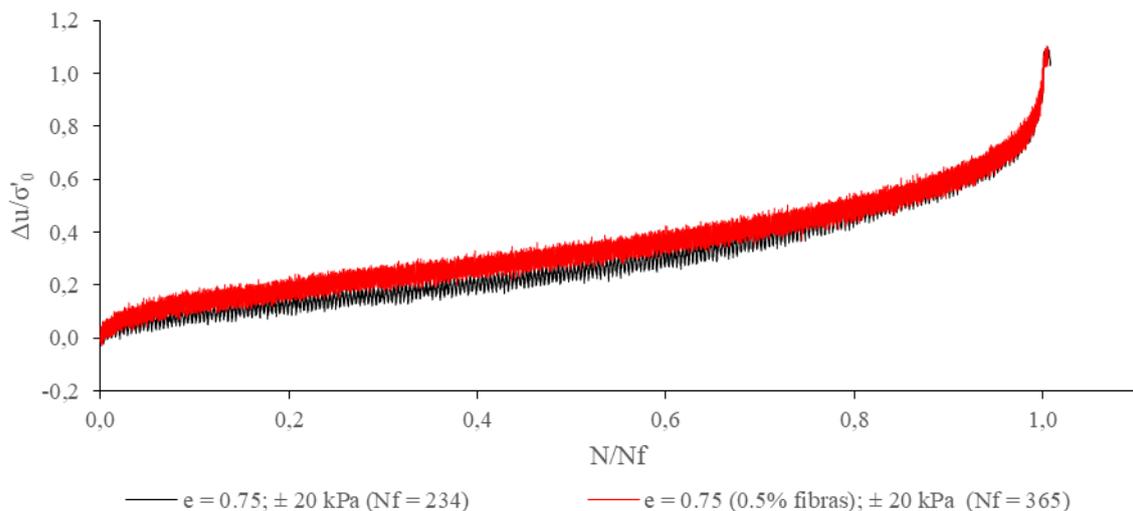


Figura 5.43: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 20$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Nesta condição, os materiais exibem uma diminuição aparente na sua rigidez inicial pela adição das fibras, situação que chega a apresentar inversão na medida em que avançam os ensaios (Figura 5.44).

Esta condição de diminuição na rigidez foi discutida por Casagrande (2001) em amostras carregadas em condição monotônica. No presente estudo, ao serem ensaiadas em condição monotônica não drenada, as amostras com este índice de vazios possuem uma forte tendência de geração de poropressões positivas, sendo maior nos corpos de prova com adição de fibras.

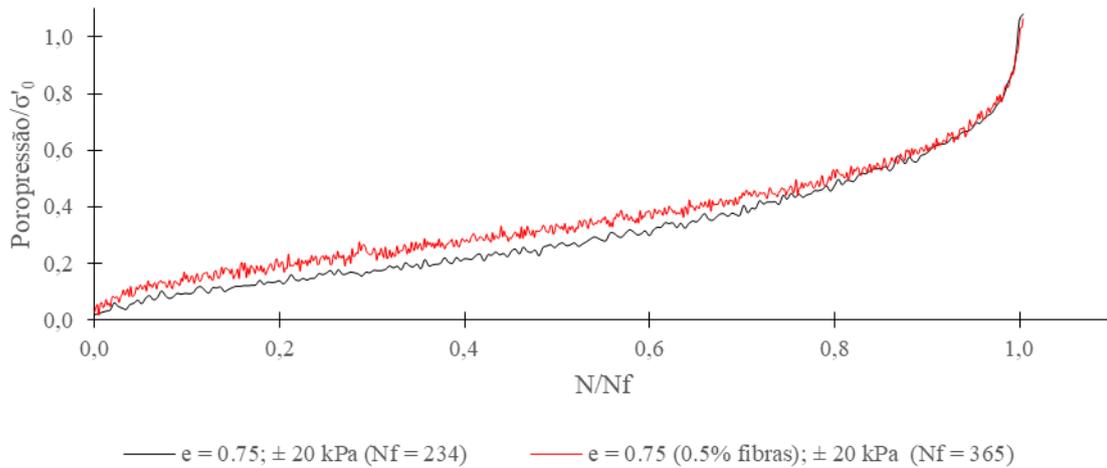


Figura 5.44: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 20$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Chama-se a atenção sobre o fato que, na amostra com adição de fibras existam maiores variações nas poropressões geradas durante o cisalhamento (ver Figura 5.45), o que condiz com o descrito acima. Embora não seja a intenção realizar uma comparação direta, salienta-se o fato que a variação máxima na poropressão para este tipo de amostras, corresponde aproximadamente com a gerada para corpos de prova com $e=0,63$ quando submetidos a tensão desvio cíclica de $0,4 p'_0$ (Figura 5.17).

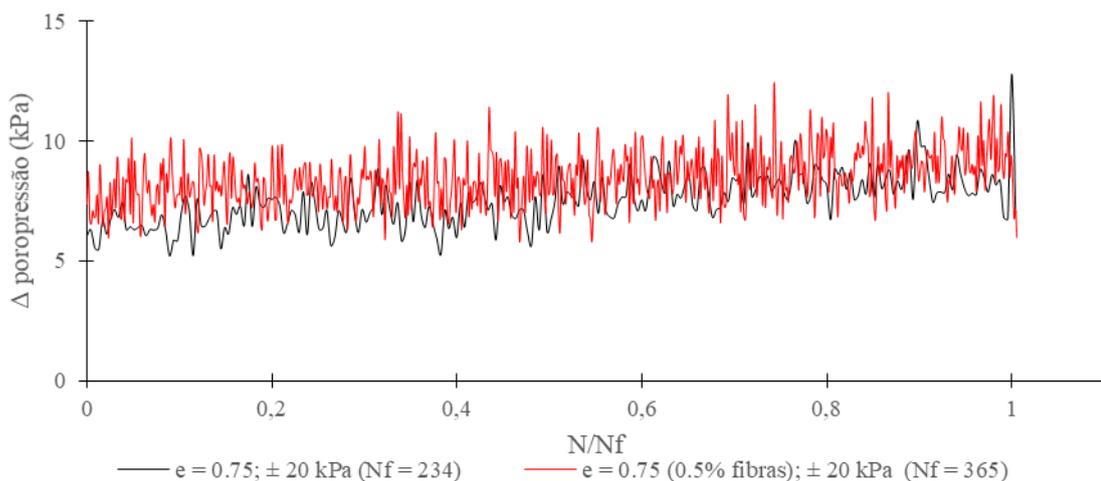


Figura 5.45: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 20$ kPa; $p'_0 = 200$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

No que concerne ao mecanismo de ruptura das amostras, ao atingirem o estado de falha as amostras além de sofrerem grandes níveis de deformações, não conseguem recuperar sua

rigidez durante os intervalos de descarregamento axial. Assim que finalizado cada ensaio, os materiais mantiveram sua nova consistência ainda com a remoção da tensão desvio. Neste caso, o mecanismo de ruptura pode ser considerado como liquefação (CASAGRANDE, 1976; CASTRO; POULOS, 1977).

As Figuras 5.46 e 5.47 ilustram várias situações importantes próprias dos materiais pouco compactos: Primeiramente a ruptura, discutida acima; a maior geração de poropressões no estágio inicial do cisalhamento no material com adição de fibras se comparado à condição sem fibras (Figura 5.48), e finalmente a condição de ruptura, mantida tanto para o material sem fibras quanto com elas.

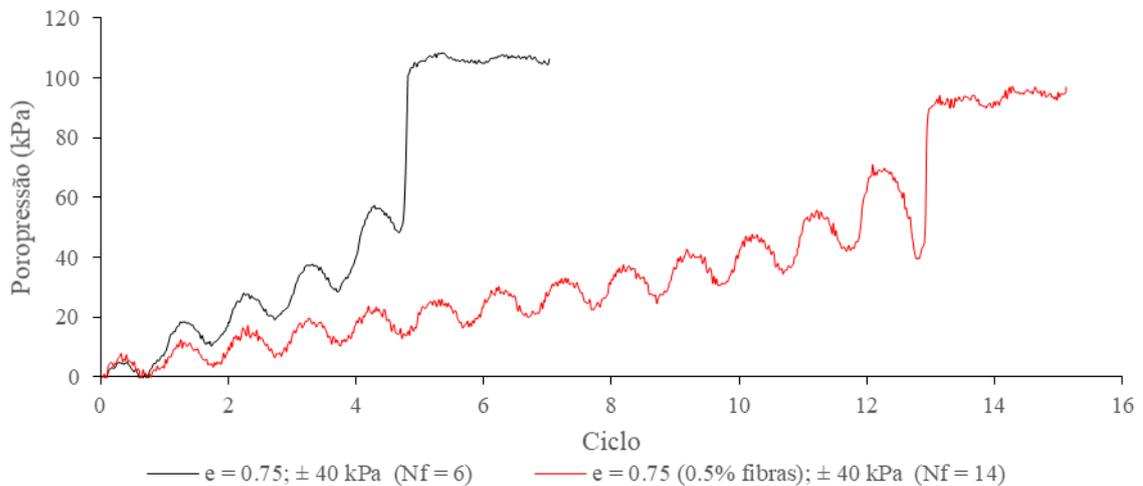


Figura 5.46: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

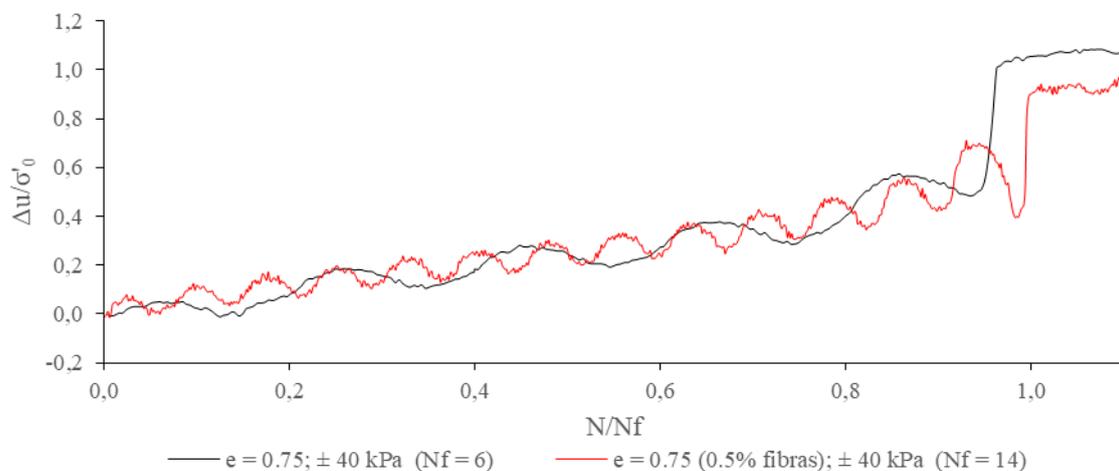


Figura 5.47: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

Neste sentido, a presença das fibras na matriz não evita a ocorrência do fenômeno de liquefação na areia. As fibras influem de forma positiva na resistência contabilizada como número de ciclos máxima (N_f), porém não há sinais de uma mudança no comportamento global do material pela ação da sua inclusão.

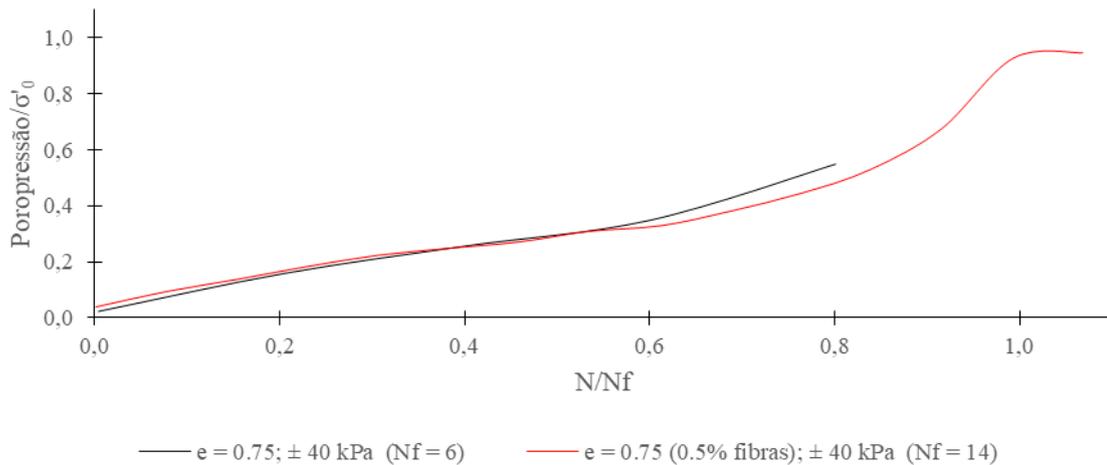


Figura 5.48: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

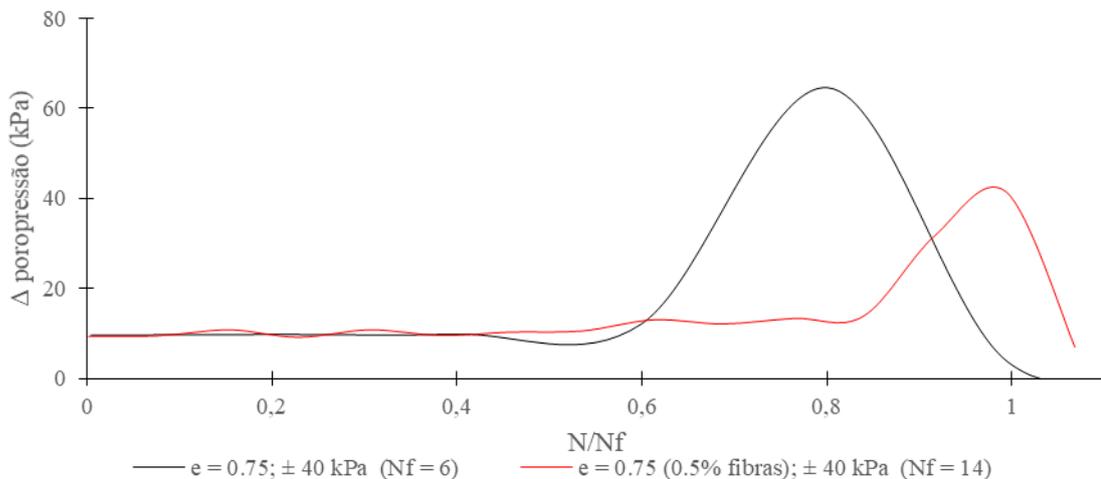


Figura 5.49: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 40$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

A Figura 5.50 ilustra um efeito do processo de liquefação: a partir da perda na consistência do

material, não existe mais a possibilidade de recuperá-la, condição que o impede de manifestar qualquer resistência ao cisalhamento, e com isto qualquer capacidade de reagir ante as variações nas poropressões.

Finalmente, nos corpos de prova ensaiados com as máximas tensões desvio cíclicas ($\pm kPa - 0,6 p'_0$), o efeito das fibras mantêm a tendência de comportamento apontada para as anteriores amostras, porém dentro de uma condição de colapso incremental ao longo da totalidade do cisalhamento (WERKMEISTER et al., 2005).

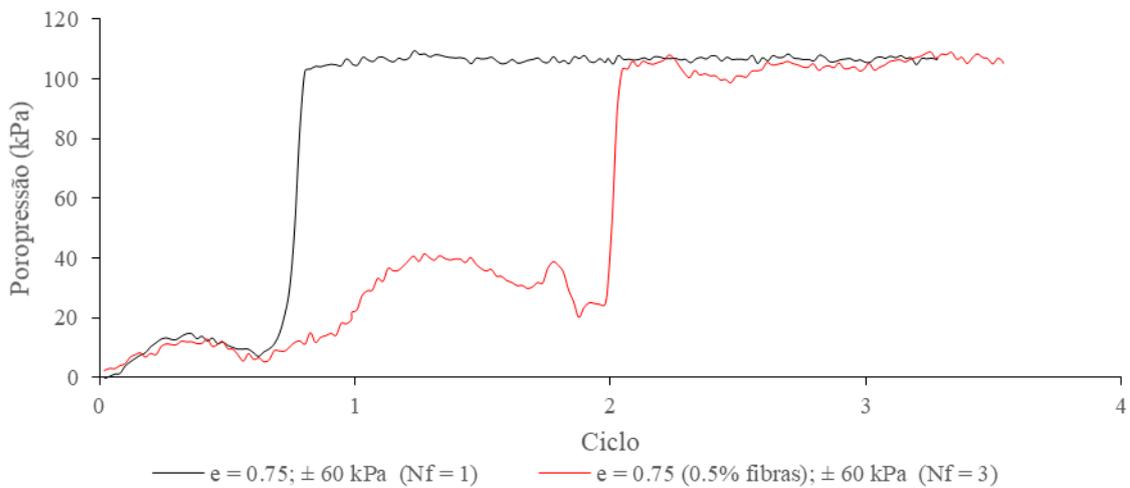


Figura 5.50: Evolução da poropressão com o número de ciclos, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

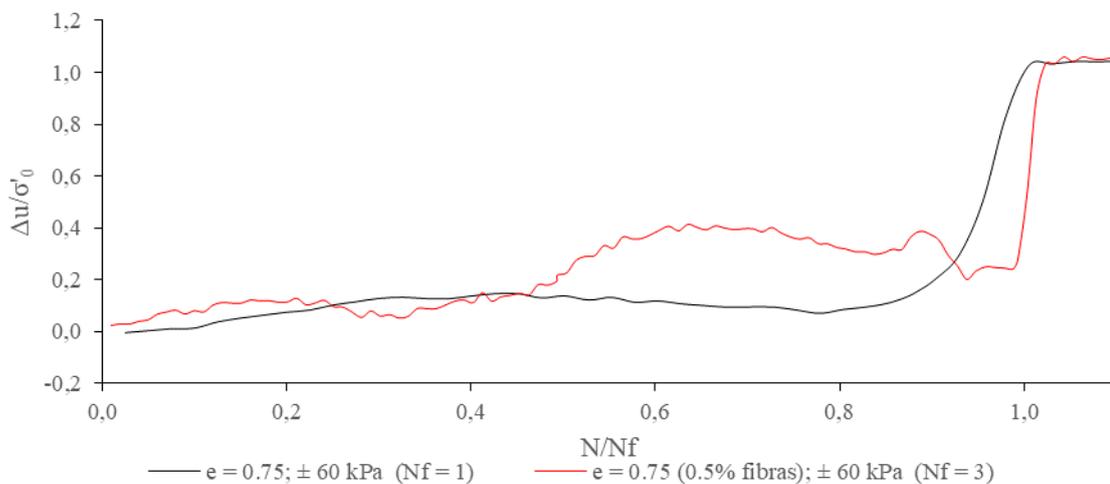


Figura 5.51: Evolução do parâmetro de poropressão com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

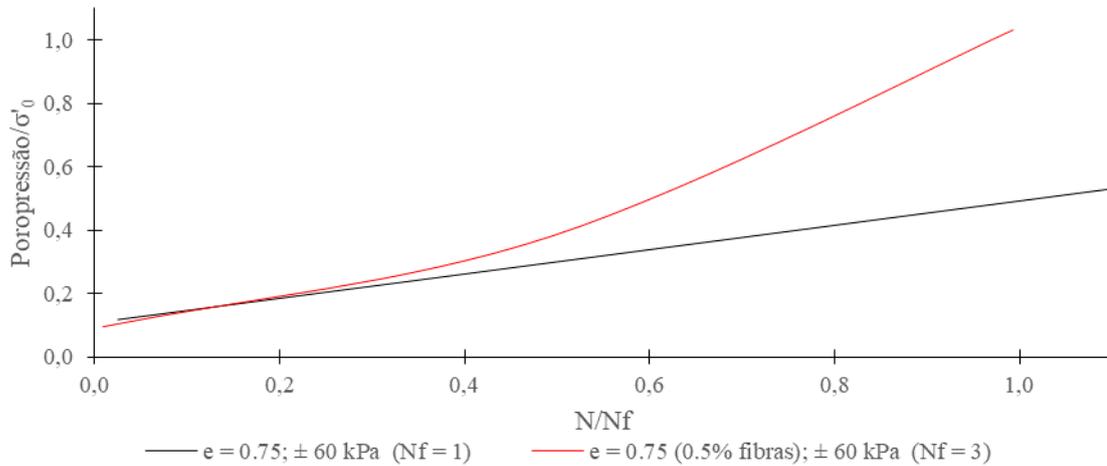


Figura 5.52: Evolução da poropressão residual com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

É importante aclarar que, o comportamento do material sem fibras em termos da variação das poropressões (Figura 5.53) está associado a um valor de N_f igual a 1, o que expressa que o material logo após ter começado o ensaio, atingiu sua ruptura. Considerando uma ruptura por liquefação, a geração de poropressões e deformações após a ruptura pode apresentar inconsistência pela dificuldade do equipamento de ensaio de estabilizar as condições de carga.

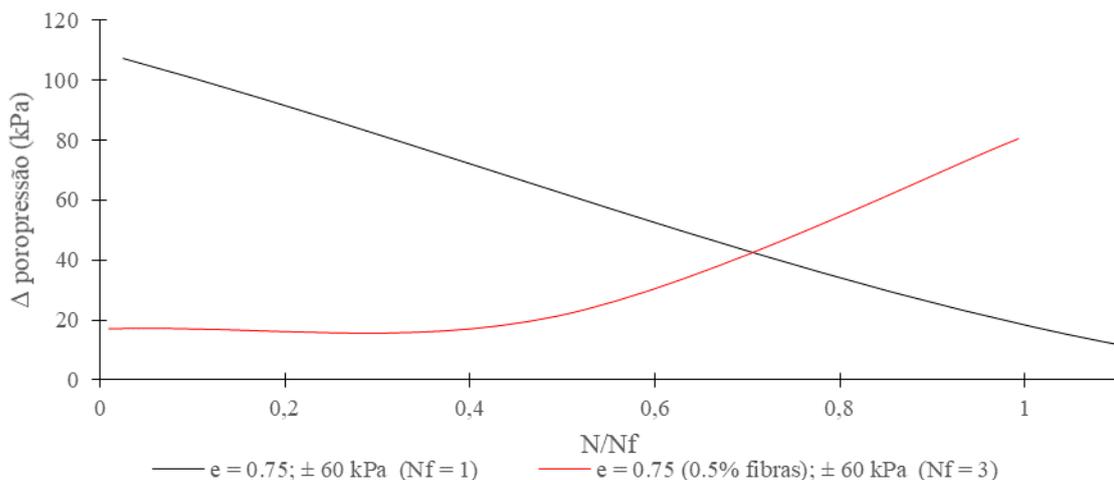


Figura 5.53: Variação máxima da poropressão em cada ciclo de carga com o número de ciclos normalizado, em areia com $e = 0,75$; $\sigma_{dc} = \pm 60$ kPa; $p'_0 = 100$ kPa (Condições sem fibras e com 0,5% de fibras)

5.2.3.2. Evolução das deformações permanentes

No que concerne ao acúmulo de deformações permanentes das amostras ensaiadas, são apresentados os resultados obtidos, primeiramente para a totalidade dos ensaios executados, seguindo com a discussão dos comportamentos apresentados para cada estado de tensões cíclicas imposto, nas condições com e sem fibras.

Na Figura 5.54 são apresentados os resultados dos ensaios em corpos de prova com $e = 0,63$ e tensão efetiva inicial 100 kPa.

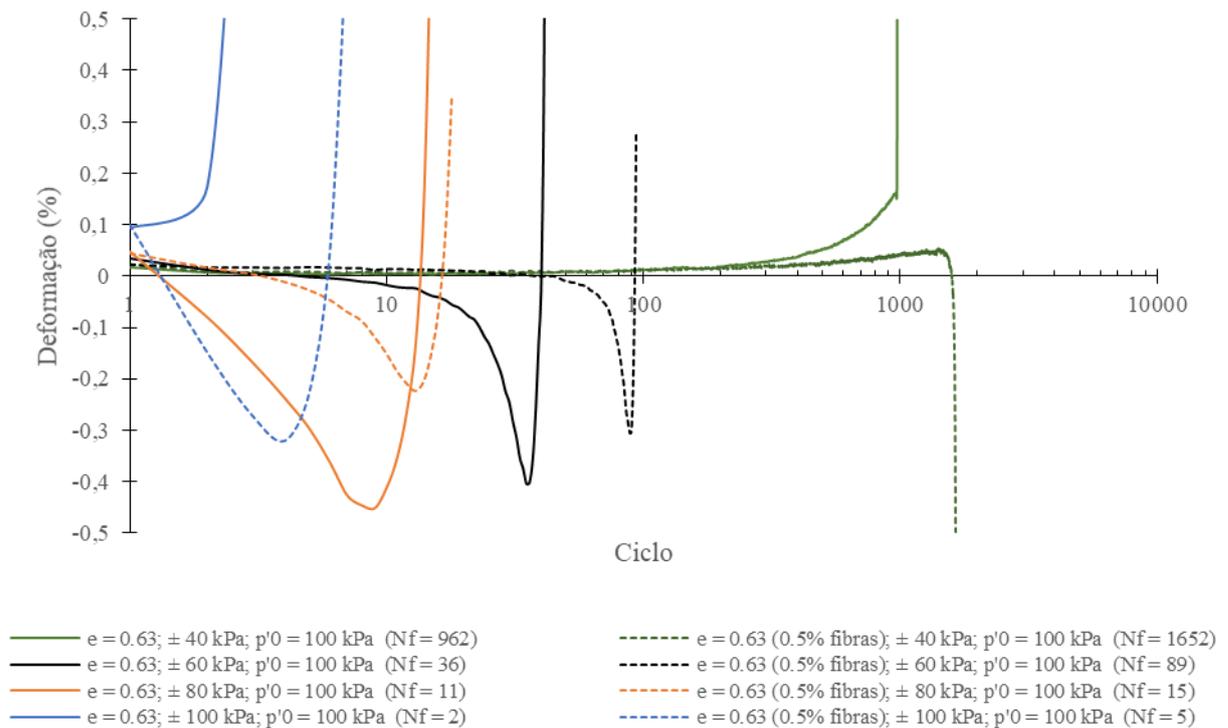


Figura 5.54: Geração de deformações permanentes ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

Em todos os casos apresentados na figura, nota-se o incremento no número máximo de ciclos de carga (N_f) nos corpos de prova com adição de fibras, sendo ainda mais expressivo este incremento nos corpos de prova submetidos a tensões desvio cíclicas menores.

Junto com a magnitude do acumulo de deformações, vê-se também o sentido de ocorrência, sendo principalmente de compressão nos corpos de prova submetidos a carregamentos de baixa amplitude, e de extensão nos corpos de prova com valores de ± 60 kPa e mais, tanto nas condições com e sem fibras

Em ambas as situações, o controle das deformações imposto pela presença das fibras, fez com que além de gerar os incrementos mencionados no valor de N_f , as deformações de ruptura dos corpos de prova se limitassem em todos os casos estudados.

Na Figura 5.55 são apresentados os resultados dos ensaios conduzidos em corpos de prova com $e = 0,63$ e tensão efetiva inicial 200 kPa. Já os resultados para amostras com $e = 0,75$ são apresentados na Figura 5.56.

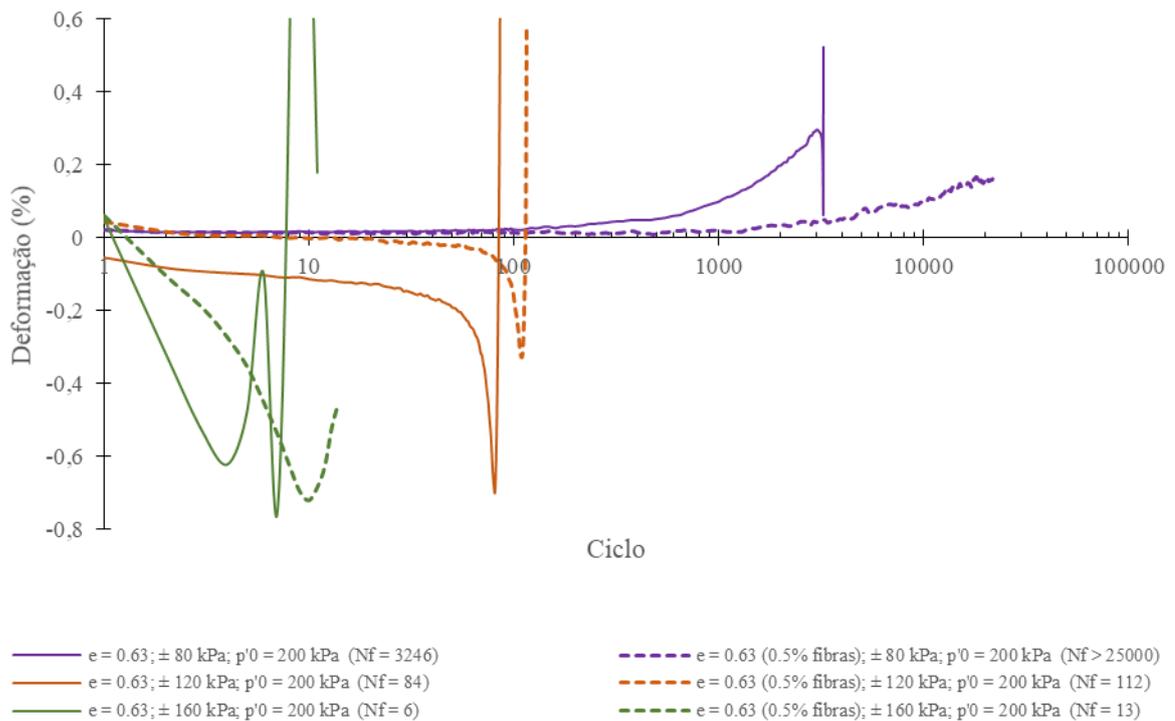


Figura 5.55: Geração de deformações permanentes ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 200$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

O comportamento dos materiais guarda uma tendência, sendo que para os menores valores de tensão desvio, mantêm-se uma tendência de redução na altura do corpo de prova, e de incremento nos valores maiores ($> 0,5 p'_0$).

Para as menores tensões desvio cíclicas aplicadas é evidente o início do aporte das fibras na

resposta mecânica, já que, até um certo ponto, as curvas avançam seguindo os mesmos caminhos, situação que não se mostra expressiva quando as amostras sofrem acúmulo de deformações por extensão.

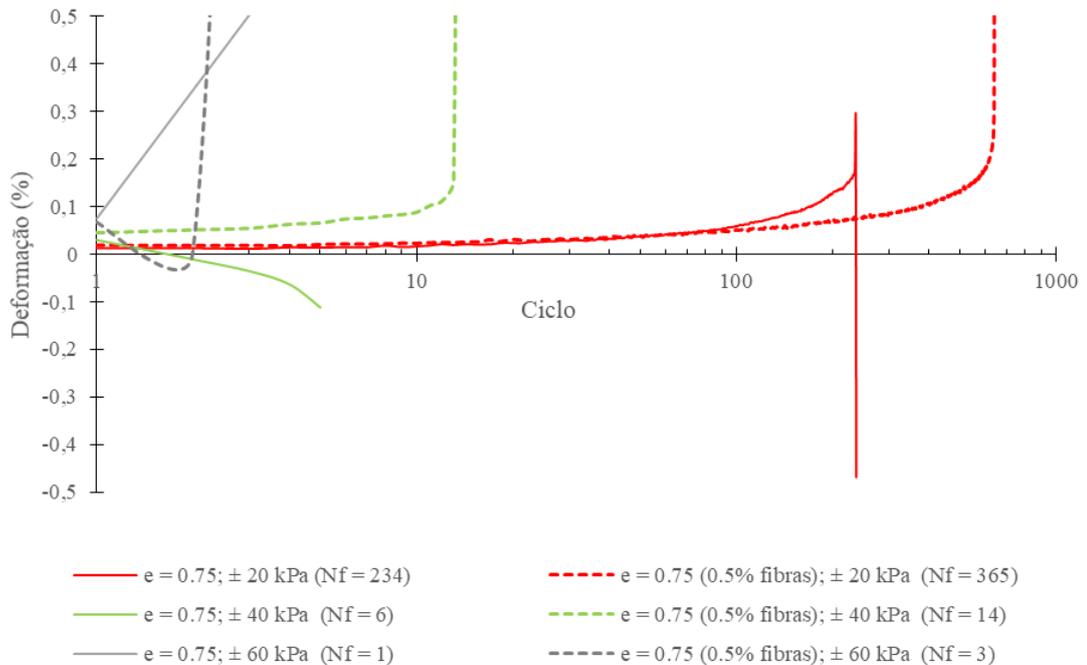


Figura 5.56: Geração de deformações permanentes ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

5.2.3.3. Evolução da amplitude de deformações

No que concerne à deformabilidade apresentada pelos corpos de prova o longo dos ensaios, nas seguintes figuras é apresentada a evolução do valor da dupla amplitude de deformação, começando pelas mostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ kPa (Figura 5.3).

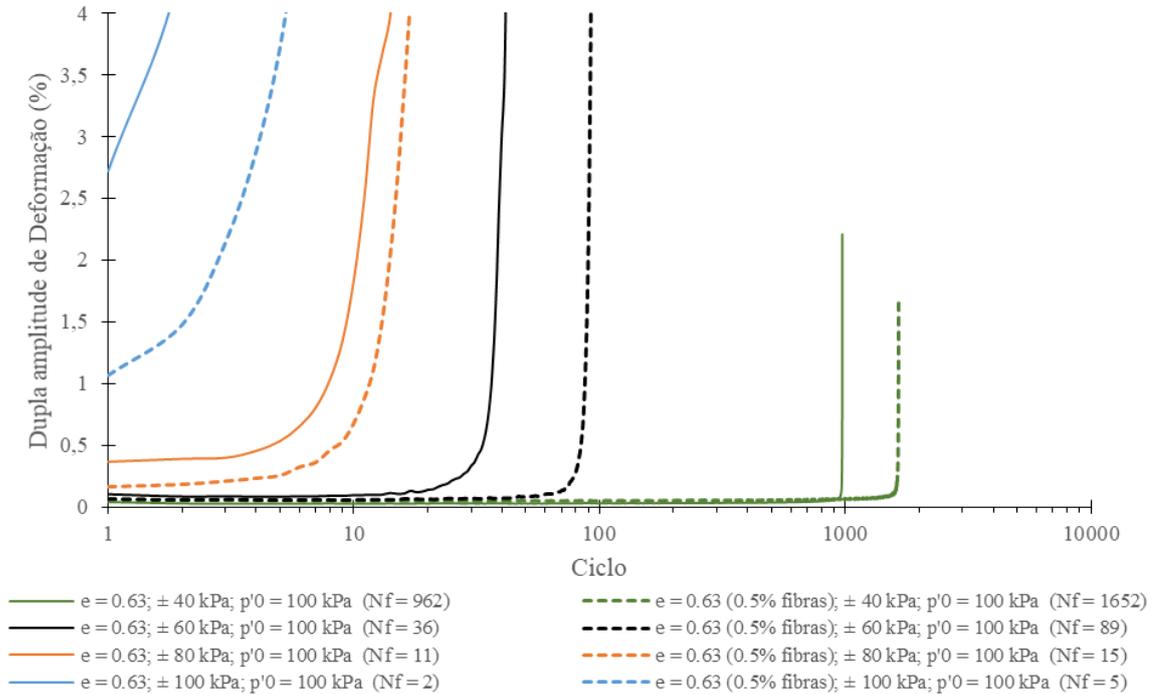


Figura 5.57: Dupla amplitude de deformação exibida ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ (sem fibras e com 0,5% de fibras)

Este comportamento, independente da tendência de acumulo de deformações, deixa ver um controle constante da deformabilidade dos corpos de prova ao longo do ensaio, limitando seu valor quando comparado à condição sem fibras na maioria dos casos (ver Figura 5.58 e Figura 5.59).

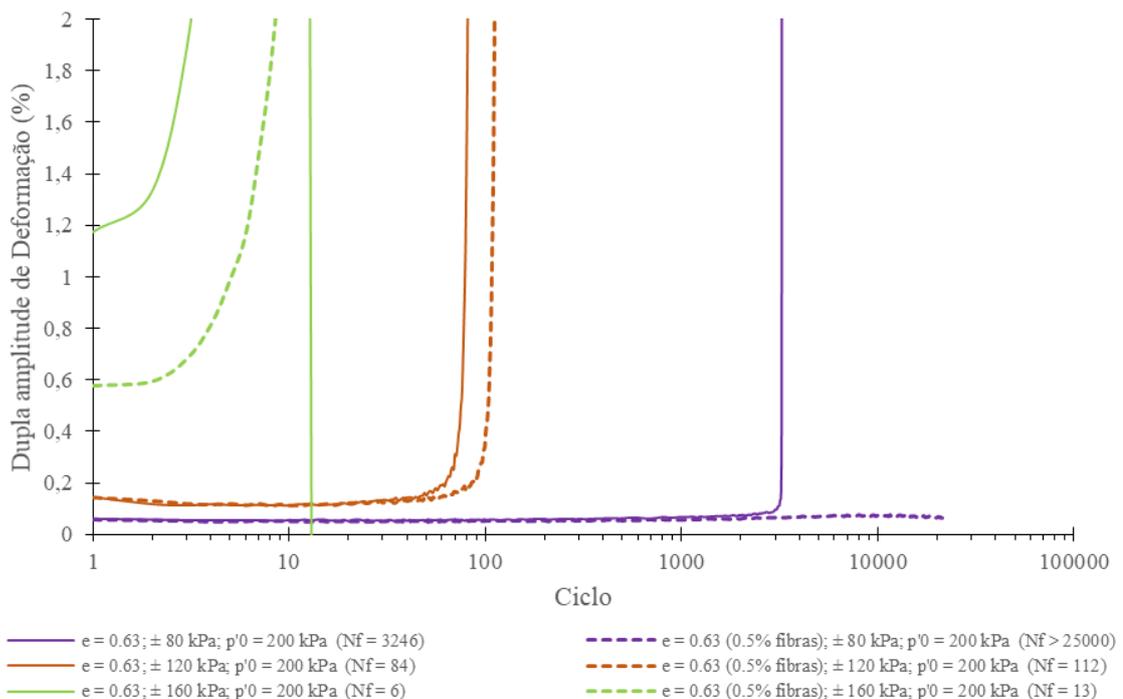


Figura 5.58: Dupla amplitude de deformação exibida ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 200 \text{ kPa}$ (sem fibras e com 0,5% de fibras)

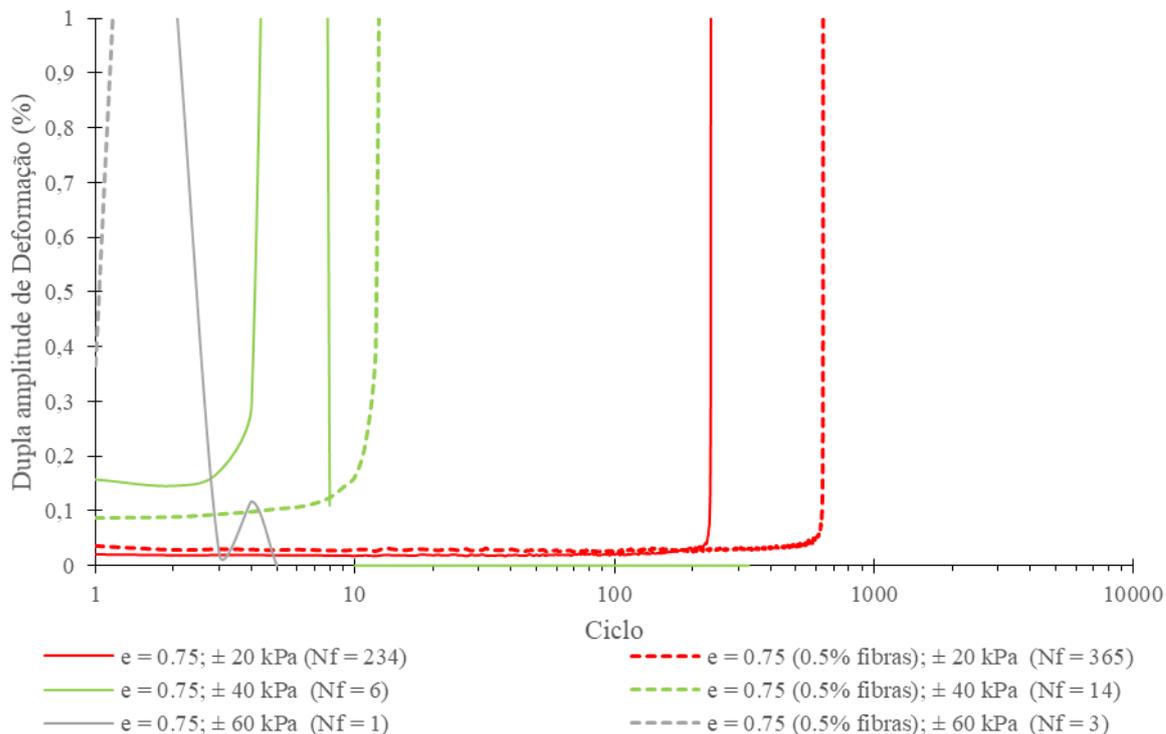


Figura 5.59: Dupla amplitude de deformação exibida ao longo dos ensaios em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

O controle da amplitude de deformações não é expressivo nas amostras submetidas aos menores níveis de carregamento, expressado nas tensões desvio cíclicas prefixadas. Nestes casos o efeito das fibras só se tornou significativo quando as amostras não reforçadas começaram ou se aproximaram do estágio de colapso incremental, ou seja, próximas da ruptura.

Esta variável não se mostrou sensível à adição das fibras nos primeiros ciclos de carga, nos quais, em termos do acúmulo de deformações, evidenciaram-se maiores níveis nas amostras reforçadas do que naquelas que não tiveram adição de fibras.

5.2.3.4. Degradação do módulo de elasticidade secante

A partir da definição de um módulo de elasticidade secante para cada ciclo, composto pelas combinações entre as máximas e mínimas deformações e tensões como apresentado na Figura 5.4, foi possível representar a degradação deste parâmetro ao longo dos ensaios (Figura 5.60 até Figura 5.62).

Visando facilitar a observação e interpretação dos resultados, em todos os casos apresentados o número de ciclos foi representado na condição normalizada (N/N_f).

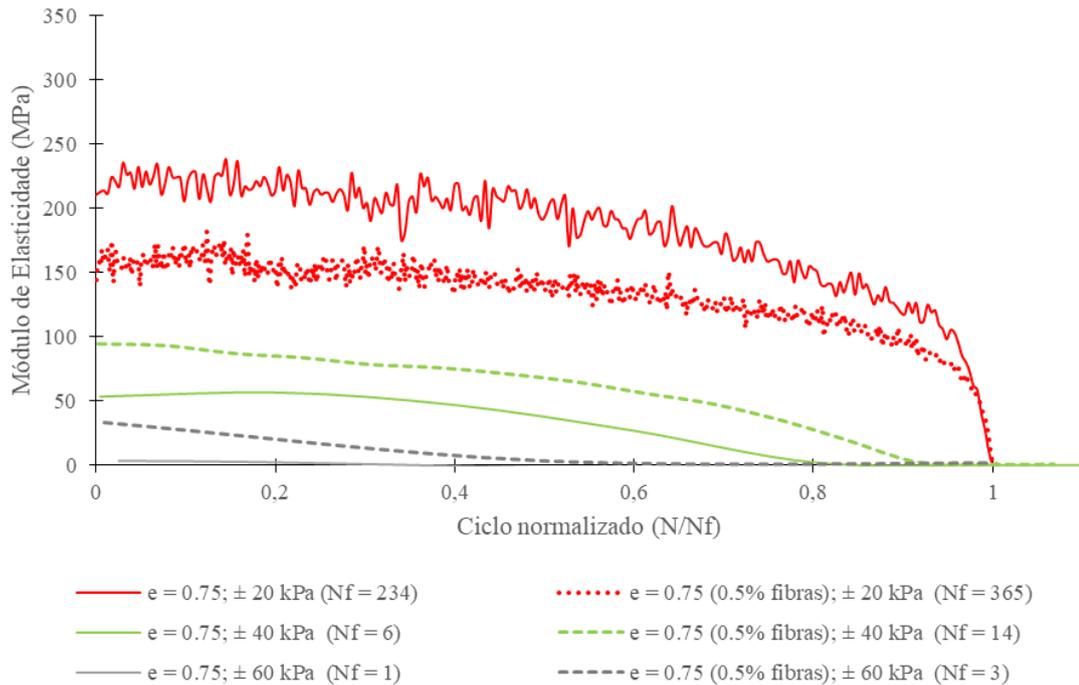


Figura 5.60: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o número normalizado de ciclos em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

O comportamento apresentado pelas amostras segue o apresentado em 0, em que, além do efeito de incremento da rigidez decorrente da adição das fibras, ocorre uma maior preservação do corpo de prova no que diz do seu comportamento até atingir a ruptura.

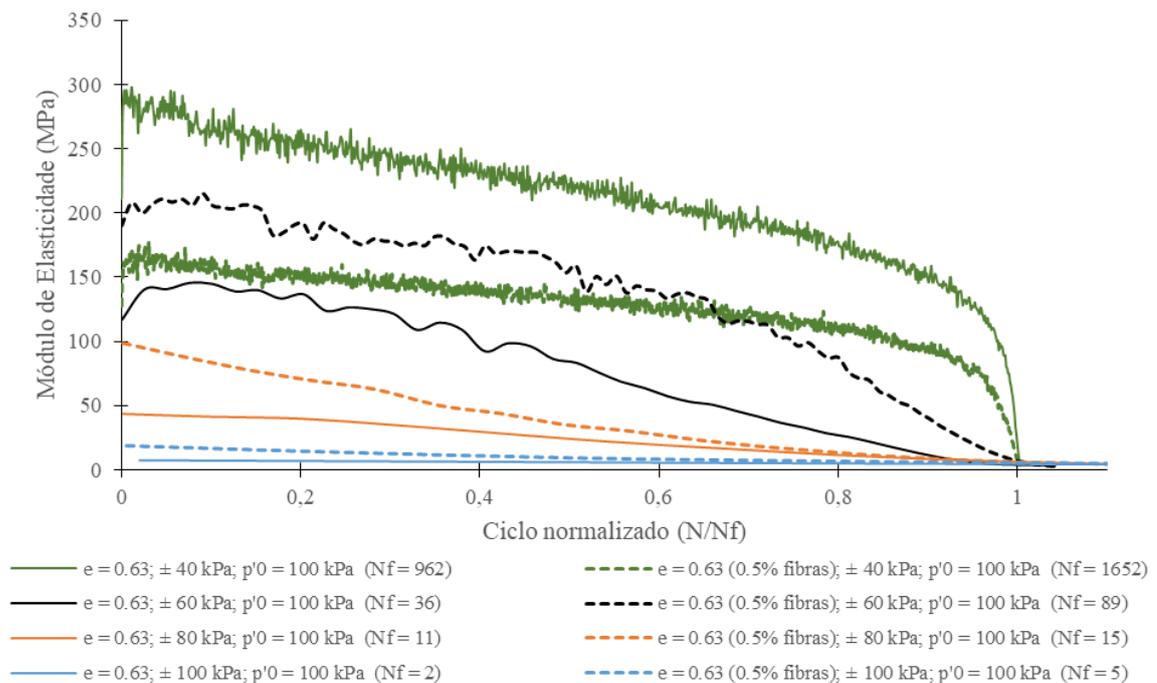


Figura 5.61: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o número normalizado de ciclos em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

O efeito do acomodo das partículas nos estágios iniciais do cisalhamento é visível em alguns dos corpos de prova, e pouco ou nada expressivo nos outros

Nas amostras submetidas a carregamentos menos intensos, ocorreram duas situações que vale a pena destacar: o fato dos corpos de prova com adição de fibras nunca terem alcançado os módulos exibidos pelos materiais sem fibras, e a maior preservação deste valor nos materiais com fibras.

Nas mesmas amostras discutidas acima ocorreu uma menor perda ou degradação no valor do módulo até a ruptura, alcançando menores valores para este parâmetro no início do colapso incremental nos materiais com adição de fibras se comparados à condição sem fibras.

Esta tendência de comportamento foi mantida com exceção da amostra com fibras submetida a tensão efetiva inicial de 200 kPa e tensão desvio cíclica de $80 \pm$ kPa, para a qual não foi atingido um estado de ruptura, e sim um processo de diminuição tanto no excesso de poropressão quanto no valor da dupla amplitude de deformações, ainda que ao longo do ensaio o corpo de prova apresentou uma tendência crescente de acúmulo de deformações (ver Figura 5.62). A situação poderia se dever à tendência dilatante gerada pela inclusão das fibras na matriz de areia, mas provavelmente poderia ter ocorrido alguma perda da condição de saturação ao logo da fase de cisalhamento (ARAB et al., 2011), considerando a duração do ensaio que foi próxima dos 3 dias na fase de cisalhamento.

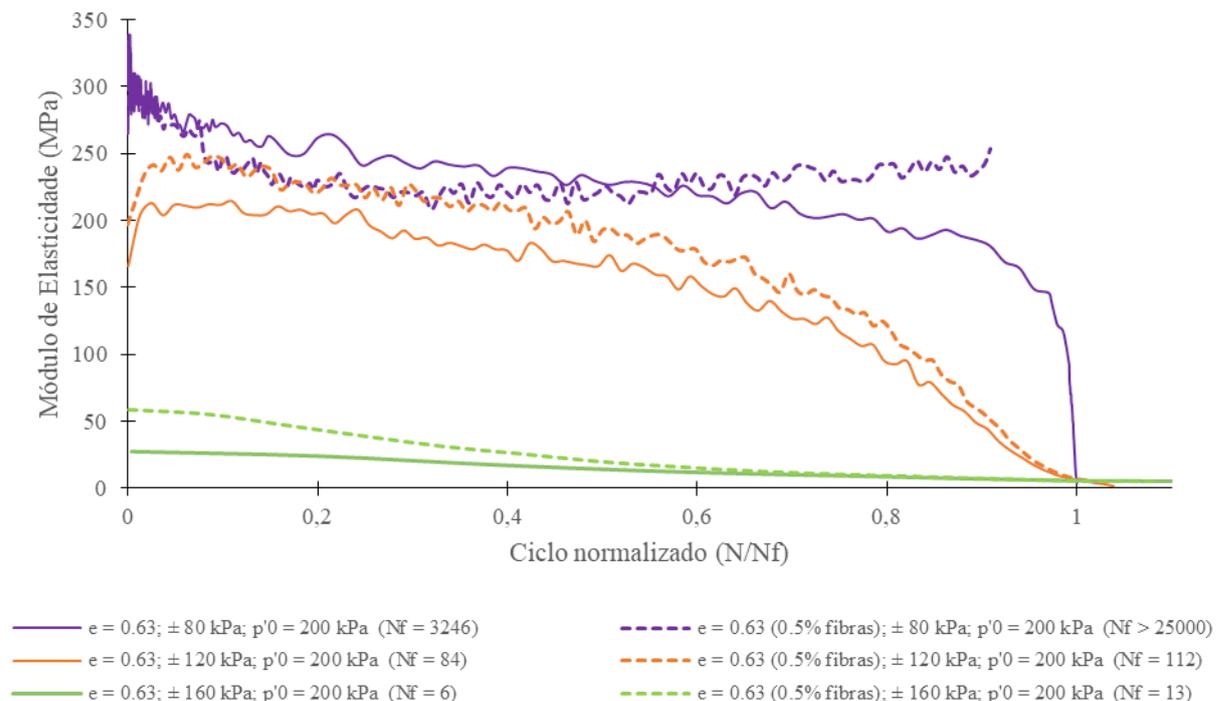


Figura 5.62: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o número normalizado de ciclos em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 200$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

A dificuldade em relação à repetibilidade dos resultados deste tipo de ensaios foi discutida por Ladd (1978), quem propôs o método conhecido como *undercompaction*, que visa a obtenção de corpos de prova cuja resultados possam ser comparados. No entanto, limitar os resultados do comportamento ao número máximo de ciclos tem criado grandes dificuldades na hora de comparar resultados obtidos por distintos autores, e ainda resultados obtidos pelo mesmo autor.

Na Figura 5.63 são representados os resultados obtidos nas amostras com $e = 0,63$, com e sem adição de fibras, para tensões efetivas iniciais no cisalhamento de 100 e 200 kPa. As curvas representam a variação da dupla amplitude de deformação e o módulo de elasticidade secante determinado para cada ciclo de carga.

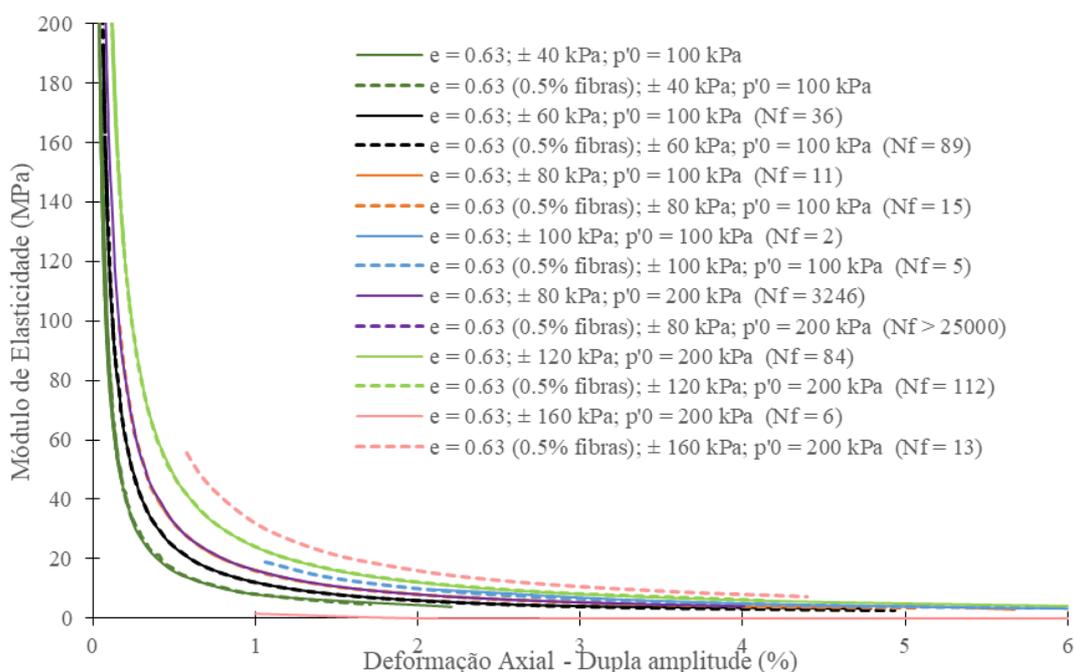


Figura 5.63: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o incremento na dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ e 200 kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

Já na Figura 5.64 são representados os mesmos resultados para corpos de prova moldados com $e = 0,75$.

Em ambos os casos existem semelhanças de comportamento, menos visível nas amostras moldadas com maior índice de vazios, principalmente gerado pelas baixas contagens de ciclos atingidos por estes materiais, sendo que em alguns casos estes valores estiveram em torno de um.

As tendências apresentadas pelas amostras sugerem a possibilidade de normalização dos resultados de vários ensaios e a geração de uma ou várias curvas que possam descrever a tendência de variação.

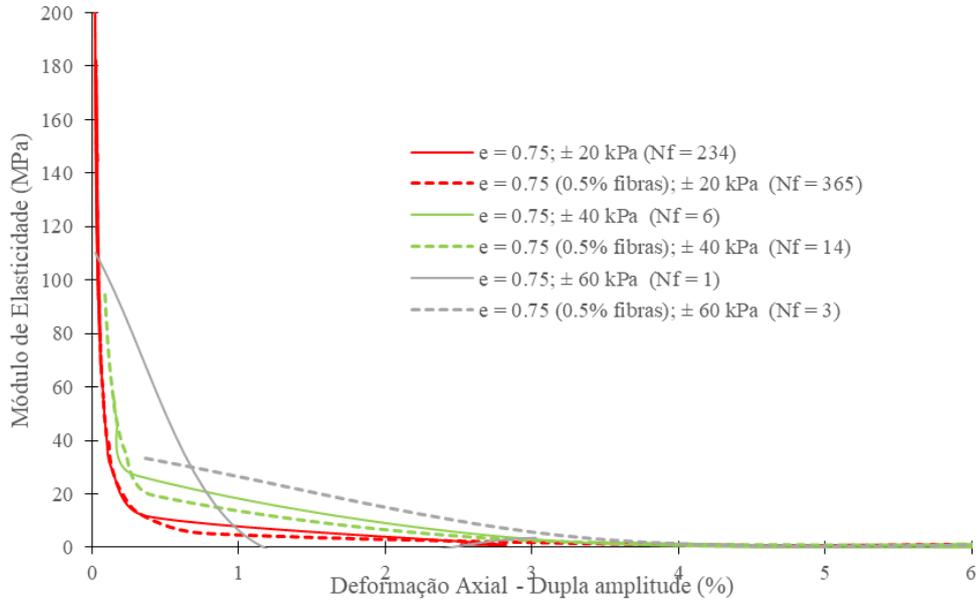


Figura 5.64: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o incremento na dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

A normalização dos valores da dupla amplitude de deformação foi feita com relação aos valores iniciais obtidos no ensaio, tipicamente no primeiro ciclo de carga, como apresentado na Figura 5.65 para os corpos de prova moldados com $e=0,63$ e na Figura 5.66 para aqueles moldados com $e = 0,75$.

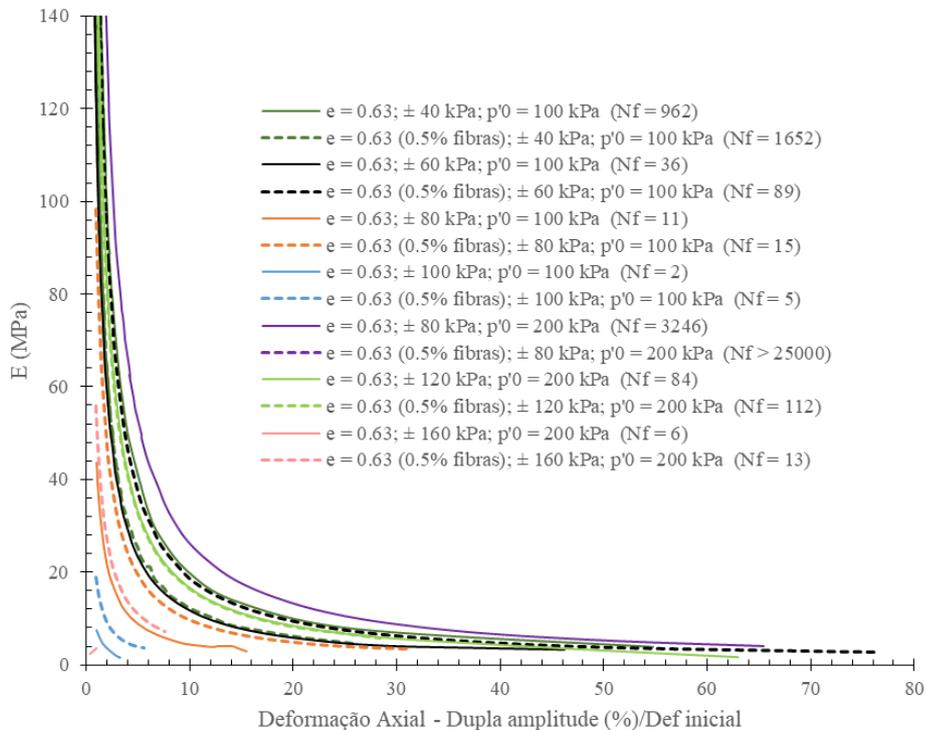


Figura 5.65: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o incremento na dupla amplitude de deformação (normalizada) em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ e 200 kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

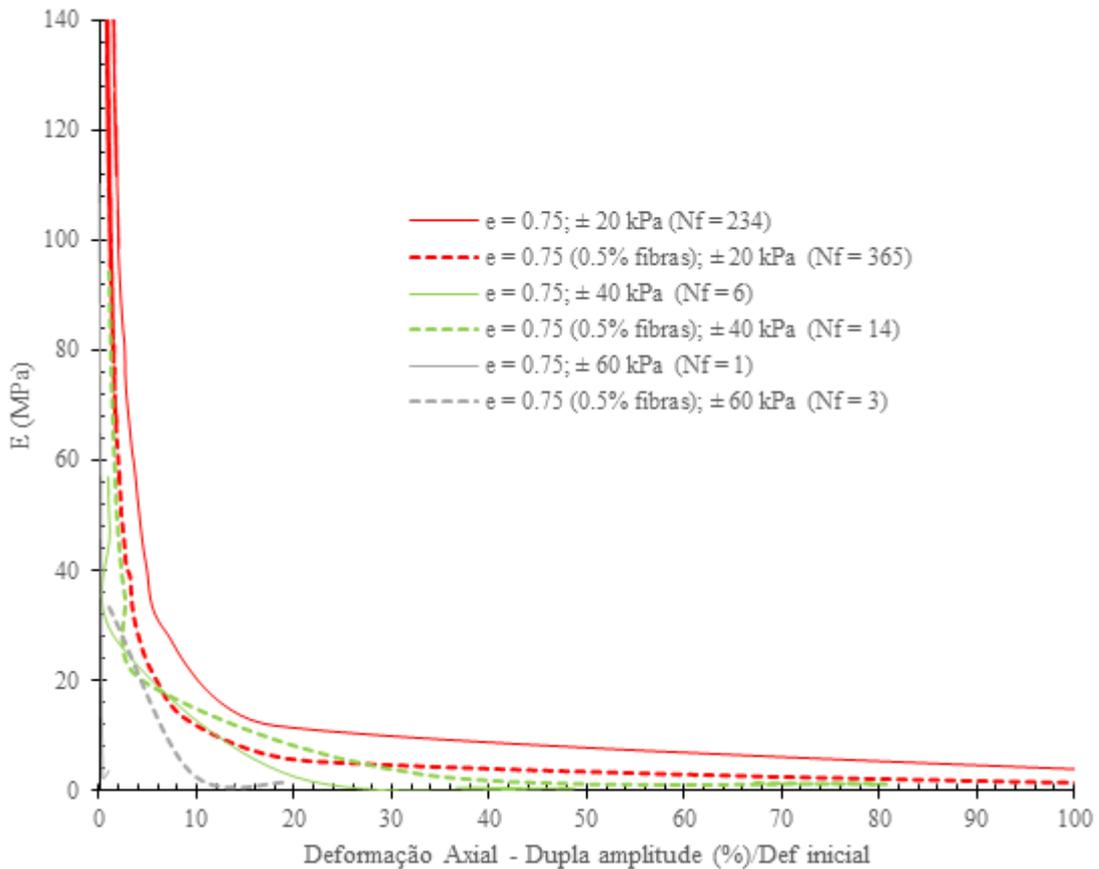


Figura 5.66: Variação do Módulo de Elasticidade secante com o incremento na dupla amplitude de deformação (normalizada) em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

Para completar o processo, foram divididos os valores do módulo de elasticidade secante calculado para cada ciclo de carga, pelo valor inicial obtido dentro do respectivo ensaio. Assim, foram obtidas curvas que representam a dupla normalização (Figura 5.67 para corpos de prova com $e=0,63$ e Figura 5.68 para $e = 0,75$).

Seguindo a mesma lógica, é fornecida a representação bilogarítmica das curvas mencionadas acima, com as quais pode ser identificar a tendência de comportamento dos resultados obtidos, melhor definida nas amostras com índice de vazios de 0,63.

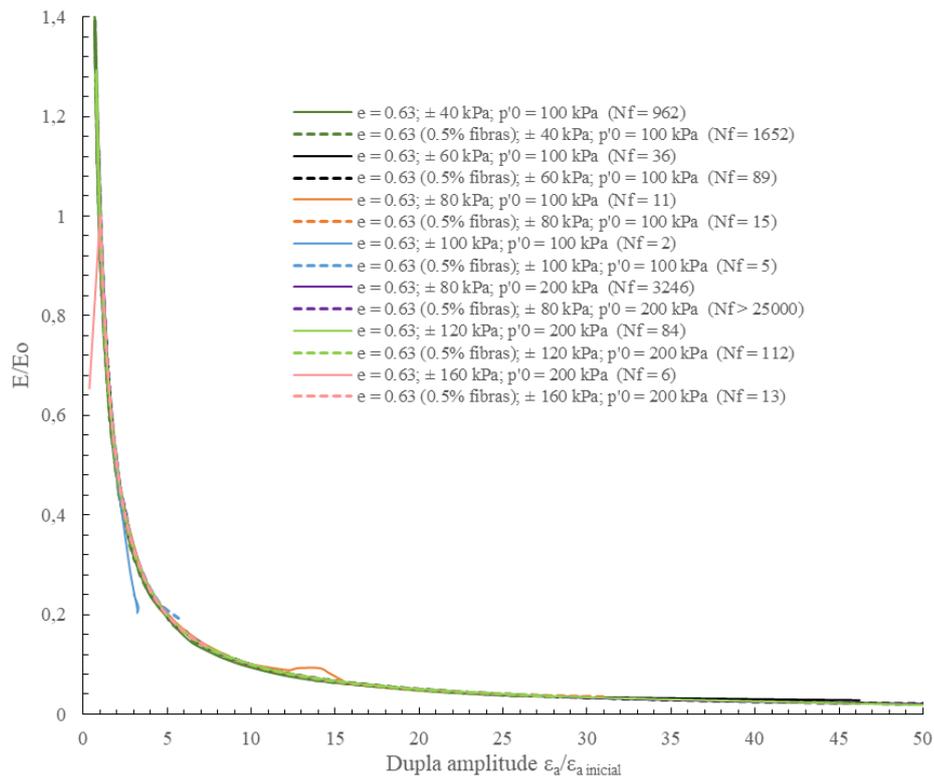


Figura 5.67: Normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ e 200 kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

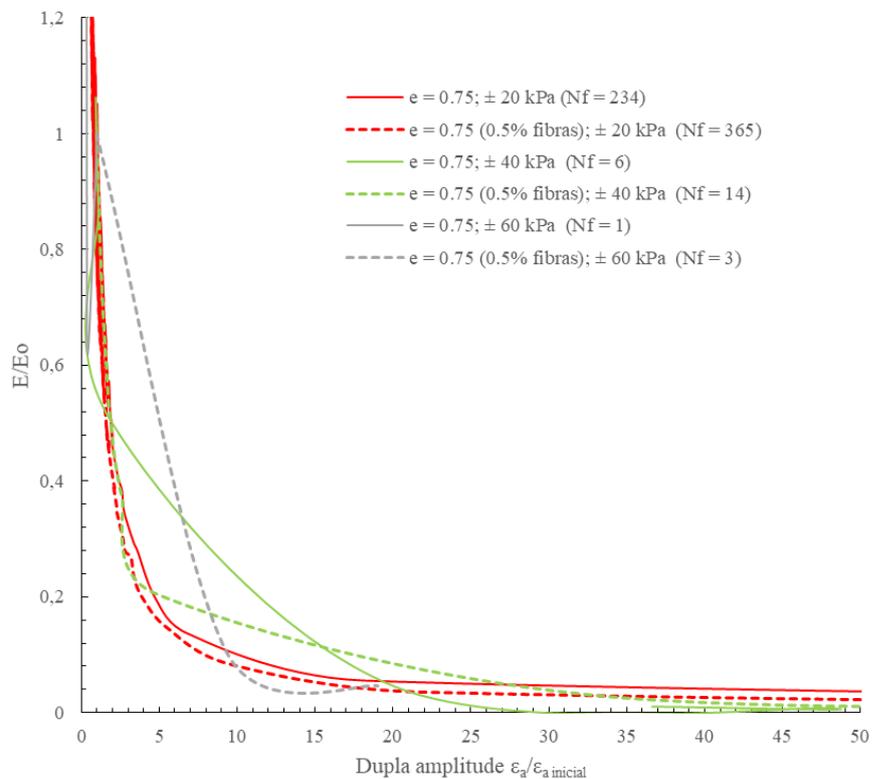


Figura 5.68: Normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100$ kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

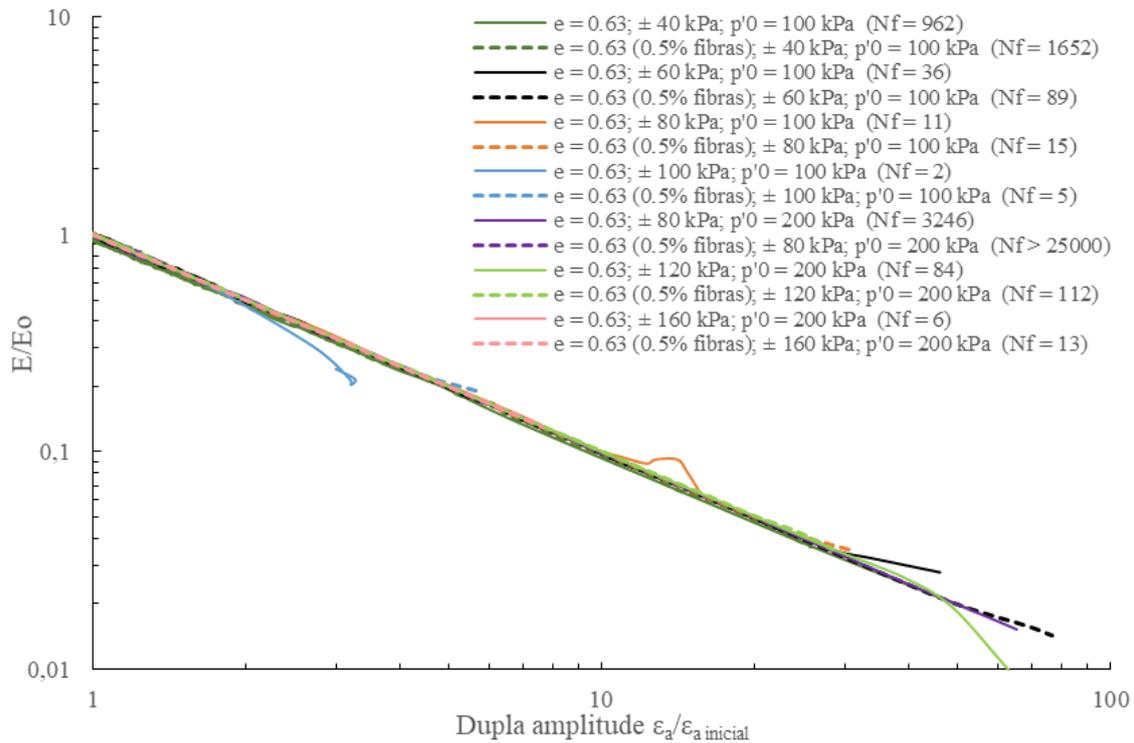


Figura 5.69: Representação bilogarítmica da normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,63$ e $p'_0 = 100$ e 200 kPa (sem fibras e com 0,5% de fibras)

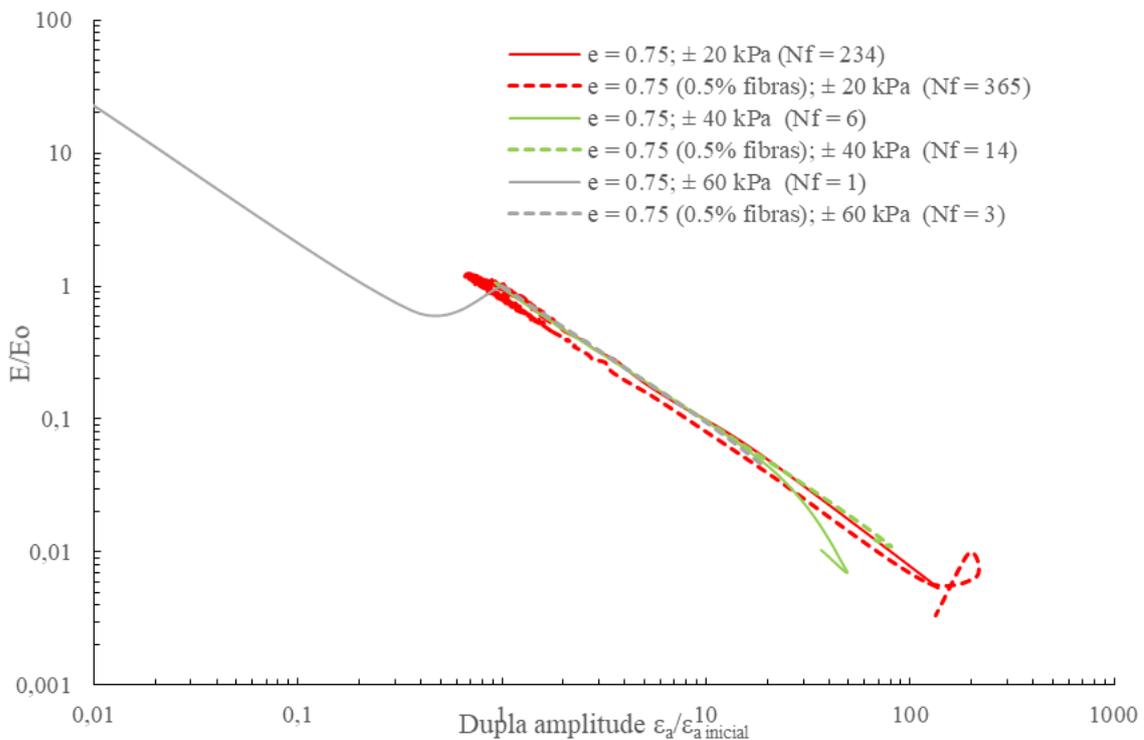


Figura 5.70: Representação bilogarítmica da normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação em amostras com $e = 0,75$ e $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ (sem fibras e com 0,5% de fibras)

As amostras com maior compactação ($e = 0,63$) mostraram-se mais coerentes com esta representação, ainda para os casos em que a ruptura foi atingida com poucas aplicações de carga assim como para números elevados. A comportamento não se mostrou sensível à incorporação de fibras, mesmo que não foi atingida a ruptura em uma das amostras.

Os corpos de prova com menor nível de compactação ($e = 0,75$) apresentaram maior dispersão de comportamento com esta representação, principalmente quando o processo de liquefação foi atingido de forma rápida.

A totalidade dos resultados foram integrados na Figura 5.71.

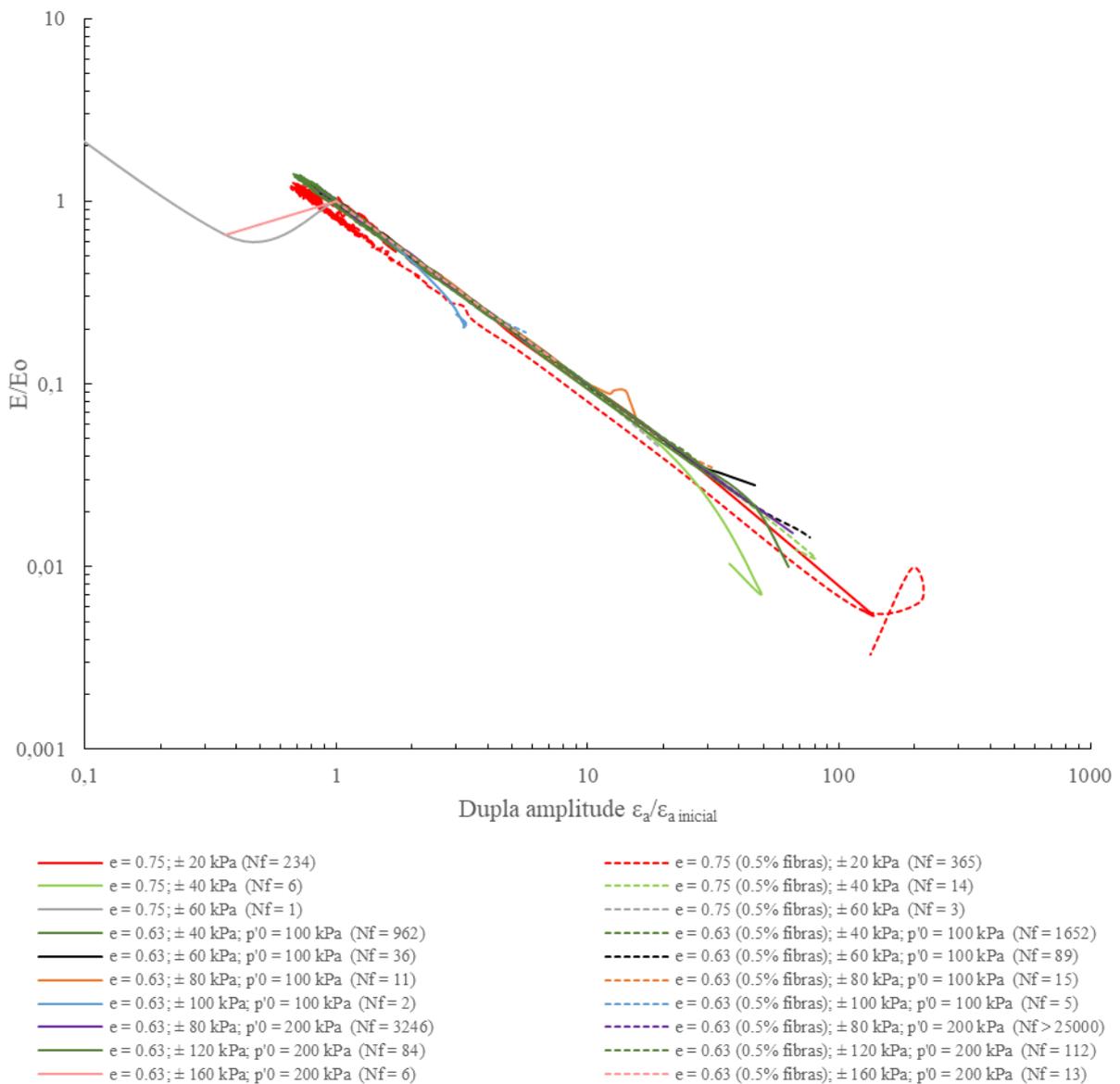


Figura 5.71: Representação bilogarítmica da normalização do Módulo de Elasticidade secante e da dupla amplitude de deformação normalizada em todas as amostras estudadas

Nesta representação é comum a perda de coerência do comportamento na parte final das curvas, nas quais foram localizados alguns pontos após a identificação da ruptura.

Esta representação, quando comparada com a variação da razão de tensão cíclica (CSR) e o número máximo de ciclos (N_f) (Figura 5.72), embora esta última escala seja logarítmica, guarda semelhança no fato que, a adição das fibras não altera significativamente o comportamento das curvas, permitindo uma maior quantidade de aplicações de carga em todos os casos, situação que é menos expressiva para maiores tensões efetivas iniciais ($p'_0 = 200$ kPa).

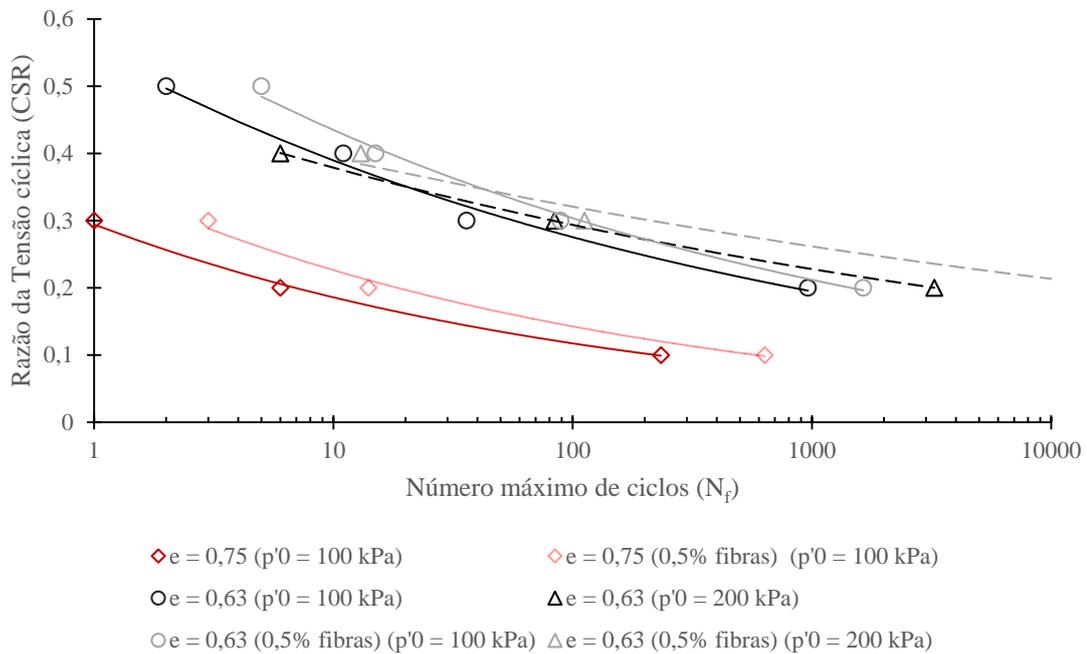


Figura 5.72: Variação do número máximo de ciclos (N_f) com a Razão de Tensão Cíclica (CSR) para cada tipo de condição de dosagem e compactação avaliada

A informação representada na anterior figura permite avaliar um nível de aporte crescente na resistência dos materiais em decorrência da incorporação das fibras, já que, para os menores níveis de tensão a diferença entre a condição sem fibras e com elas é cada vez mais expressiva, e mostrando que para os maiores níveis de tensão, ainda que existindo um aporte das fibras, a tendência de acumulo de poropressões é muito mais forte do que a capacidade das fibras para aumentar a resistência sob ciclos de carga.

No entanto, ainda com um número reduzido de amostras, é importante salientar o fato de ter ocorrido uma tendência de melhoria no comportamento do material em decorrência da adição das fibras e da redução no índice de vazios, sendo este último fator o de maior influência.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do presente estudo foi feita a avaliação experimental dos efeitos da adição de fibras poliméricas em uma areia, sob o efeito de carregamentos estáticos monotônicos e cíclicos, sendo este último o foco das análises estabelecidas.

De igual maneira foram avaliadas duas condições de porosidade das misturas: a primeira correspondendo a um arranjo com densidade média ($D_r = 50\%$); já a segunda correspondeu a um arranjo denso ou compacto ($D_r = 90\%$). Em ambos os casos foram avaliados os comportamentos das misturas com e sem a adição de fibras.

Considera-se este campo de grande potencial em termos acadêmicos e profissionais, seja porque os estudos são vinculados às condições de campo ou com alguns tipos de estruturas, ou pela motivação acadêmica que este campo oferece dentro do campo.

6.1. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas a partir dos ensaios monotônicos executados e as análises feitas foram:

- a) o comportamento monotônico das amostras ensaiadas, principalmente aquelas com $D_r = 50\%$, teve uma importante mudança de comportamento pelo efeito da adição das fibras, com uma tendência dilatante visível nos ensaios não drenados a partir da rápida geração de poropressões negativas, situação que não é claramente apreciável nos ensaios drenados;
- b) para as tensões efetivas avaliadas, o efeito da incorporação das fibras nos materiais compactos não foi claramente apreciável, com exceção de um caso em que o material atingiu um estado de estabilização de deformações e uma condição de volume constante;
- c) em termos do cisalhamento drenado, para as tensões efetivas avaliadas, a tendência do comportamento volumétrico não apresentou diferenças importantes, tanto para os materiais fofos como compactos, com e sem adição de fibras;
- d) houve uma boa correspondência entre os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nas condições drenadas e não drenada, principalmente para

as amostras com índice de vazios 0,75 sem presença de fibras.

- e) Nos corpos de prova compactos ($e=0,63$), o surgimento do pico de resistência nos ensaios drenados aparentemente não foi o fator que gerou o incremento no ângulo de atrito, mas a diferença entre as curvas para as três tensões efetivas ensaiadas se comparadas à condição não drenada;
- f) o efeito do ganho contínuo de resistência nos materiais é facilmente apreciável, tanto para os materiais medianamente fofos como para os compactos.

Em termos dos ensaios cíclicos praticados na areia de Osório, para nos níveis de tensão estudados pode-se dizer que:

- a) em geral, a presença das fibras dentro da matriz incrementou o número de ciclos de carga em todas as condições avaliadas, como apresentado no Quadro 5.3;
- b) foi possível identificar e estabelecer o mecanismo de ruptura para cada tipo de arranjo, apresentando uma forte tendência de liquefação nos casos com densidades médias, com e sem presença de fibras; e por mobilidade cíclica nas amostras de arranjo compacto;
- c) o efeito de diminuição na rigidez para níveis pequenos de deformação foi visível nas amostras de arranjo médio, e também nas amostras compactas submetidas a maiores níveis de tensão efetiva inicial. Ainda que em alguns casos, ao longo dos ensaios esta situação possa chegar a ser reverter, confirma o fato observado em ensaios estáticos da necessidade de um certo acúmulo de deformação para conseguir solicitar realmente as fibras;
- d) quando normalizados, o comportamento dos materiais para um mesmo tipo de arranjo, com ou sem fibras, mostra grandes coincidências tanto nos formatos das curvas descritas quanto em seus valores. Nesse sentido, pode-se confirmar que a incorporação das fibras não gerou transformação na estrutura do material, sendo que as fibras funcionaram apenas como um reforço que retardou a ruptura do material, já que as deformações em que os materiais atingiram a ruptura, ou pelo menos começaram a fase de liquefação inicial, são muito próximas quando comparadas as condições sem e com fibras;
- e) ainda que adição de fibras tivesse sido benéfica também para as amostras com arranjo médio, estas não conseguiram alterar o mecanismo de ruptura do

material, nem tiveram nenhum efeito no comportamento pós-ruptura do material;

- f) para os dois níveis de tensão efetiva avaliados, quando normalizadas as tensões desvio cíclicas aplicadas, foi observada uma relativa correspondência das curvas de evolução do número máximo de ciclos, com tendência a apresentar uma redução do efeito da tensão desvio cíclica para a maior tensão efetiva;
- g) é discutível o emprego do parâmetro número de ciclos como um critério central para determinar a resistência sob carregamentos cíclicos, em razão da grande dispersão apresentada por resultados em iguais condições de moldagem e ensaio, situação observada tanto no presente estudo como em outros estudos;
- h) foi observada uma boa correspondência entre a degradação do módulo de elasticidade secante determinado para cada ciclo de carga, e o incremento na dupla amplitude de deformações, principalmente para as amostras compactas;
- i) com exceção das amostras submetidas a carregamentos de baixa amplitude, a tendência dos materiais foi a de falhar por extensão, condição esperada para solos granulares ainda com adição de fibras, situação confirmada para o caso de areias em outros estudos;
- j) existe uma boa correspondência entre as trajetórias de carregamento cíclico e as respectivas envoltórias de resistência determinadas para cada mistura, sendo que se mostrou como o limite para todos os ensaios. Restaria a execução de ensaios de extensão não drenados para confirmar a influência deste comportamento na deflagração da ruptura do material sob condições cíclicas.

Em relação aos ensaios de validação executados na areia Hostun RF:

- a) não foi encontrada uma boa correspondência dos resultados obtidos, situação que foi ilustrada com a comparação com dois ensaios anteriores executados em diferentes lugares;
- b) a limitada correspondência entre ensaios mostrou a forte variabilidade intrínseca ao ensaio triaxial cíclico e as condições de moldagem dos corpos de prova;
- c) em razão da relativamente estreita faixa de valores tanto em tensão como deformação contemplados dentro do ensaio triaxial cíclico, o efeito decorrente do tipo e localização da instrumentação certamente acarreta diferenças

significativas nos resultados obtidos, situação observada em alguns dos resultados de módulo obtidos quando comparados valores obtidos a partir de condições similares de instrumentação.

Em relação aos ensaios de repetibilidade executados:

- a) a consideração do número de ciclos como parâmetro de comparação de ensaios mostrou-se ineficaz, tanto pelos ensaios executados como por outros estudos consultados. No entanto, quando normalizado este parâmetro, obteve-se uma boa correspondência entre as amostras ensaiadas para nível de tensão desvio cíclica, mostrando coerência na resposta entre as amostras moldadas e ensaiadas sob os mesmos parâmetros;
- b) o emprego de variáveis distintas do número de ciclos mostrou-se como uma abordagem mais ajustada ao comportamento do material, e aparentemente pouco suscetível a diferenças pontuais de funcionamento do equipamento entre ensaios;
- c) a execução de ensaios sob níveis elevados de tensão cíclica dificultam a interpretação dos resultados, principalmente pela alta sensibilidade desenvolvida pela amostra, e pelas pequenas variações na tensão desvio realmente aplicada ao corpo de prova, situação frequente neste tipo de ensaios.

6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando o avanço neste campo de estudo, tanto no que diz aos carregamentos cíclicos quanto ao estudo da incorporação de fibras ou outros agentes, são feitas algumas sugestões:

- a) execução de ensaios cíclicos sem reversão de tensões, de maneira a identificar o efeito da rotação nos eixos das tensões principais na resposta das fibras;
- b) ampliação do programa experimental para outros níveis de tensão efetiva inicial, tanto maiores quanto menores, visando a avaliação da existência de possíveis variações no comportamento cíclico do material;
- c) caracterização do comportamento dos materiais avaliados sob carregamentos cíclicos drenados, com o qual se poderá identificar o efeito da variação no índice de vazios na resposta, com e sem fibras.

- d) execução de ensaios cíclicos sob deformação controlada, visando aprofundar na caracterização deste tipo de misturas, compreendendo que boa parte do aporte mecânico das fibras só começa a partir de certos níveis de deformação.
- e) atualização do equipamento triaxial cíclico, com a finalidade de conseguir avaliar outros tipos de misturas, e outras condições de frequência de carga, seja pela representatividade do fenômeno ou também pela necessidade de aplicar mais ciclos em alguns materiais;
- f) incorporação de medidas internas para carga, permitindo com isto a eliminação das incertezas decorrentes do atrito existente entre o sistema de carregamento e câmara triaxial;
- g) avaliação do efeito do comprimento da fibra na resposta cíclica, assim como o estudo de outros materiais;
- h) avaliação do comportamento em materiais coesivos, considerando a importância do efeito da frequência de carga nestes materiais;
- i) estudo do procedimento de degradação em materiais artificialmente cimentados, para que será importante melhorar o equipamento de maneira a conseguir maiores frequências de ensaio.

REFERÊNCIAS

- AASHTO/T307-99. **Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials**. [s.l.] American Association of State Highways and Transportation Officials, 2007. v. 99
- AL-REFEAI, T.; AL-SUHAIBANI, A. DYNAMIC AND STATIC CHARACTERIZATION OF POLYPROPYLENE FIBER-REINFORCED DUNE SAND ABSTRACT: **Geosynthetics International**, v. 5, n. 5, p. 443–458, 1998. doi:
- ALARCON-GUZMAN, A.; LEONARDS, G. A.; CHAMEAU, J. L. Undrained Monotonic and Cyclic Strength of Sands. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 114, n. 10, p. 1089–1109, out. 1988. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:10(1089).
- ALSHIBLI, K. **Archives os Granular Materials**. Disponível em: <<http://web.utk.edu/~alshibli/research/MGM/archive-page.php?d=archives/Hostun&t=Grain size and SEM images of Hostun RF sand, France>>. Acesso em: 1 jan. 2017.
- AMER, M. I.; AGGOUR, M. S.; KOVACS, W. D. Testing Using a Large-Scale Cyclic Simple Shear Device. **Geotechnical Testing Journal**, v. 9, n. 3, p. 140, 1986. doi:10.1520/GTJ10620J.
- ANDERSEN, K. H. Bearing capacity under cyclic loading — offshore, along the coast, and on land. The 21st Bjerrum Lecture presented in Oslo, 23 November 2007. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 46, n. 5, p. 513–535, maio 2009. doi:10.1139/T09-003.
- ANDERSEN, K. H.; PUECH, A. A.; JARDINE, R. J. Cyclic resistant geotechnical design and parameter selection for offshore engineering and other applications. (A. Puech, Ed.) In: TC 209 Workshop 18th ICSMGE: Desing for cyclic loading: Piles and other foundations, September, Paris. **Anais...** Paris: 2013.
- ARAB, A.; SHAHROUR, I.; LANCELOT, L. A laboratory study of liquefaction of partially sand. **Journal of Iberian Geology**, v. 37, n. 1, p. 29–36, 5 out. 2011. doi:10.5209/rev_JIGE.2011.v37.n1.2.
- ARAÚJO, M. de. Natural and man-made fibres: Physical and mechanical properties. In: FANGUEIRO, R. (Ed.). **Fibrous and composite materials for civil engineering applications**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2011. p. 401.
- ASTM-D2487. **Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)**. [s.l.] American Society for Testing and Materials, 2011.
- ASTM-D3999. **Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus**. [s.l.] American Society for Testing and Materials, 2011.
- ASTM-D4015. **Standard test methods for modulus and damping of soils by resonant-**

column method. [s.l.] American Society for Testing and Materials, 2007.

ASTM-D4767. **Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils.** [s.l.] American Society for Testing and Materials, 2011.

ASTM-D5311. **Standard test method for load controlled cyclic triaxial strength of soil.** [s.l.] American Society for Testing and Materials, 2011.

ASTM-D7181. **Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils.** [s.l.] American Society for Testing and Materials, 2011.

BATHURST, R. J. **Classificação dos Geossintéticos.** Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/1.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2015.

BENAHMED, N. **Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique: application aux phénomènes de liquéfaction et de mobilité cyclique.** 2001. 351 f. École Nationale des Ponts et Chaussées, 2001.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas.** 2006. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BUDINSKI, K. G.; BUDINSKI, M. K. **Engineering materials: properties and selection.** [s.l.] Prentice Hall, 2010.

CASAGRANDE, A. Liquefaction and cyclic deformation of sands: A critical review. In: Fifth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 88, Buenos Aires, Argentina. **Anais...** Buenos Aires, Argentina: 1976.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações.** 2005. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R.; CONSOLI, N. C. Behavior of a Fiber-Reinforced Bentonite at Large Shear Displacements. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 11, p. 1505–1508, 2006. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1505).

CASTRO, G. **Liquefaction of sands.** 1969. 112 f. 81 Harvard University, 1969.

CASTRO, G.; POULOS, S. J. Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 103, n. GT6, 1977. doi:

CASTRO, G.; POULOS, S. J.; FRANCE, J. W.; ENOS, J. L. Liquefaction induced by cyclic loading. **Report to National Science Foundation**, n. February 1982, 1982. doi:

CASTRO, G.; SEED, R. B.; KELLER, T. O.; SEED, H. B. Steady-State Strength Analysis of Lower San Fernando Dam Slide. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 118, n. 3, p. 406–427, mar. 1992. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:3(406).

CHAN, C. K. Electropneumatic Cyclic Loading System. **Geotech Test J**, v. V 4, n. N 4, p. 183–187, 1981. doi:10.1520/GTJ10788J.

CHANEY, R. C.; STEVENS, E.; SHETH, N. Suggested Test Method for Determination of Degree of Saturation of Soil Samples by B Value Measurement. **Geotechnical Testing Journal**, v. 2, n. 3, p. 158, 1979. doi:10.1520/GTJ10448J.

CHAUDHARY, S. K. **Some factors affecting the results in cyclic triaxial tests**. 1971. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – University of Missouri, 1971.

CHERN, J.-C. **Undrained response of saturated sands with emphasis on liquefaction and cyclic mobility**. 1985. 229 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – The Faculty of Graduate Studies, The University of British Columbia, 1985.

CLAYTON, C. R. I.; KHATRUSH, S. A.; BICA, A. V. D.; SIDDIQUE, A. The use of hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation'. **Geotechnical Testing Journal**, v. 12, n. 1, p. 69–76, 1989. doi:10.1520/GTJ10676J.

COELHO, E. F. F. **Estudo de comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

COLLINS, I. F.; WANG, A. P.; SAUNDERS, L. R. Shakedown theory and the design of unbound pavements. **Road and Transport Research**, v. 2, n. 4, p. 28–39, 1993. doi:

CONSOLI, N. C.; ARCARI BASSANI, M. A.; FESTUGATO, L. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 4, p. 344–351, 2010. doi:10.1016/j.geotexmem.2010.01.005.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. **Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand** **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005. .

CONSOLI, N. C.; CONSOLI, B. S.; FESTUGATO, L. A practical methodology for the determination of failure envelopes of fiber-reinforced cemented sands. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 41, p. 50–54, 2013. doi:10.1016/j.geotexmem.2013.07.010.

CONSOLI, N. C.; COOP, M. R.; CASAGRANDE, M. D. T. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. **Géotechnique**, v. 57, n. 9, p. 751–756, 2007a. doi:10.1680/geot.2007.57.9.751.

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Strain-hardening behaviour of fibre-reinforced sand in view of filament geometry. **Geosynthetics International**, v. 16, n. 2, p. 109–115, 4 jan. 2009. doi:10.1680/gein.2009.16.2.109.

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*, 2007b. .

CONSOLI, N. C.; HEINECK, K. S.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. Shear Strength Behavior of Fiber-Reinforced Sand Considering Triaxial Tests under Distinct Stress Paths. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 11, p. 1466–1469, 2007c. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:11(1466).

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; DONATO, M.; PRIETTO, P. D. M. Effect of material properties on the behaviour of sand—cement—fibre composites. **Proceedings of the ICE - Ground Improvement**, v. 8, n. 2, p. 77–90, 2004. doi:10.1680/grim.2004.8.2.77.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 124, n. 12, p. 1211–1214, dez. 1998. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:12(1211).

CONSOLI, N. C.; ZORTÉA, F.; DE SOUZA, M.; FESTUGATO, L. Studies on the Dosage of Fiber-Reinforced Cemented Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. DECEMBER, p. 1624–1632, 2011. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000343.

CORREA, S. D.; RAMÍREZ, A. F. **Implementación de una metodología para disminuir duración y contrapresión en el proceso de saturación de muestras de suelo fino para ensayos triaxiales en el laboratorio de ingeniería civil de la puj.** 2015. 172 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2015.

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

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.

DIAMBRA, A. **Fibre reinforced sands: experiments and constitutive modelling.** 2010. 234

f. Dissertation (Doctor of Philosophy) – University of Bristol, Bristol, 2010.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E. Fibre-reinforced sand: interaction at the fibre and grain scale. **Geotechnique**, v. 65, n. 4, p. 296–308, 2015. doi:10.1680/geot.14.P.206.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; MUIR WOOD, D.; RUSSELL, A. R. Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 3, p. 238–250, jun. 2010. doi:10.1016/j.geotexmem.2009.09.010.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; RUSSELL, A. R.; MUIR WOOD, D. Fibre reinforced sands: From experiments to modelling and beyond. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 37, n. 15, p. 2427–2455, 2013. doi:10.1002/nag.2142.

DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction materials: their nature and behaviour**. 4. ed. London: Spon Press, 2010.

DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. 2007. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

DUPLA, J.-P. **Application de la sollicitation d'expansion de cavité cylindrique à l'évaluation des caractéristiques de liquéfaction d'un sable**. 1995. 422 f. Ecole Nationales des Ponts et Chaussées, 1995.

DYVIK, R.; MADHSUS, C. Lab measurements of Gmax using bender elements. In: ASCE Annual convention: Advances in the art of testing soils under cyclic conditions, Detroit, Michigan. **Anais...** Detroit, Michigan: American Society of Civil Engineers, 1985.

FERREIRA, C. M. da F. **Implementação e aplicação de transdutores piezoelétricos na determinação de velocidade de ondas sísmicas em provetes. avaliação da qualidade de amostragem em solos residuais**. 2003. 167 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2003.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro - reforçado com fibras de distintos índices de aspecto**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FESTUGATO, L. **Comportamento de novos compósitos geotécnicos fibrosos submetidos a carregamentos cíclicos**. 2009. 109 f. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FESTUGATO, L. **Comportamento de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado feforçado com fibras**. 2011. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia)

– Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C.; FOURIE, A. Cyclic shear behaviour of fibre-reinforced mine tailings. **Geosynthetics International**, v. 22, n. 2, p. 196–206, 1 abr. 2015. doi:10.1680/gein.15.00005.

FESTUGATO, L.; FOURIE, A.; CONSOLI, N. C.; FOURIE, A. Cyclic shear response of fibre-reinforced cemented paste backfill. **Géotechnique Letters**, v. 3, n. January-March, p. 5–12, 11 jan. 2013. doi:10.1680/geolett.12.00042.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FLAVIGNY, E.; DESRUES, J.; PALAYER, B. NOTE TECHNIQUE le sable d’Hostun «RF». **Revue Française de Géotechnique**, v. 53, n. Outubro, p. 67–70, 1990. doi:

GHIASSIAN, H.; GHAZI, F. Liquefaction analysis of fine sand reinforced with carpet waste fibers under triaxial tests. In: 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, May, Nicosia, North Cyprus. **Anais...** Nicosia, North Cyprus: 2009.

GHIASSIAN, H.; JAMSHIDI, R.; TABARSA, A. R. Dynamic Performance of Toyoura Sand Reinforced with Randomly Distributed Carpet Waste Strips. In: Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, Reston, VA. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 14 maio 2008. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40975\(318\)44](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40975(318)44)>.

GHIASSIAN, H.; SHAHNAZARI, H.; NOORZAD, A.; TABARSA, A. R.; JAMSHIDI, R. Nonlinear behavior of fine sand reinforced with carpet waste strips in undrained cyclic loading. **Journal of Engineering Research**, v. 39, n. 1B, p. 15–36, 2012. doi:

GIRARDELLO, V. **Ensaios de placa em areia não saturada reforçada com fibras**. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GIRARDELLO, V. **Comportamento de ensaios de arrancamento de placas embutidas em camadas de solo - cimento - fibra**. 2014. 175 f. Tese (Doutorado Em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

GRAY, D. H.; AL-REFEAI, T. BEHAVIOR OF FABRIC-VERSUS FIBER-REINFORCED SAND. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 112, n. 8, p. 804–820, 1986. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:8(804).

GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. **Journal of**

Geotechnical Engineering, v. 109, n. 3, p. 335–353, 1983. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(335).

GREEN, P. a.; FERGUSON, P. a. S. On Liquefaction Phenomena, by Professor A. Casagrande: Report of Lecture. **Géotechnique**, v. 21, n. 3, p. 197–202, 1971. doi:10.1680/geot.1971.21.3.197.

HANNANT, D. J. Polymers and polymers composites. In: ILLSTON, J. (Ed.). **Construction materials: Their nature and behavior**. 2. ed. London: Spon Press, 1994. p. 359–403.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing - volume 2: permeability, shear strength and compressibility tests**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. v. 2

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing - volume 3: effective stress tests**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. v. 3

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing - volume 1: soil classification and compaction tests**. 3. ed. Caithness: Whittles Publishing, 2006. v. 1

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; BICA, A. V. D. Comportamento de solos micro-reforçados a pequeníssimas e grandes deformações de cisalhamento. **Solos e Rochas**, v. 26, n. 1, p. 3–17, 2003. doi:

HICK, M. A.; BOUGHRAROU, R. Finite element analysis of the Nerlerk underwater berm failures. **Geotechnique**, v. 48, n. 2, p. 169–185, 1998. doi:10.1680/geot.1998.48.2.169.

HIGGINS, R. A. **Properties of engineering materials**. 2. ed. London: E. Arnold, 1994.

HOLLAWAY, L. C.; HEAD, P. R. **Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2001.

HOMEM, T. da R. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras**. 2002. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

IBRAIM, E.; DIAMBRA, A.; MUIR WOOD, D.; RUSSELL, A. R. Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 4, p. 374–385, ago. 2010. doi:10.1016/j.geotexmem.2009.12.001.

ISHIHARA, K. Stability of natural deposits during earthquakes. In: 11 ICSMFE, San Francisco.

Anais... San Francisco: 1985.

ISHIHARA, K. Liquefaction and flow failure during earthquakes. **Géotechnique**, v. 43, n. 3, p. 351–451, 1993. doi:10.1680/geot.1993.43.3.351.

ISHIHARA, K. **Soil behaviour in earthquake geotechnics**. New York: Oxford Science Publications, 1996.

JEFFERIES, M.; BEEN, K. **Soil liquefaction: a critical approach**. [s.l.] Taylor & Francis, 2006.

JOHNSTON, C. D. Fibre reinforced cement and concrete. In: **Advances in concrete technology**. 2. ed. Ottawa: Malhorta, 1994. p. p.603-673.

KANIRAJ, S. R.; HAVANAGI, V. G. Behavior of Cement-Stabilized Fiber-Reinforced Fly Ash-Soil Mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 7, p. 574–584, 2001. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(574).

KRAMER, S. L. **Geotechnical earthquake engineering**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

KRENCHER, H. **Fibre reinforcement: theoretical and practical investigations of the elasticity and strength of fibre-reinforced materials**. Copenhagen: Akademisk Forlag, 1964.

KRISHNASWAMY, N. R.; THOMAS ISAAC, N. Liquefaction potential of reinforced sand. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 13, n. 1, p. 23–41, 1994. doi:10.1016/0266-1144(94)90055-8.

LA-ROCHELLE, P.; LEROUEIL, S.; TRAK, B.; BLAIS-LEROUX, L.; TAVENAS, F. A. Observational Approach to Membrane and Area Corrections in Triaxial Tests. (R. T. Donaghe, R. C. Chaney, M. L. Silver, Eds.) In: advanced triaxial testing of soil and rock, ASTM STP 977, Philadelphia. **Anais...** Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1988.

LADD, R. S. Preparing Test Specimens Using Undercompaction. **Geotechnical Testing Journal**, v. 1, n. 1, p. 16–23, 1978. doi:10.1520/GTJ10364J.

LADE, P. V.; DUNCAN, J. M. Cubical triaxial tests on cohesionless soil. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 99, n. 10, p. 793–812, 1973. doi:10.1016/0148-9062(74)91579-4.

LI, J.; DING, D. . **Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading** *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002. .

MAHER, M. H.; HO, Y. C. Behavior of Fiber-Reinforced Cemented Sand Under Static and Cyclic Loads. **Geotechnical Testing Journal**, 1993. doi:10.1520/GTJ10054J.

MAHER, M. H.; WOODS, R. D. Dynamic Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 7, p. 1116–1131, 1990. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:7(1116).

MAHESHWARI, B. K.; SINGH, H. P.; SARAN, S. **Effects of Reinforcement on Liquefaction Resistance of Solani Sand** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012. .

MARCON, L. P. **Estudo comparativo do comportamento mecânico de duas areias de osório – rs**. 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MCGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; AL-HASANI, M. M. Effect of inclusion properties on the behaviour of sand. **Géotechnique**, v. 28, n. 3, p. 327–346, 9 jan. 1978. doi:10.1680/geot.1978.28.3.327.

MITCHELL, J. K. Soil Improvement - State-of-the-Art Report. In: 10th International Conference of the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm. **Anais...** Stockholm: 1981.

MITTAL, S.; CHAUHAN, R. Liquefaction behavior of reinforced saturated sand under dynamic conditions. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 7, n. 1, p. 109–114, 2013. doi:10.1179/1938636212Z.0000000008.

MULILIS, J. P.; TOWNSEND, F. C.; HORZ, R. C. Triaxial Testing Techniques and Sand Liquefaction. In: SILVER, M. L.; TIEDEMANN, D. (Ed.). **Dynamic Geotechnical Testing STP 654**. Denver, Colorado: American Society for Testing and Materials, 1978. p. 265–279.

NBR-6502. **Rochas e solos – terminologia**. [s.l: s.n.]

NCHRP. Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. **Research Results Digest**, n. 285, p. 52, 2004. doi:

NOORANY, I.; UZDAVINES, M. Dynamic behavior of saturated sand reinforced with geosynthetic fibers. In: Geosynthetics '89, **Anais...**North American Geosynthetics Society, 1989.

NOORZAD, R.; FARDAD AMINI, P. Liquefaction resistance of Babolsar sand reinforced with randomly distributed fibers under cyclic loading. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 66, p. 281–292, nov. 2014. doi:10.1016/j.soildyn.2014.07.011.

O'REILLY, M. P.; BROWN, S. F. **Cyclic loading of soils: from theory to design**. Glasgow: BLackie and Son Ltd, 1991.

OMAR, T.; SADREKARIMI, A. Effect of triaxial specimen size on engineering design and analysis. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 6, n. 1, p. 5, 2015. doi:10.1186/s40703-015-0006-3.

PALMEIRA, E. M. Geossintéticos: Tipos e evolução nos últimos anos. In: Seminário sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia, Brasília. **Anais...** Brasília: 1992.

PALMEIRA, E. M. Evolução dos geossintéticos no Brasil. (ABMS/ABGE, Ed.) In: 2do Simpósio Brasileiro sobre aplicações de geossintéticos, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1995.

PCA. **Fiber reinforced concrete**. 1. ed. Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 1991.

PIFFER, L. **La liquefazione delle sabbie**. 1992. Facoltà di Ingegneria - Università Degli Studi di Trento, 1992.

QIU, C.; ZHANG, M. Discrete Element Modeling of Dynamic Triaxial Test on Reinforced Saturated Sand. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, p. 10661–10672, 2014. doi:

RAD, N. S.; WAYNE, G. New Procedure for Saturating Sand Specimens. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 110, n. 9, p. 1205–1218, 1984. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:9(1205).

RAWLING, A.; HANNANT, D. J.; MULHERON, M. The effects of fibres on the plastic shrinkage cracking of high strength concrete. **Materials and Structures**, v. 35, n. April, p. 189–194, 2002. doi:10.1007/BF02533588.

REES, S. **Part Three: Dynamic triaxial testing**. Disponível em: <<http://www.gdsinstruments.com/white-paper-dynamic-triaxial-testing>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

SACHETTI, A. S. **Nova abordagem para previsão de parâmetros de resistência ao cisalhamento de uma areia artificialmente cimentada**. 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SAMAL, M. R. Dynamic Behavior of Fibre Reinforced Sand. **International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering**, v. 1, n. 1, p. 21–27, 2011. doi:

SANGREY, D. A.; POLLARD, W. S.; EGAN, J. A. Errors Associated with Rate of Undrained Cyclic Testing of Clay Soils. In: SILVER, M. L.; TIEDEMANN, D. (Ed.). **Dynamic Geotechnical Testing STP 654**. Denver, Colorado: American Society for Testing and Materials, 1978. p. 280–294.

SANTOS, A. P. S. dos. **Comportamento de misturas solo - cimento sob compressão confinada com medição de tensão lateral**. 2004. 2004.

SEED, H. B.; LEE, K. L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, v. 92, n. 6, p. 105–134, 1966. doi:

SHEWBRIDGE, S. E.; SITAR, N. Deformation-Based Model for Reinforced Sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 7, p. 1153–1170, jul. 1990. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:7(1153).

SHEWBRIDGE, S. E.; SOUSA, J. B. Dynamic Properties of Reinforced Sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 117, n. 9, p. 1402–1422, 1991. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:9(1402).

SINGHA, K. A Short Review on Basalt Fiber. **International Journal of Textile Science**, v. 1, n. 4, p. 19–28, 2012. doi:10.5923/j.textile.20120104.02.

SKEMPTON, A. W. The Pore-Pressure Coefficients A and B. **Géotechnique**, v. 4, n. 4, p. 143–147, 12 jan. 1954. doi:10.1680/geot.1954.4.4.143.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. 2000. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

SPINELLI, L. de F. **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. 1999. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

TAYLOR, G. D. **Materials in construction: principles, practice and performance**. 2. ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994.

TEODORO, J. M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. 1999. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de São Carlos / Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

TERASHI, M.; JURAN, I. Ground Improvement – State of the Art. In: ISRM International Symposium, Melbourne. **Anais...** Melbourne: International Society for Rock Mechanics, 2000.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice third edition**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1996.

TOWNSEND, F. C. A review of factors affecting cyclic triaxial tests. In: SILVER, M. L.; TIEDEMANN, D. (Ed.). **Dynamic Geotechnical Testing STP 654**. Denver, Colorado: American Society for Testing and Materials, 1978. p. 356–383.

USACE. **Laboratory soils testing - em 1110-2-1906**. Washington D.C.: U. S. Army Corps of Engineers, 1986.

UZDAVINES, M. **Effect of soil reinforcement on the liquefaction potential of saturated sand**. 1987. Thesis (Master of Science) – San Diego State University, San Diego, California, 1987.

VAN-IMPE, W. F. **Soil improvement techniques and their evolution**. Rotterdam: Balkema, 1989.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIDAL, H. The Principle of Reinforced Earth. **Highway Research Record**, v. 282, p. 1–16, 1969. doi:

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Permanent Deformation Behaviour of Granular Materials. **Road Materials and Pavement Design**, v. 6, n. 1, p. 31–51, 2005. doi:10.1080/14680629.2005.9689998.

APÊNDICES

APÊNDICE A. RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS

APÊNDICE B. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

APÊNDICE A. RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS

A.1. AREIA HOSTUN (*HOSTUN RF SAND*)

A.2. AREIA DE OSÓRIO

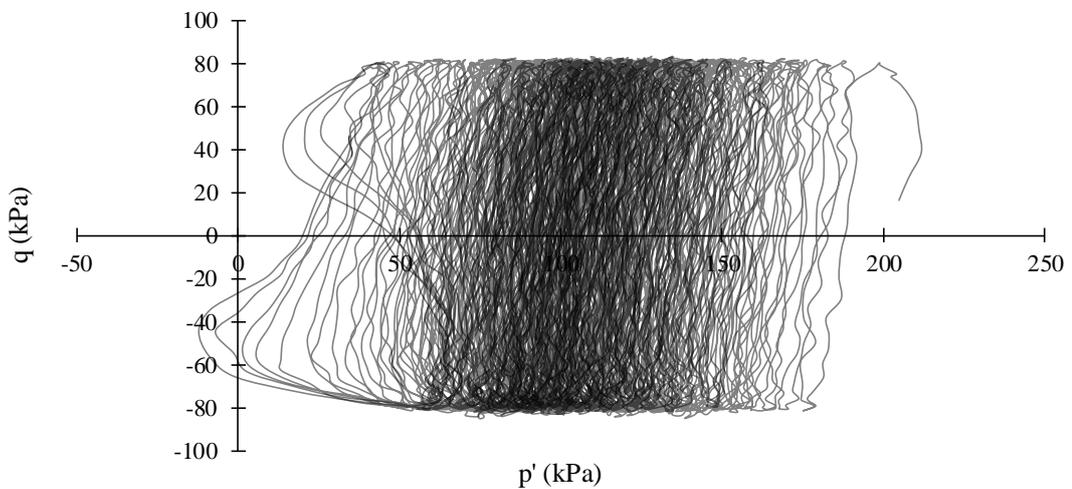
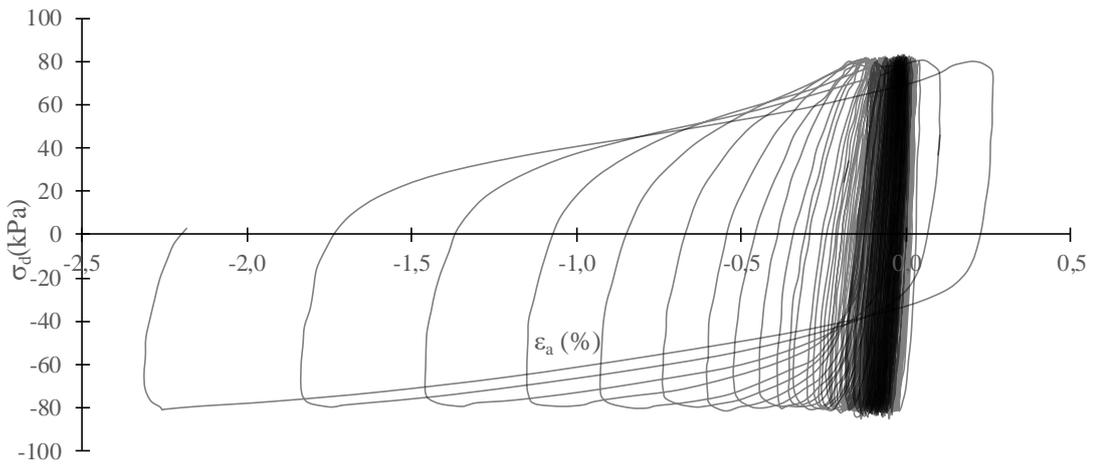
A.1. AREIA HOSTUN RF (HOSTUN RF SAND)

- $Dr = 70\%$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$; $\pm\sigma_{dc} = 80 \text{ kPa}$ (TCRF_50)
- $Dr = 70\%$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$; $\pm\sigma_{dc} = 88 \text{ kPa}$ (TCRF_51)
- $Dr = 70\%$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$; $\pm\sigma_{dc} = 105 \text{ kPa}$ (TCRF_52)
- $Dr = 70\%$; $p'_0 = 200 \text{ kPa}$; $\pm\sigma_{dc} = 122 \text{ kPa}$ (TCRF_53)

| | |
|---|------------|
| Densidade relativa | 70 % |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 11/10/2016 |
| Código ensaio | TCRF_50 |

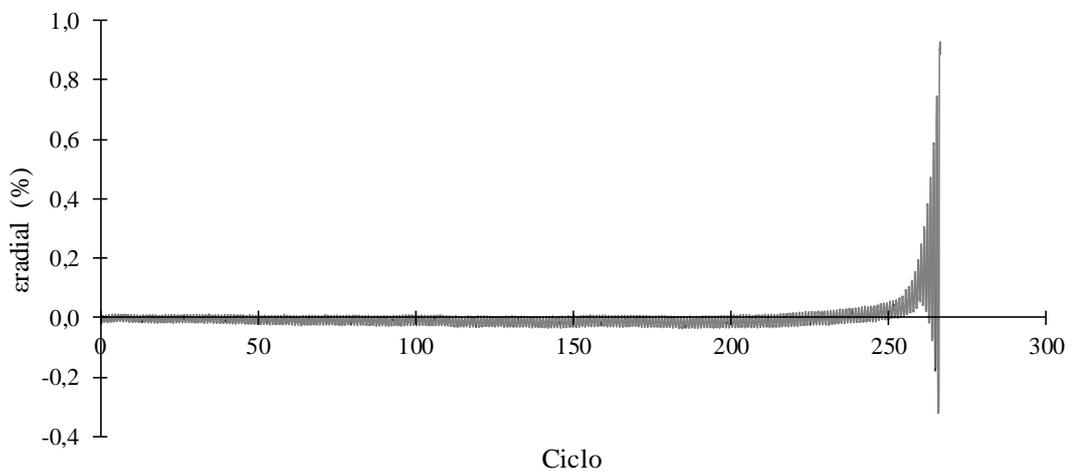
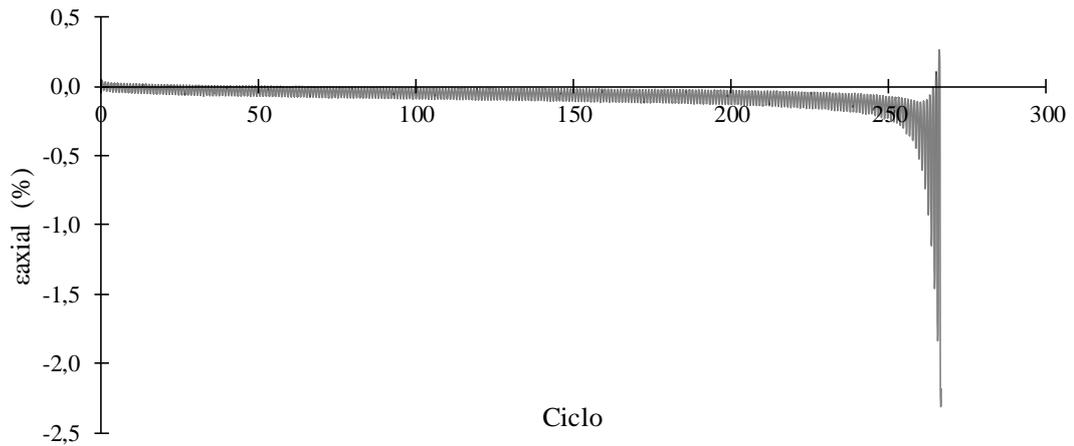
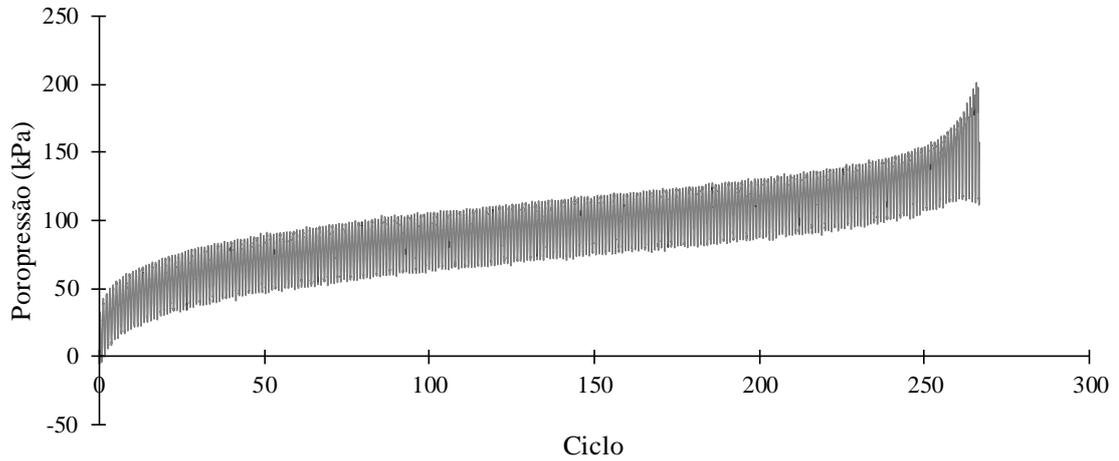
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 8,993 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2340 g | Nf | 266 ciclos |
| Variação teor de umidade | -0,31 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,507 g/cm ³ | | |



| | |
|---|------------|
| Densidade relativa | 70 % |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 11/10/2016 |
| Código ensaio | TCRF_50 |

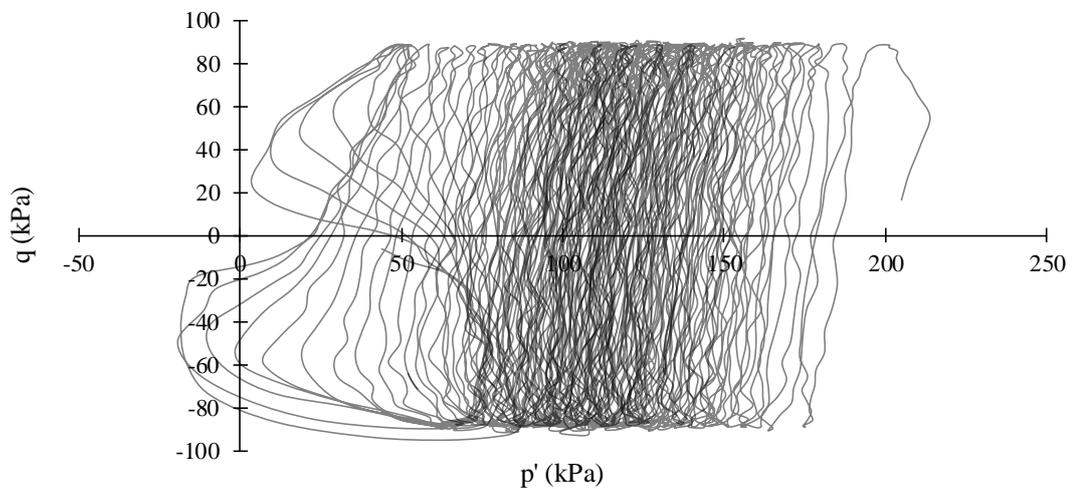
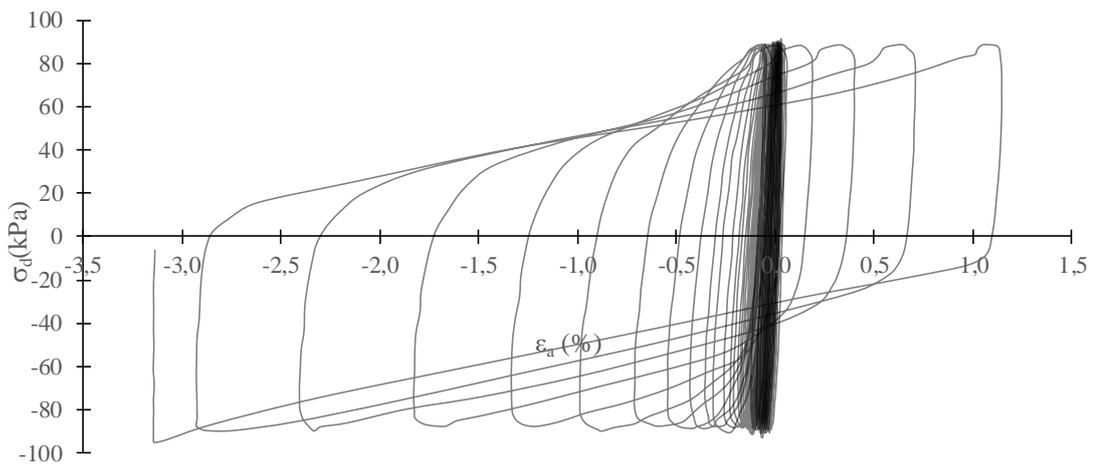
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---------------------------------|-----------|
| Densidade relativa | 70 % |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 88 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 8/10/2016 |
| Código ensaio | TCRF_51 |

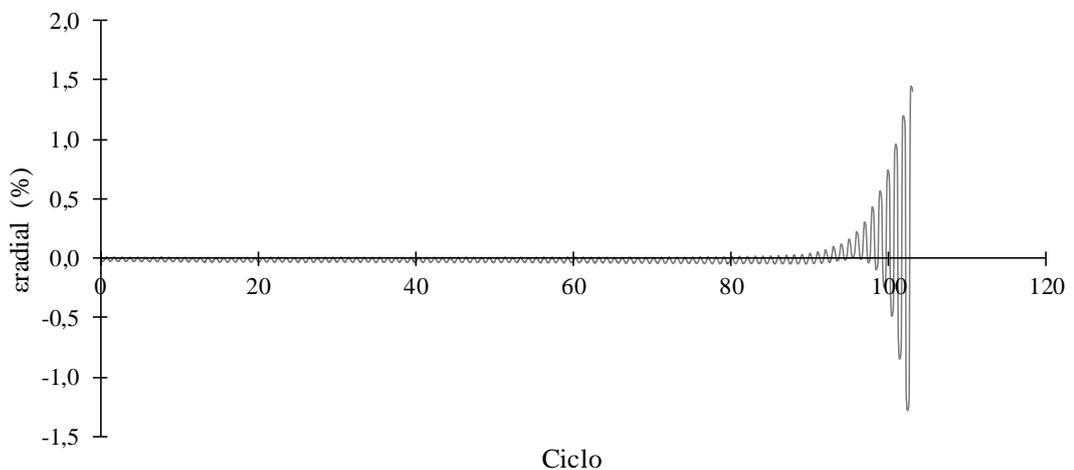
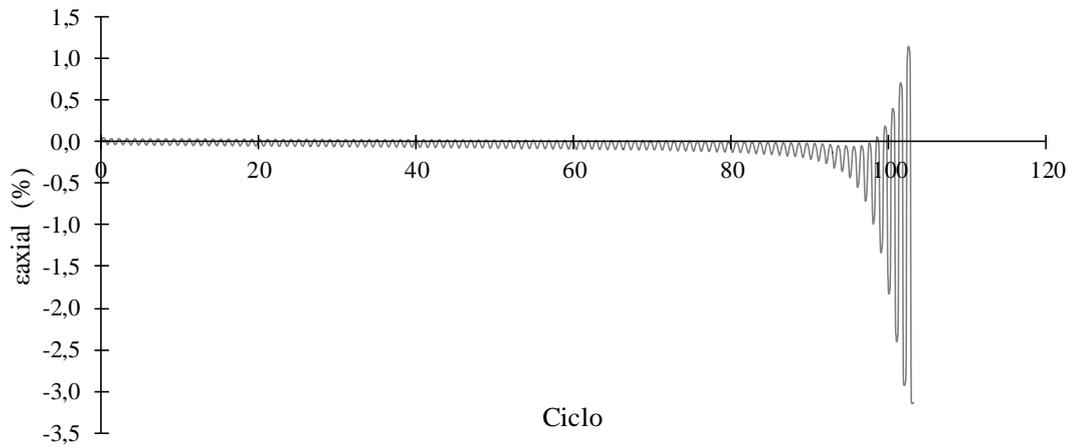
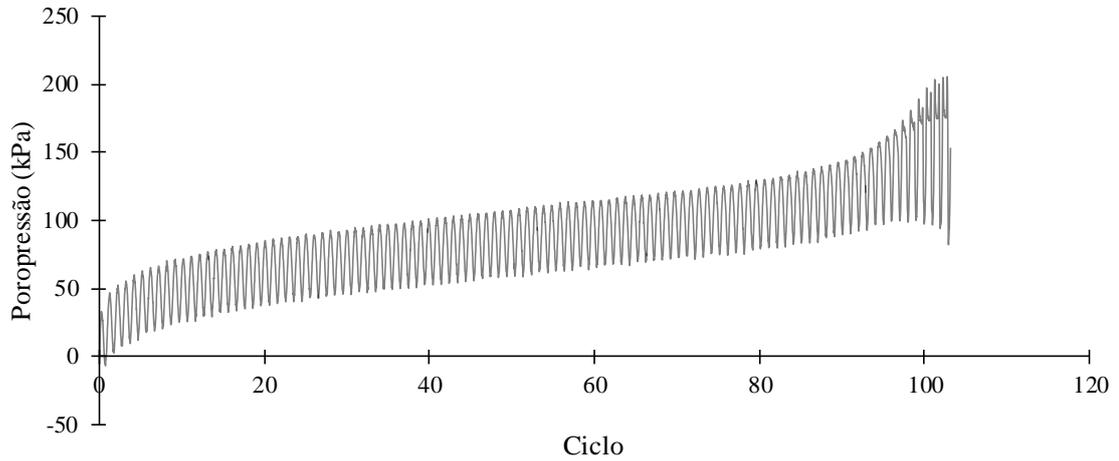
| | |
|--------|-----|
| Página | 1/2 |
|--------|-----|

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δ volume após consolidação | 8,951 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2330 g | Nf | 102 ciclos |
| Variação teor de umidade | -0,26 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γ seco obtido | 1,500 g/cm ³ | | |



| | |
|---|-----------|
| Densidade relativa | 70 % |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 88 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 8/10/2016 |
| Código ensaio | TCRF_51 |

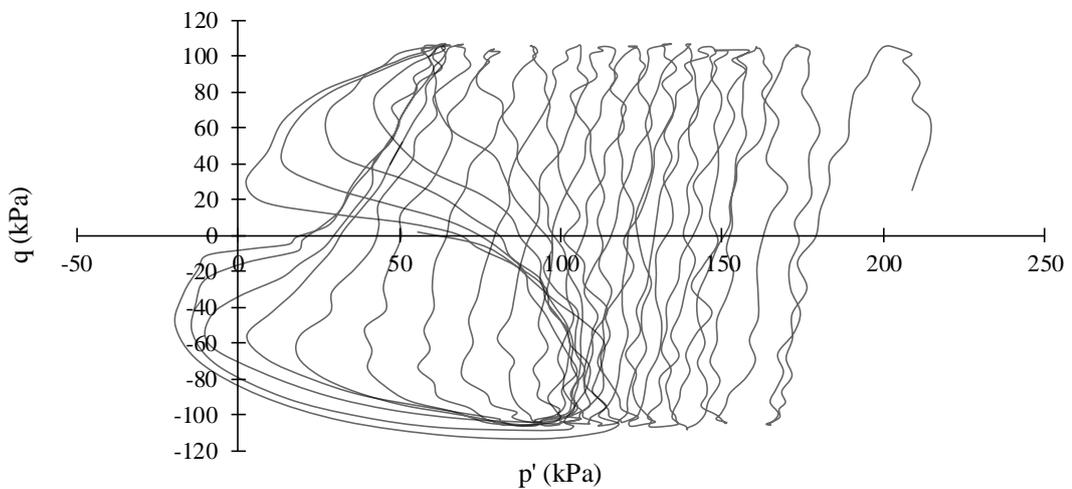
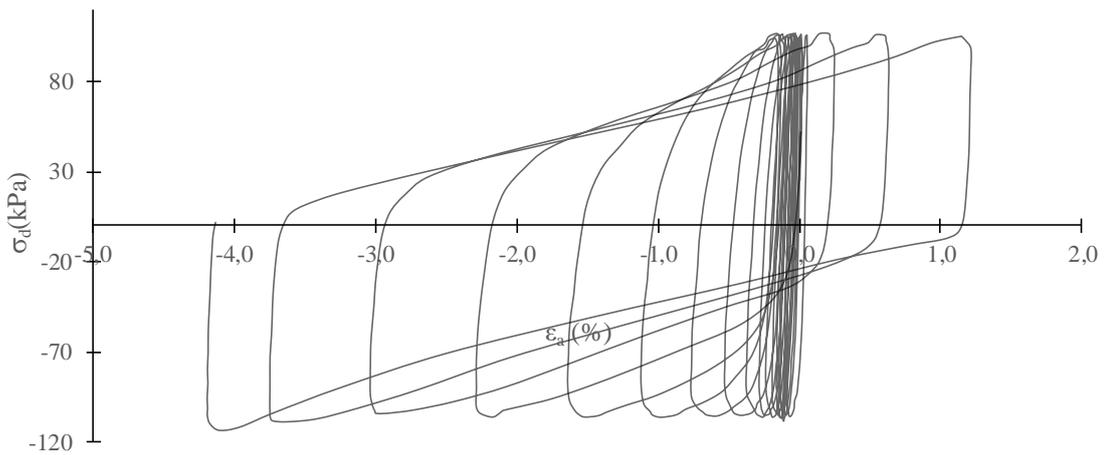
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---------------------------------|-----------|
| Densidade relativa | 70 % |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 105 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 9/10/2016 |
| Código ensaio | TCRF_52 |

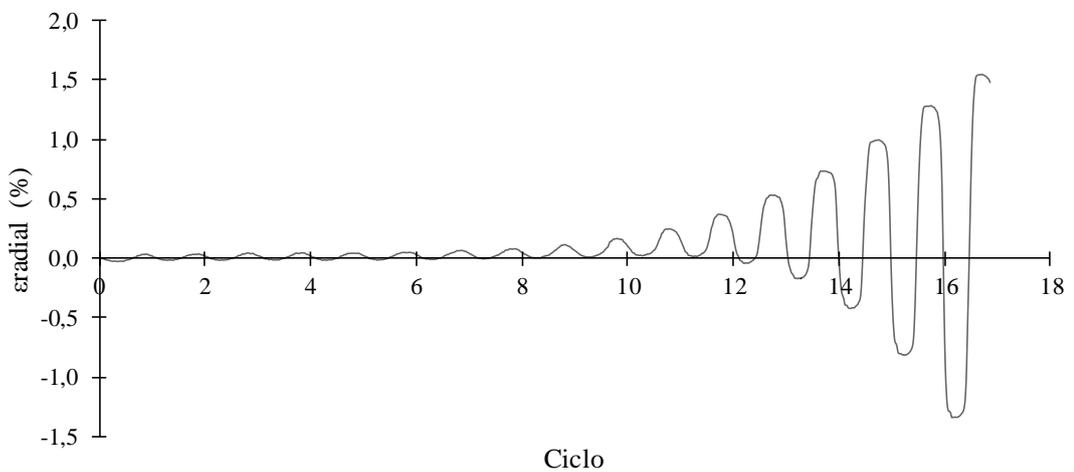
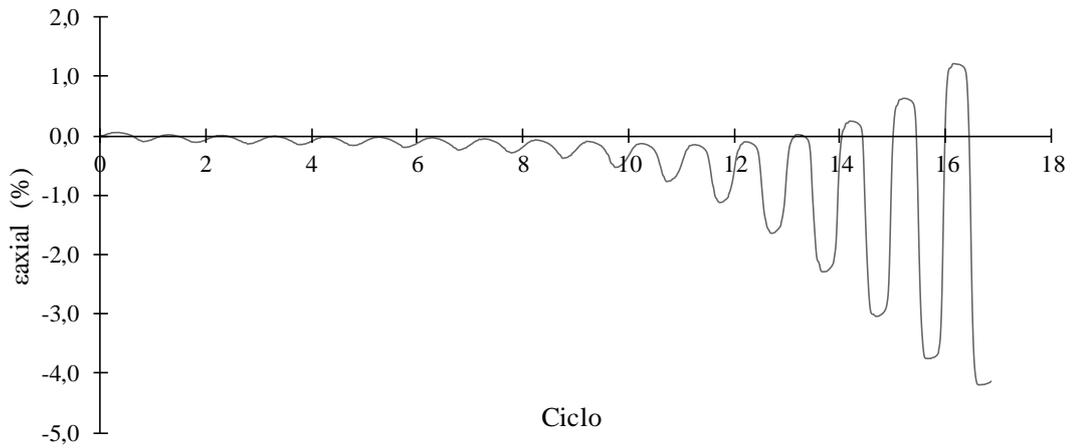
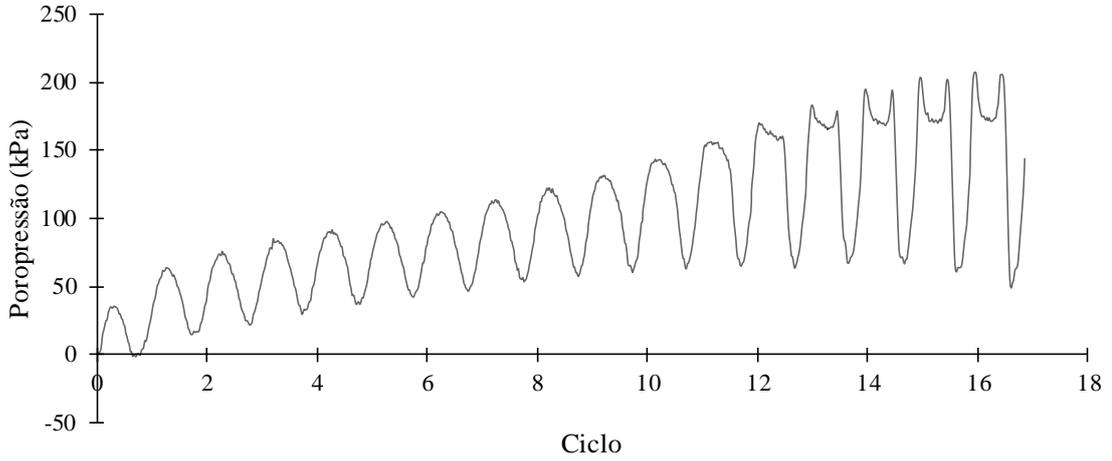
| | |
|--------|-----|
| Página | 1/2 |
|--------|-----|

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δ volume após consolidação | 9,296 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2340 g | Nf | 14 ciclos |
| Variação teor de umidade | -0,26 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γ seco obtido | 1,506 g/cm ³ | | |



| | |
|---|-----------|
| Densidade relativa | 70 % |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 105 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 9/10/2016 |
| Código ensaio | TCRF_52 |

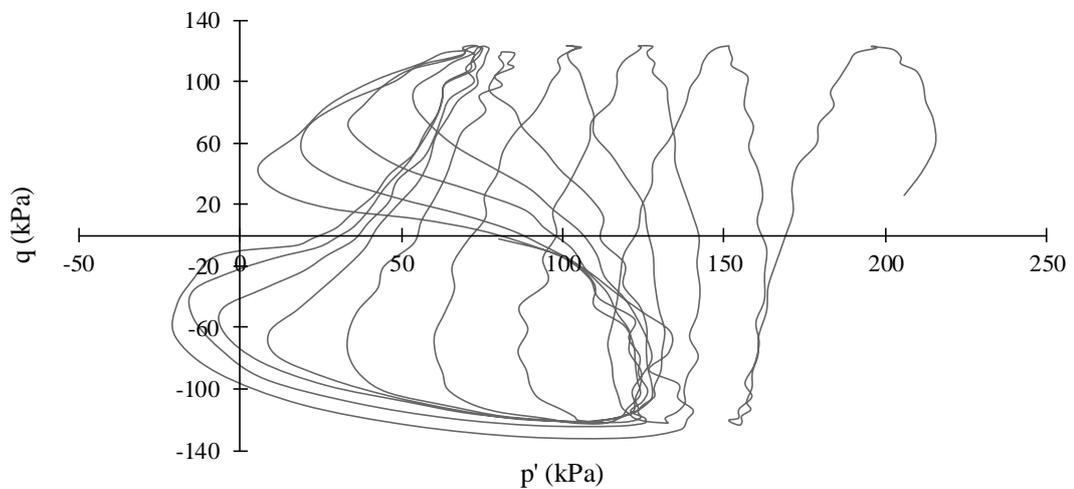
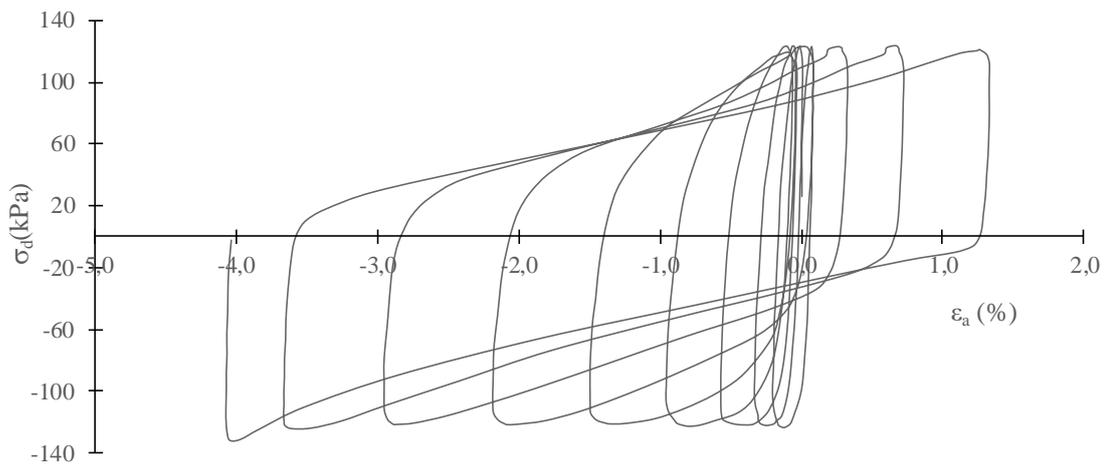
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|------------|
| Densidade relativa | 70 % |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 122 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 10/10/2016 |
| Código ensaio | TCRF_53 |

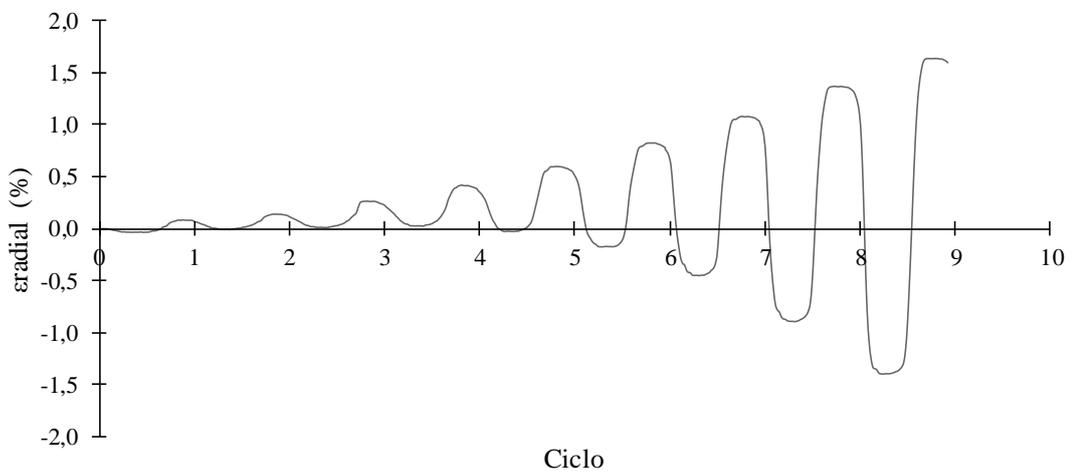
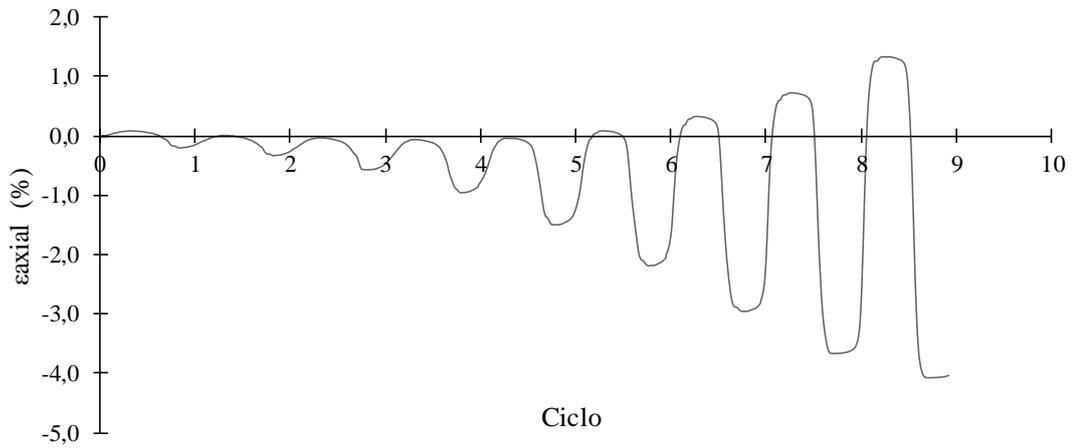
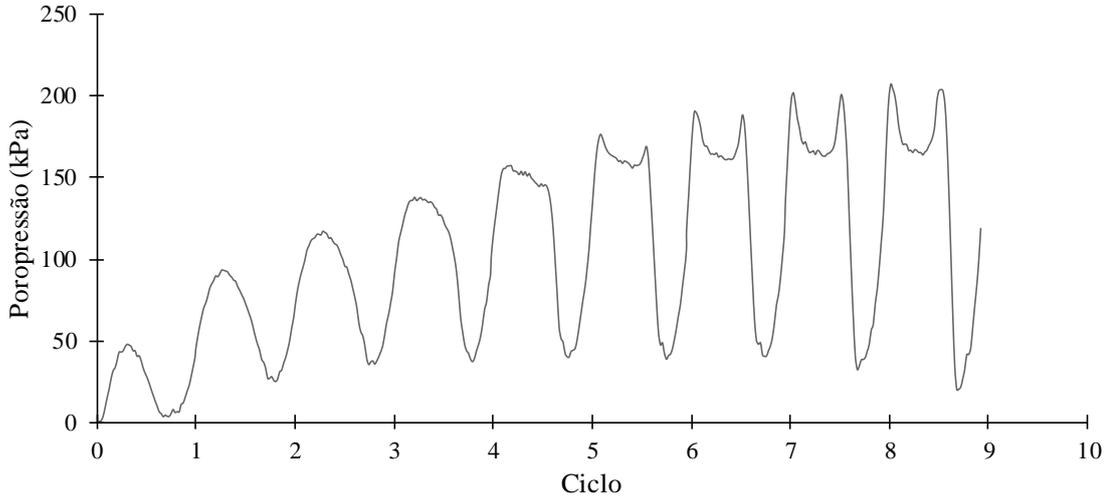
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 8,909 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2340 g | Nf | 7 ciclos |
| Variação teor de umidade | -0,22 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,505 g/cm ³ | | |



| | |
|---|------------|
| Densidade relativa | 70 % |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 122 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 10/10/2016 |
| Código ensaio | TCRF_53 |

| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



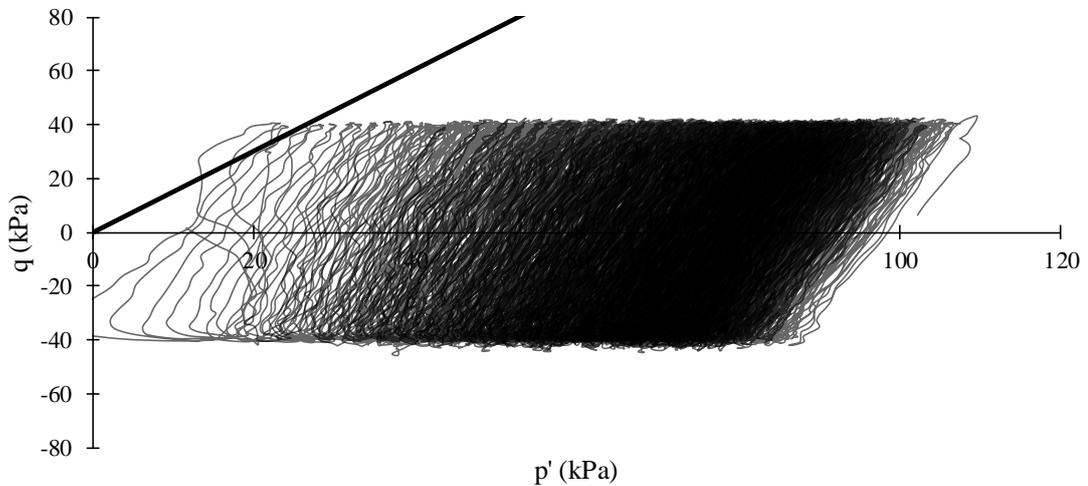
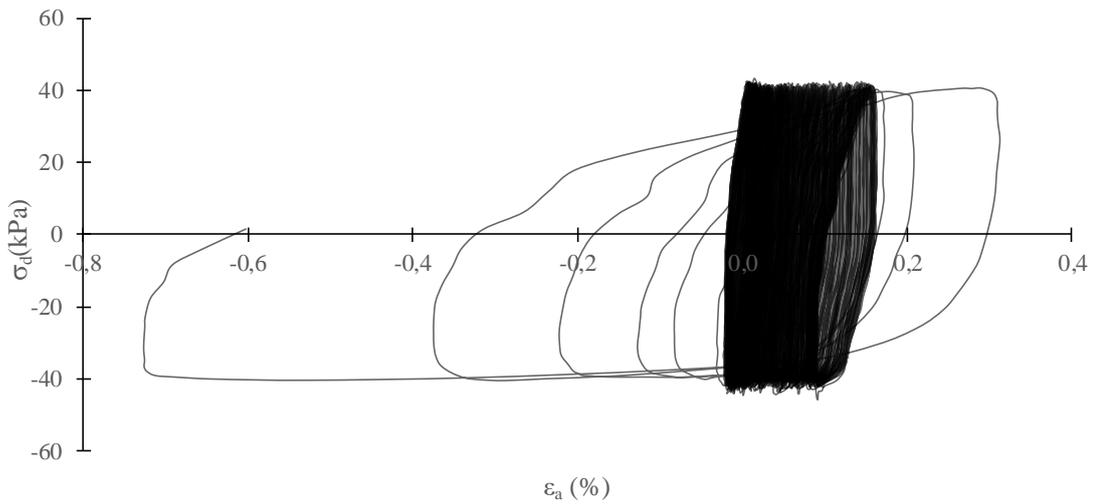
A.2. AREIA DE OSÓRIO

- $e = 0,63$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 40$ kPa (A_90_100_40)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 60$ kPa (A_90_100_60)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 60$ kPa (A_90_100_60R2)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 60$ kPa (A_90_100_60R3)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 60$ kPa (A_90_100_60R4)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 80$ kPa (A_90_100_80)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 80$ kPa (A_90_100_80R2)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 80$ kPa (A_90_100_80R3)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 100$ kPa (A_90_100_100)
- $e = 0,63$ (+0,5% fibras) ; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 40$ kPa (AF_90_100_40)
- $e = 0,63$ (+0,5% fibras) ; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 60$ kPa (AF_90_100_60)
- $e = 0,63$ (+0,5% fibras) ; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 80$ kPa (AF_90_100_80)
- $e = 0,63$ (+0,5% fibras) ; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 100$ kPa (AF_90_100_100)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 200$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 80$ kPa (A_90_200_80)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 200$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 120$ kPa (A_90_200_120)
- $e = 0,63$; $p'_0 = 200$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 160$ kPa (A_90_200_160)
- $e = 0,63$ (+0,5% fibras) ; $p'_0 = 200$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 80$ kPa (AF_90_200_80)
- $e = 0,63$ (+0,5% fibras) ; $p'_0 = 200$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 120$ kPa (AF_90_200_120)
- $e = 0,63$ (+0,5% fibras) ; $p'_0 = 200$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 160$ kPa (AF_90_200_160)
- $e = 0,75$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 20$ kPa (A_50_100_20)
- $e = 0,75$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 40$ kPa (A_50_100_40)
- $e = 0,75$; $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 60$ kPa (A_50_100_60)
- $e = 0,75$ (+0,5% fibras); $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 20$ kPa (AF_50_100_20)
- $e = 0,75$ (+0,5% fibras); $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 40$ kPa (AF_50_100_40)
- $e = 0,75$ (+0,5% fibras); $p'_0 = 100$ kPa; $\pm\sigma_{dc} = 60$ kPa (AF_50_100_60)

| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 40 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 29/12/2015 |
| Código ensaio | A_90_100_40 |

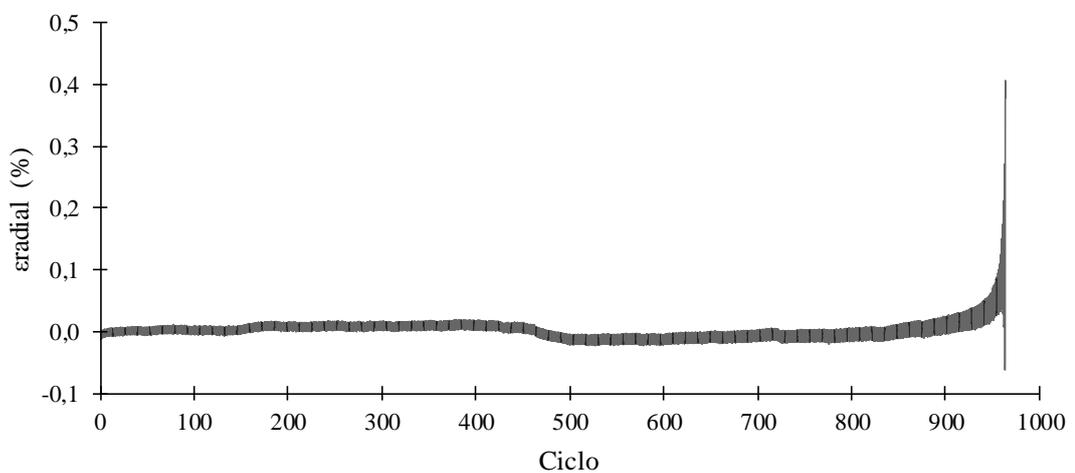
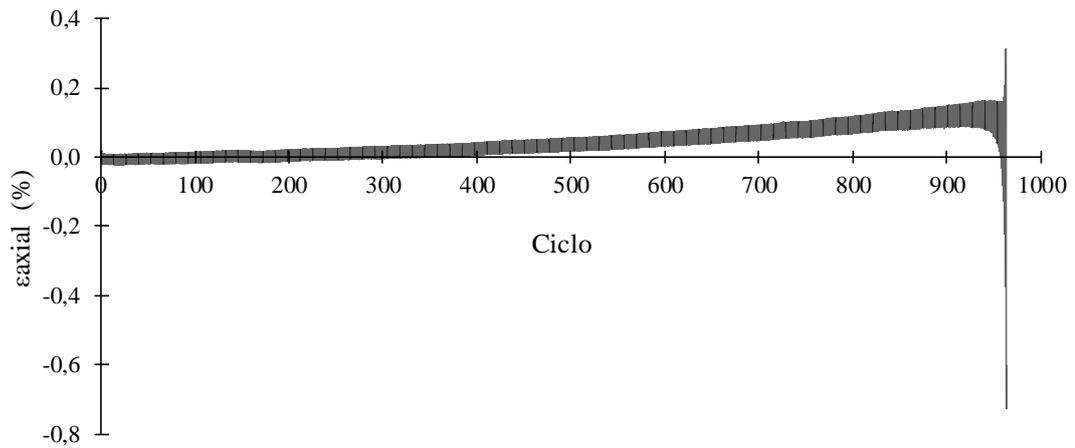
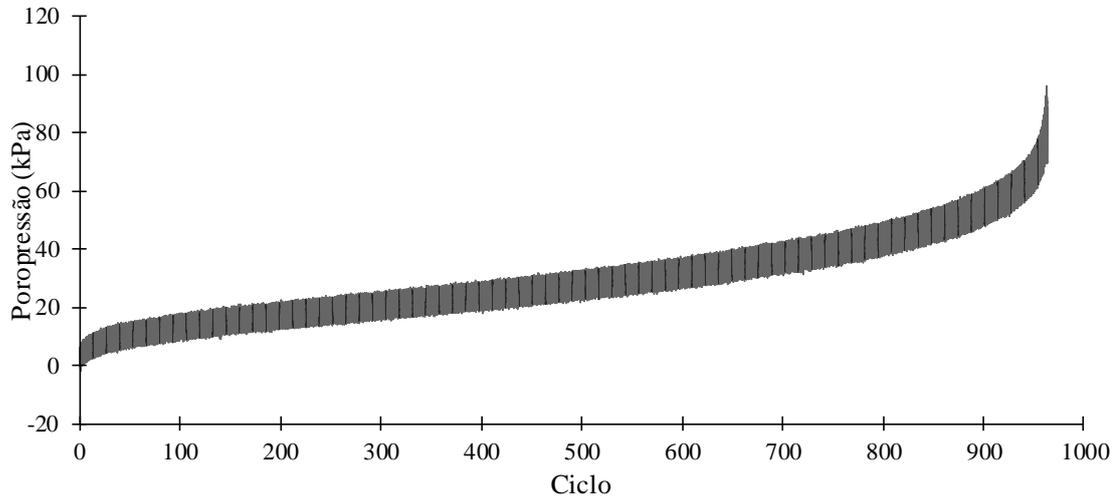
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 3,689 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2600 g | Nf | 962 ciclos |
| Variação teor de umidade | -0,19 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,596 g/cm ³ | | |



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 40 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 29/12/2015 |
| Código ensaio | A_90_100_40 |

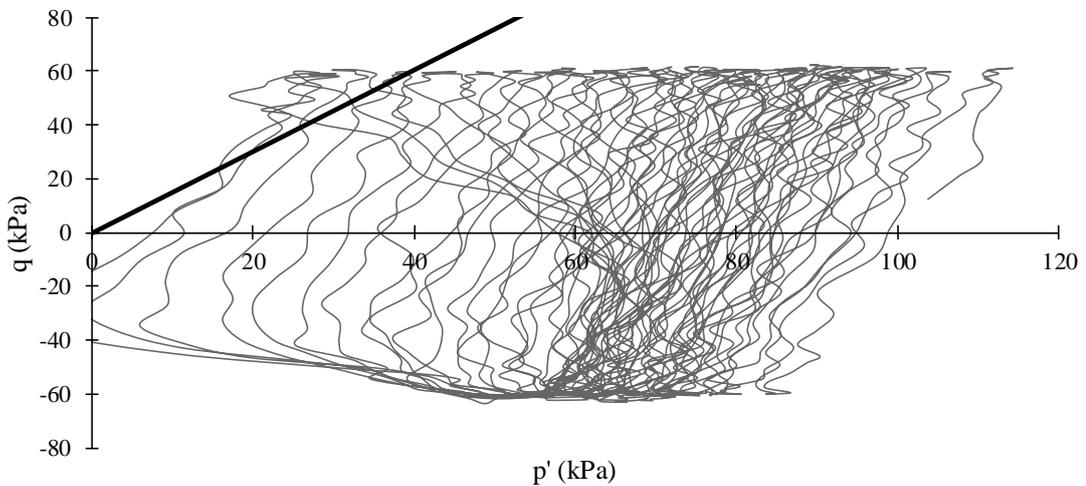
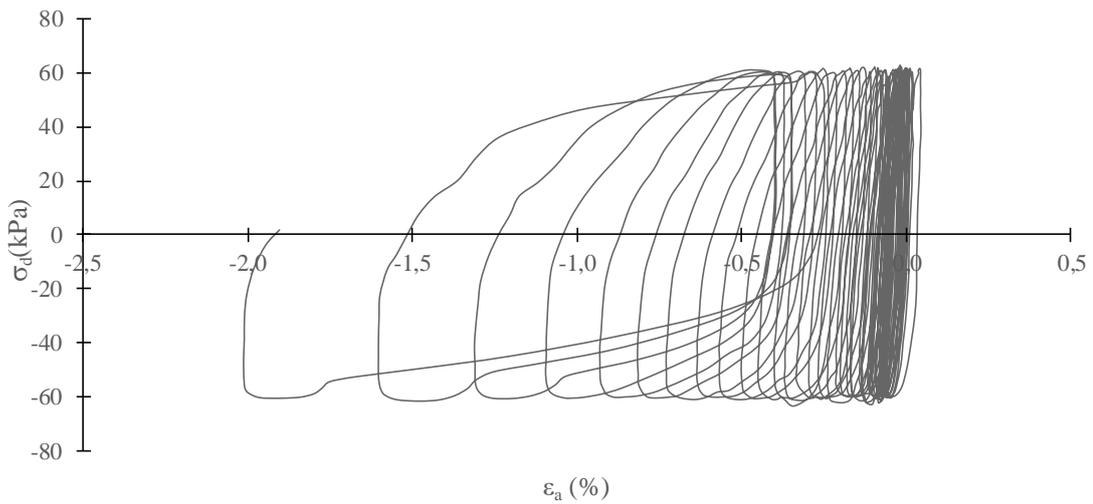
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|----------------------------------|-------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (±) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 14/12/2015 |
| Código ensaio | A_90_100_60 |

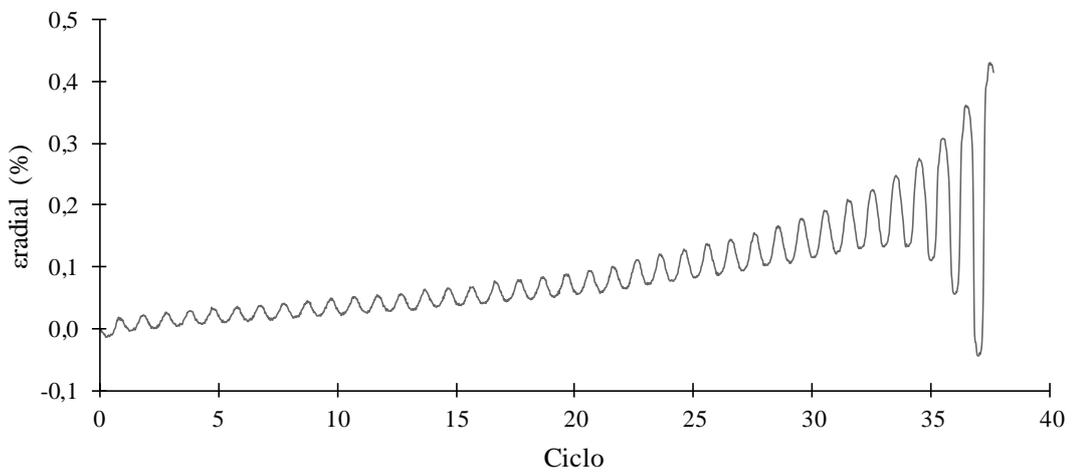
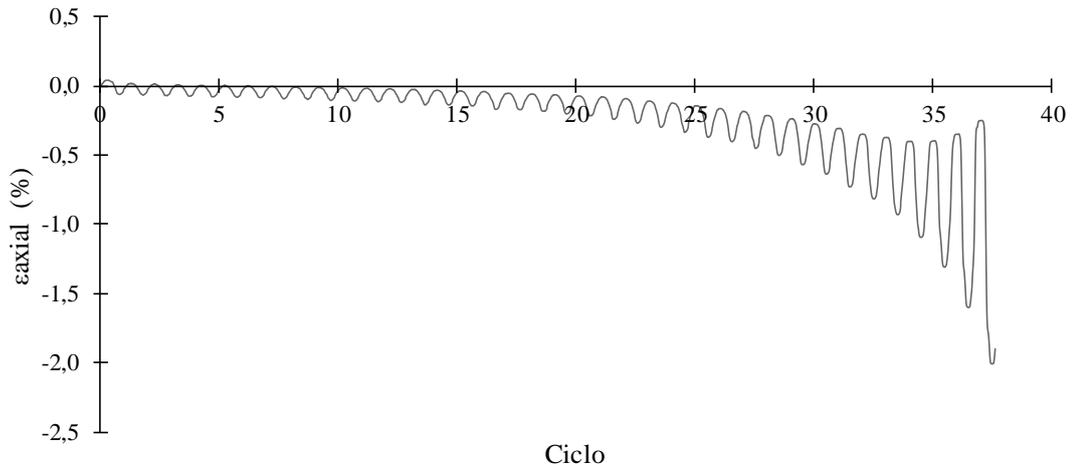
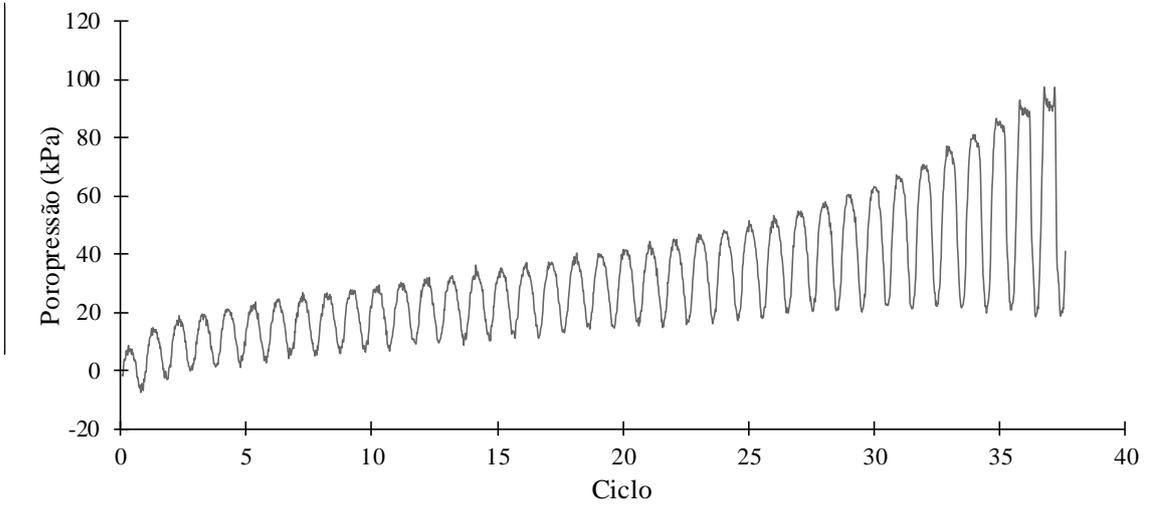
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 4,152 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2610 g | Nf | 40 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,72% | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,589 g/cm ³ | | |



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 14/12/2015 |
| Código ensaio | A_90_100_60 |

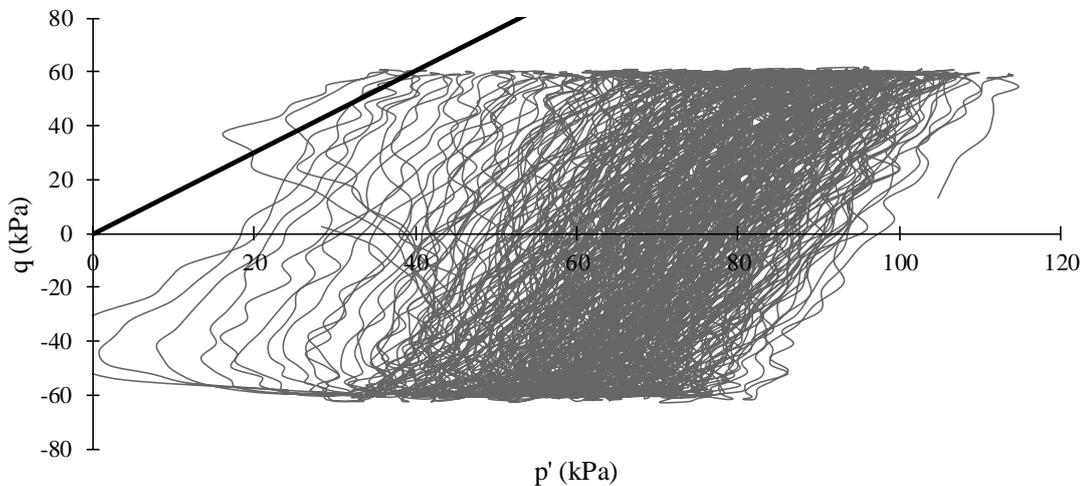
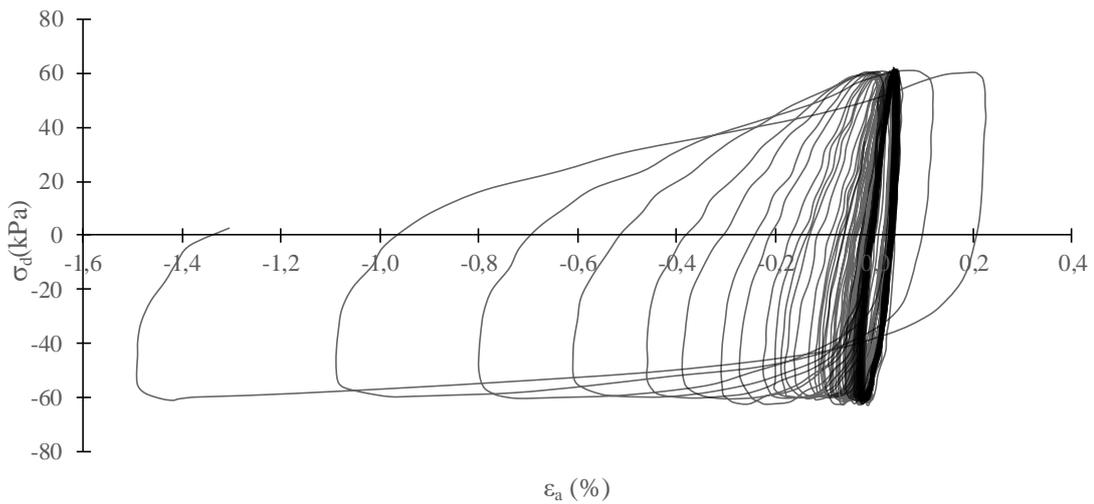
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 25/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_60R2 |

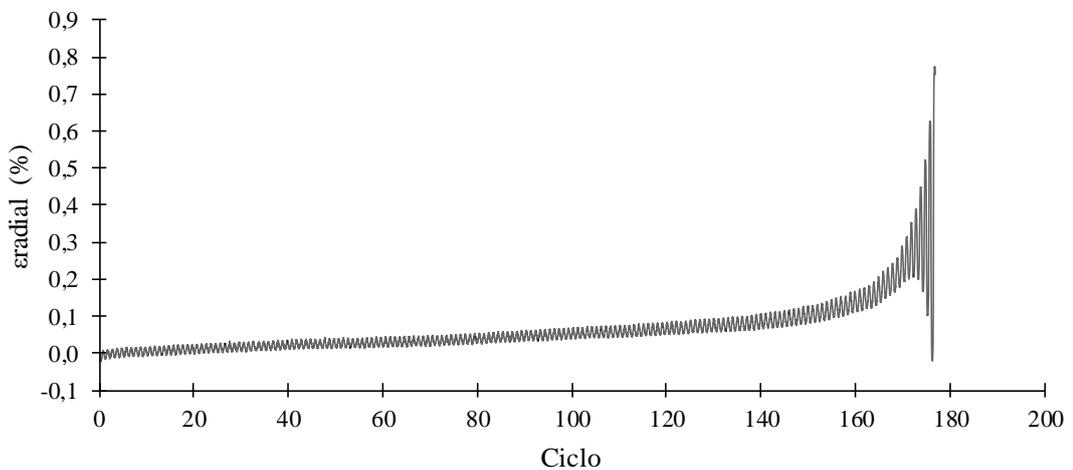
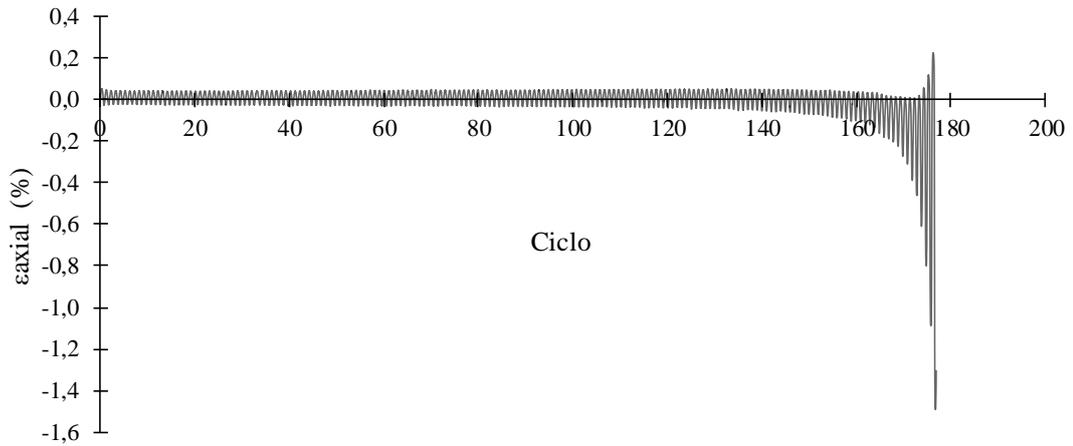
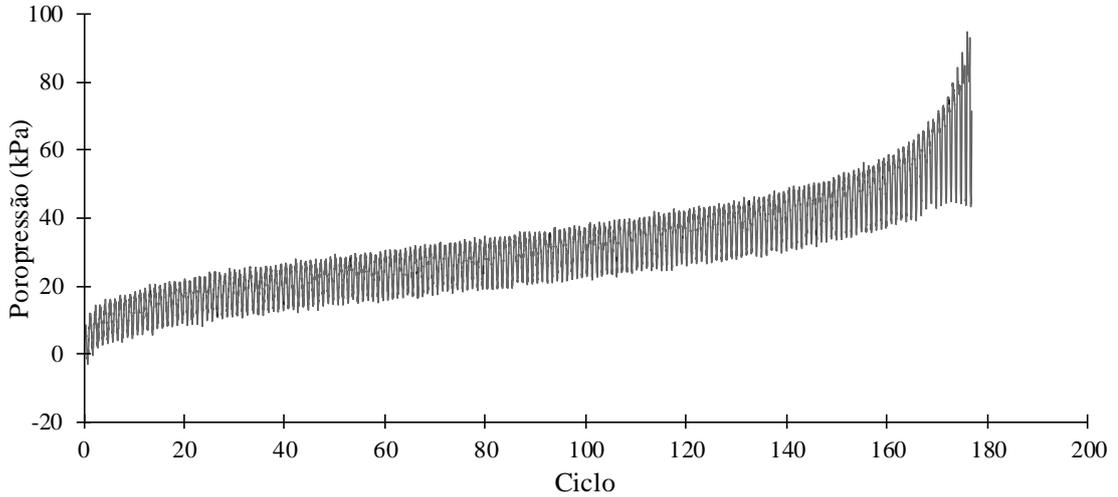
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 2,870 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2620 g | Nf | 177 ciclos |
| Varição teor de umidade | -0,16 % | | |
| Varição diâmetro | 0 mm | | |
| Varição altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,608 g/cm ³ | | |



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 25/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_60R2 |

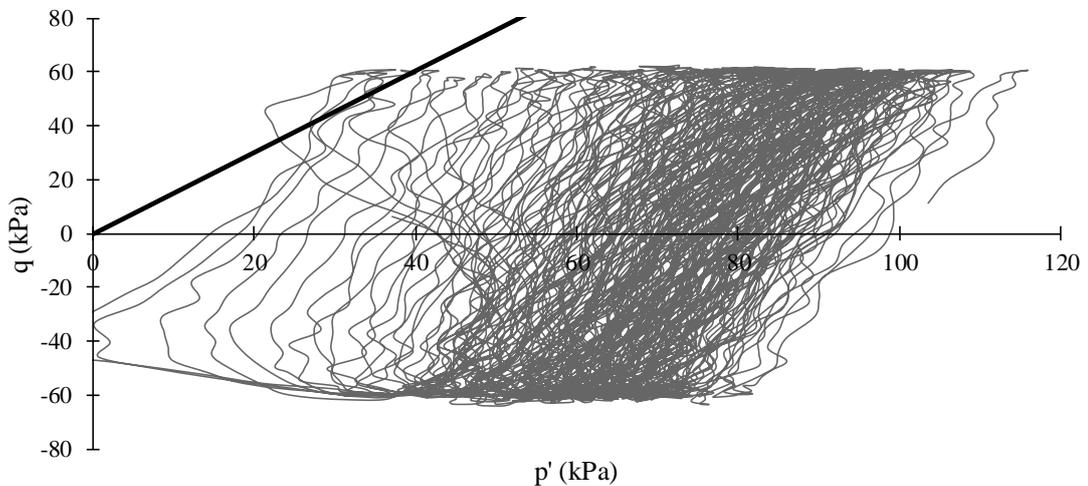
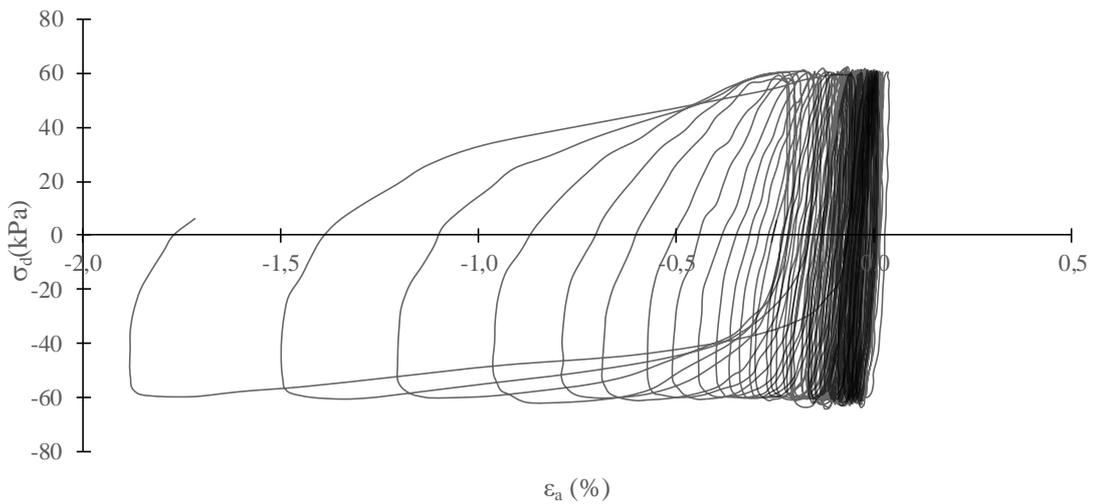
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 26/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_60R3 |

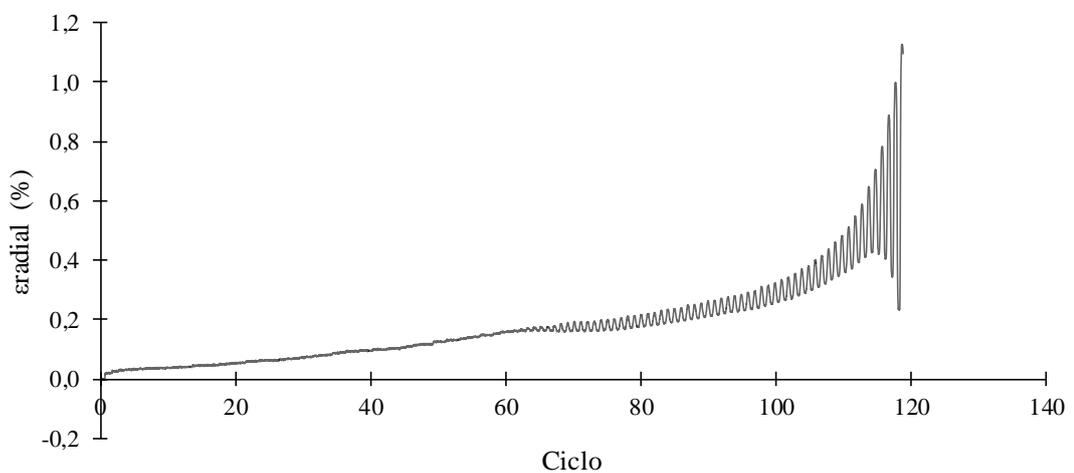
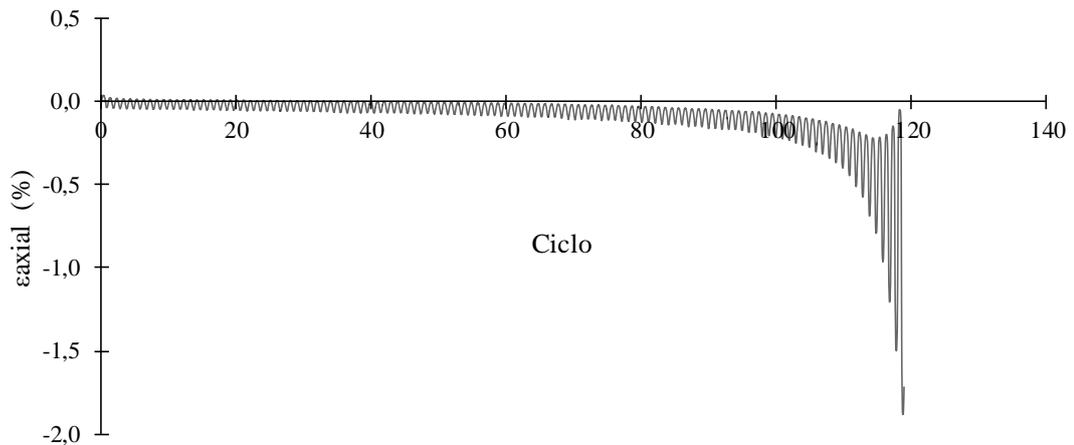
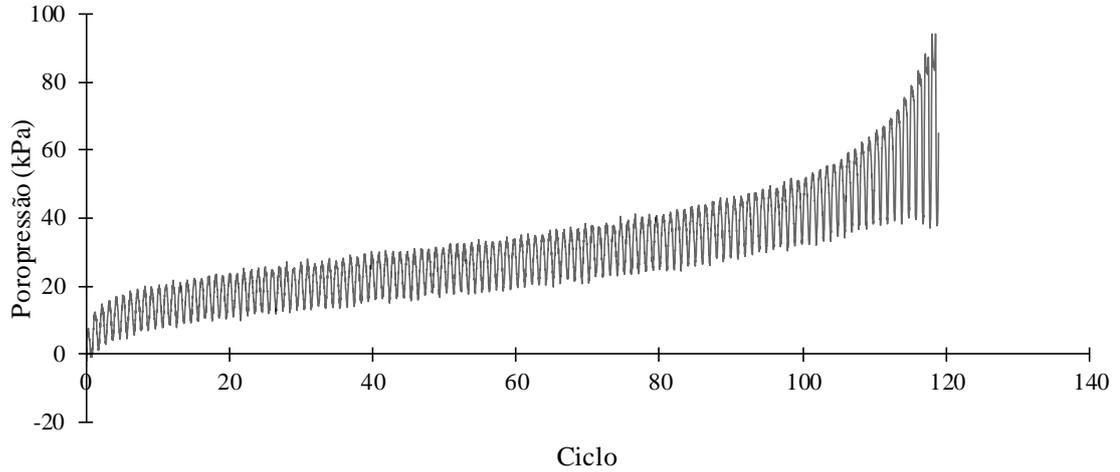
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 2,678 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2600 g | Nf | 120 ciclos |
| Varição teor de umidade | 0,13 % | | |
| Varição diâmetro | 0 mm | | |
| Varição altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,591 g/cm ³ | | |



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 26/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_60R3 |

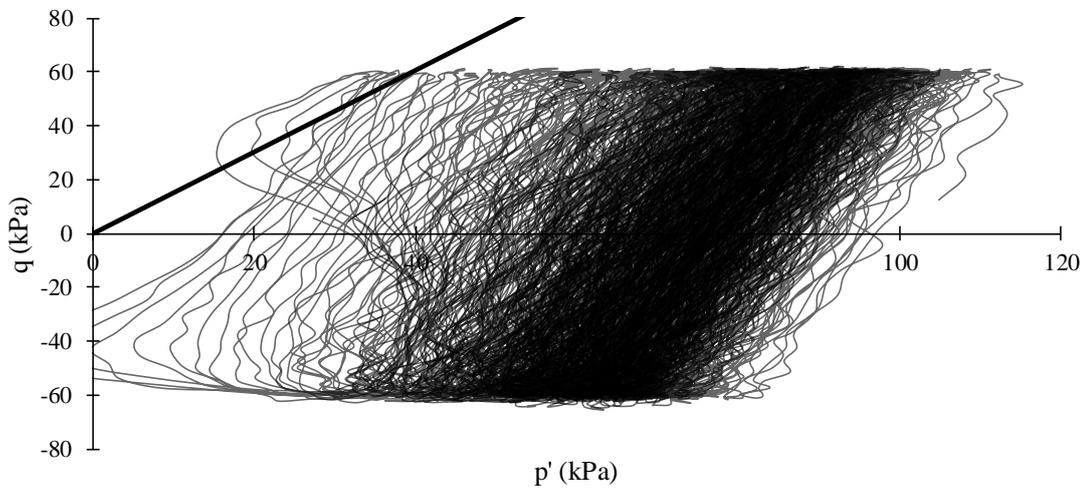
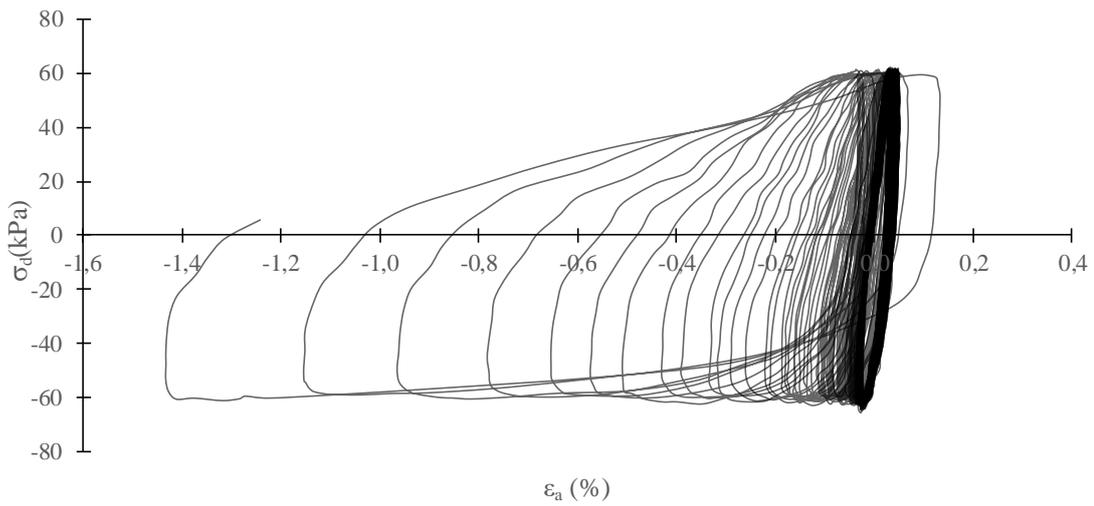
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 27/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_60R4 |

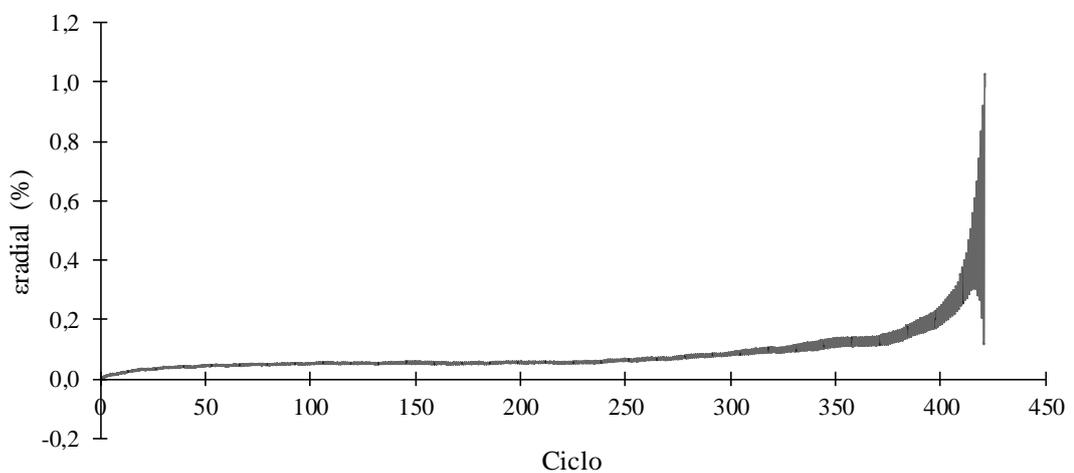
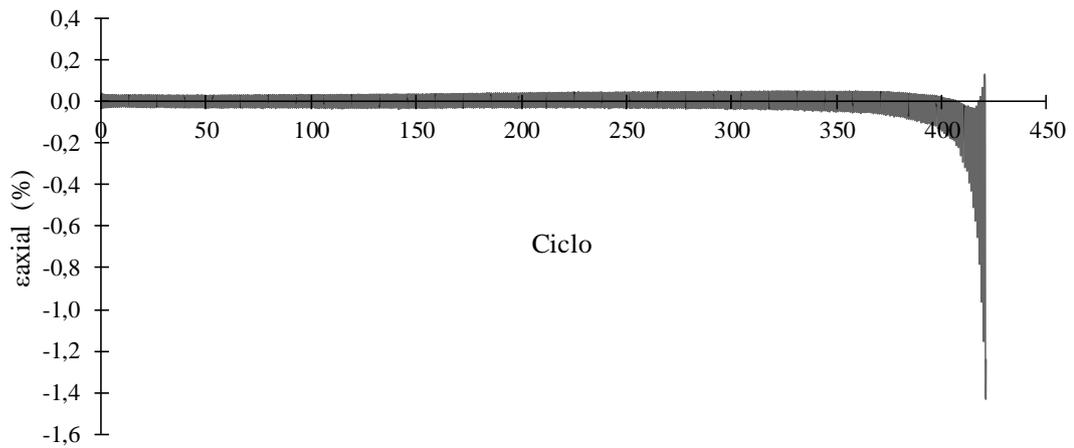
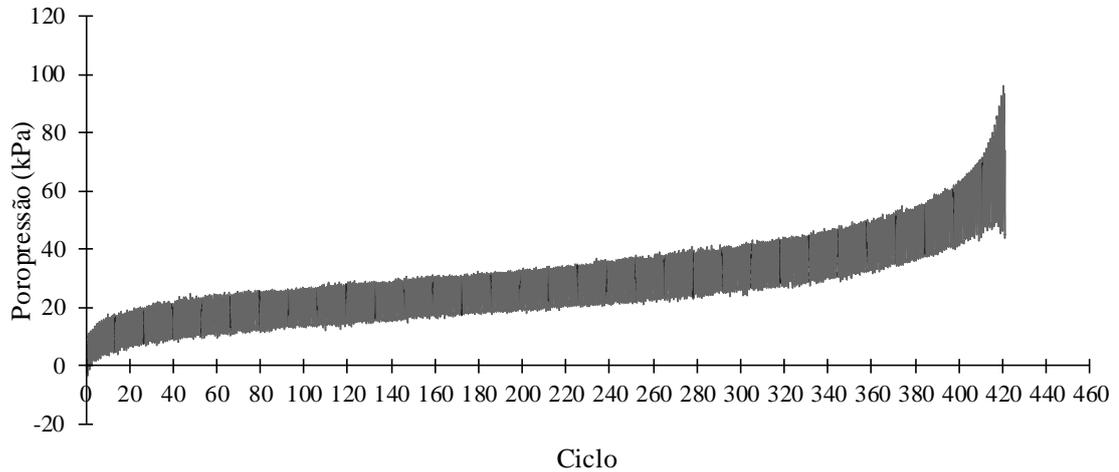
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 2,725 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2620 g | Nf | 422 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,49 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,598 g/cm ³ | | |



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 27/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_60R4 |

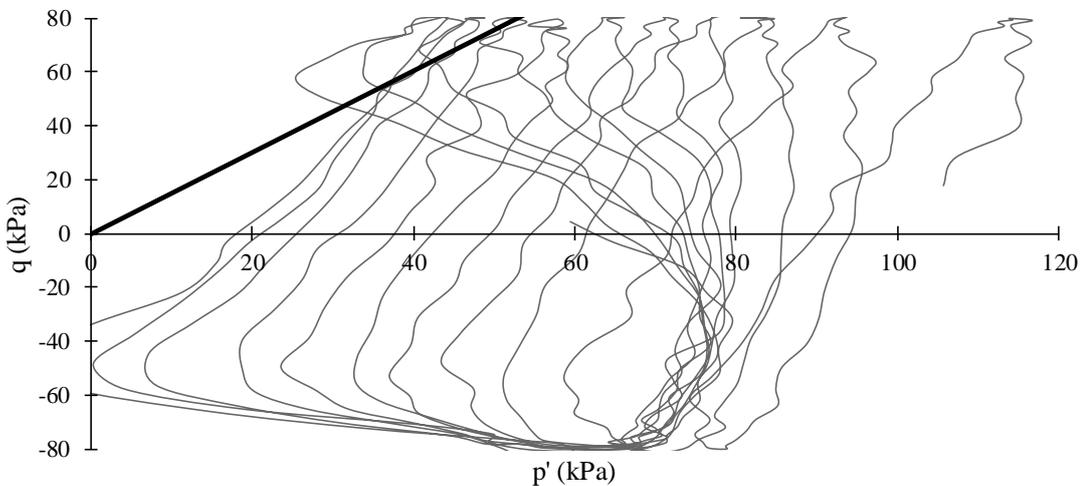
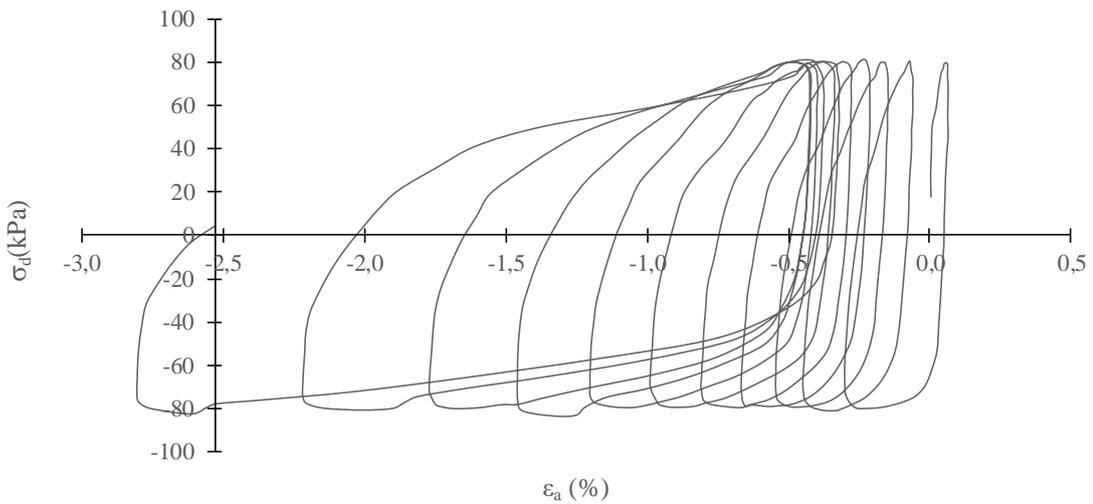
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|----------------------------------|-------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (±) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 21/12/2015 |
| Código ensaio | A_90_100_80 |

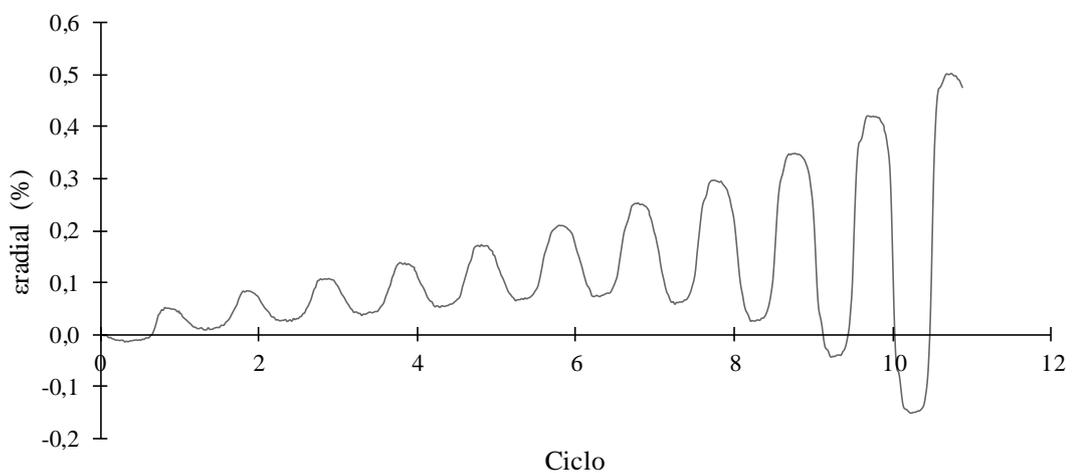
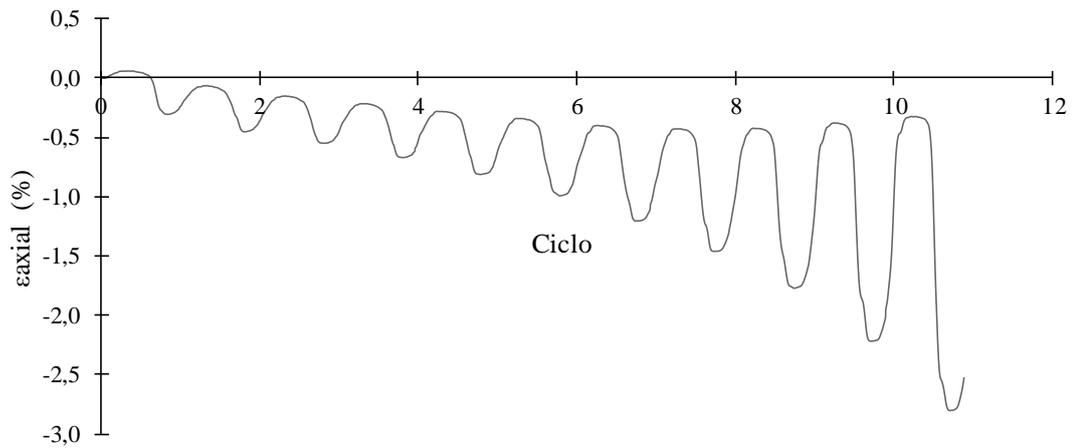
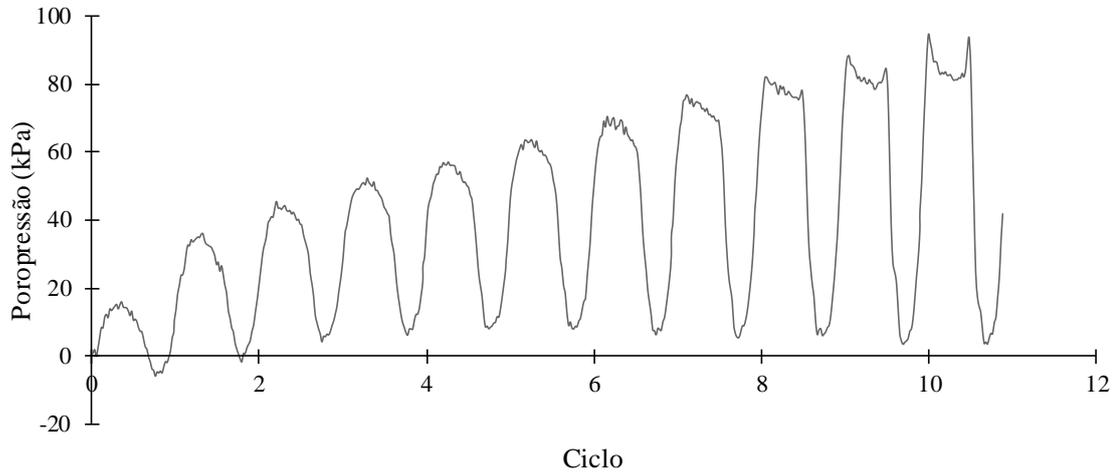
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 3,616 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2620 g | Nf | 11 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,40 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,600 g/cm ³ | | |



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 21/12/2015 |
| Código ensaio | A_90_100_80 |

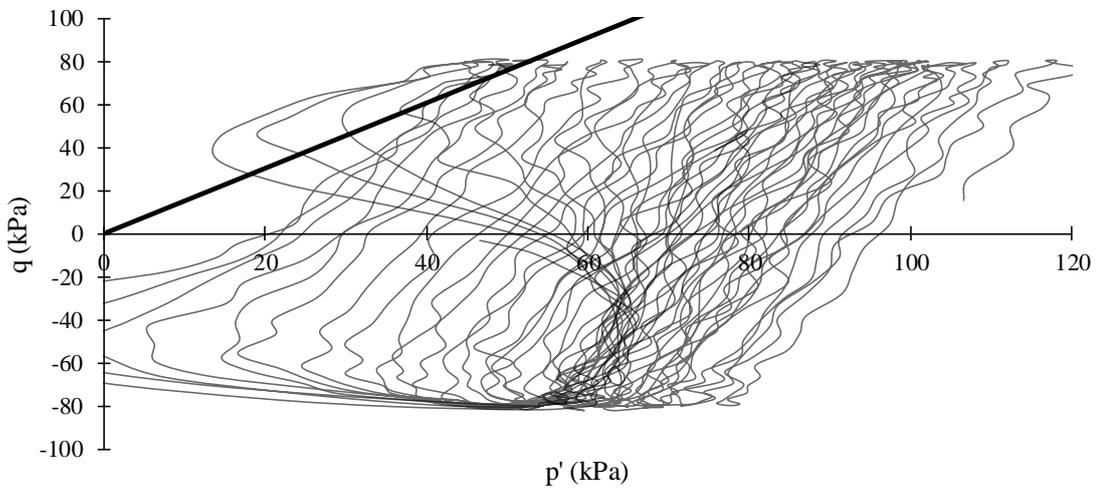
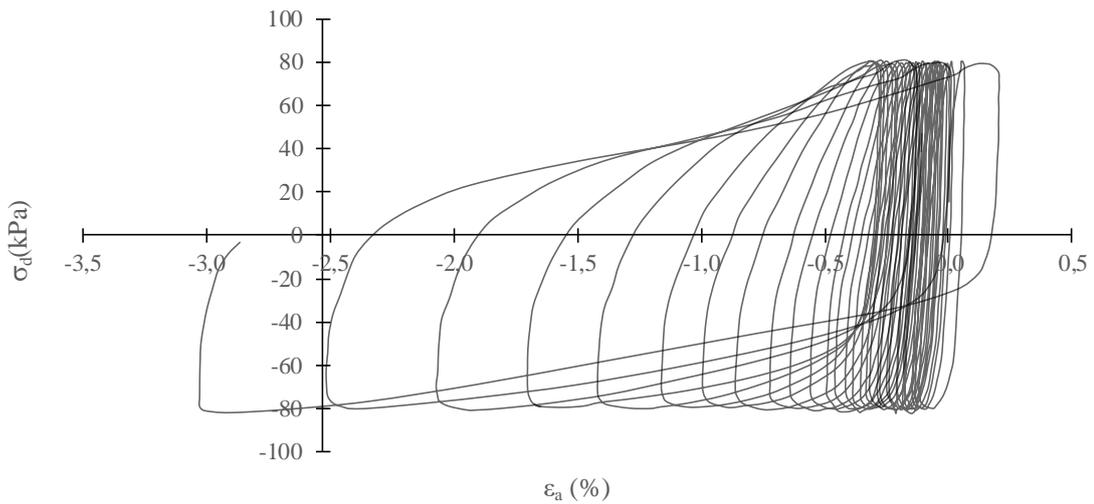
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 29/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_80R2 |

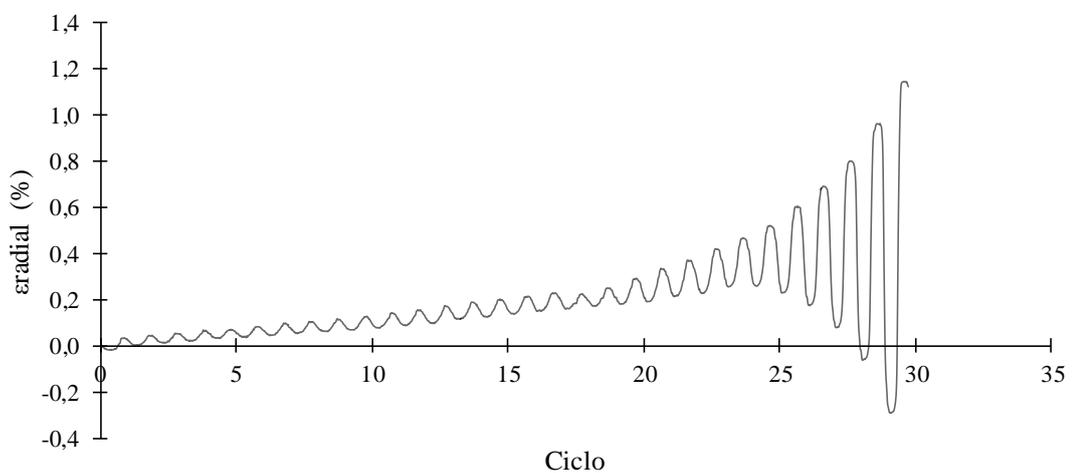
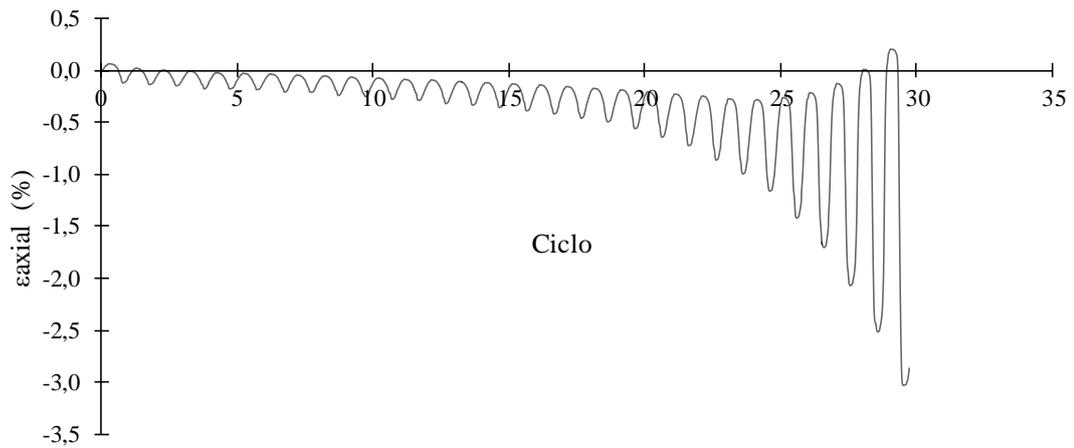
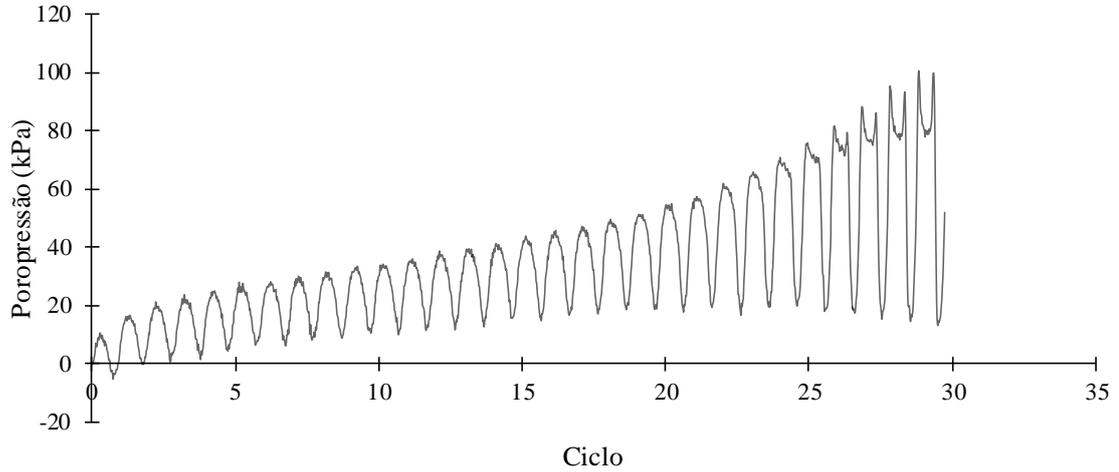
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|---|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolum após consolidação | 2,533 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2620 g | Nf | 29 ciclos |
| Varição teor de umidade | 0,30 % | | |
| Varição diâmetro | 0 mm | | |
| Varição altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,601 g/cm ³ | | |



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 29/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_80R2 |

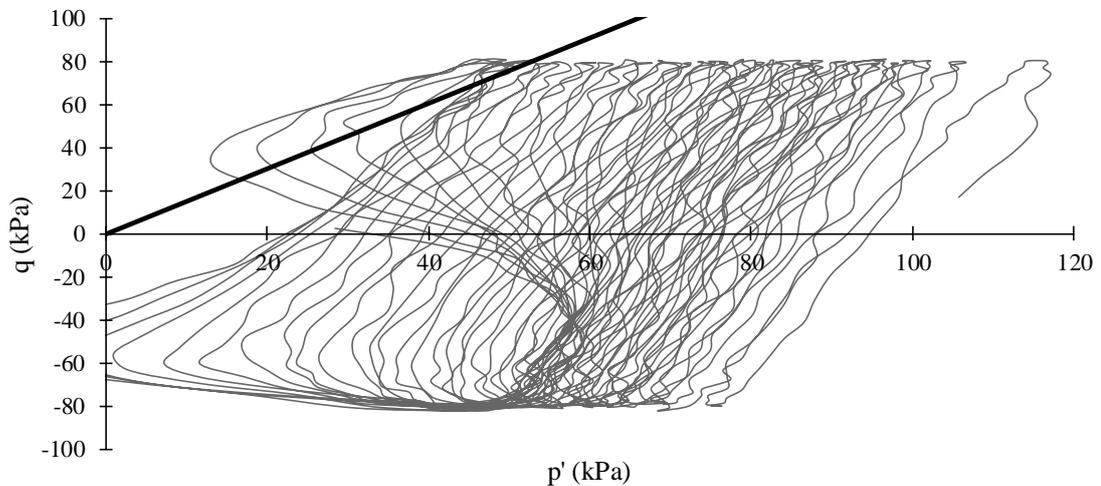
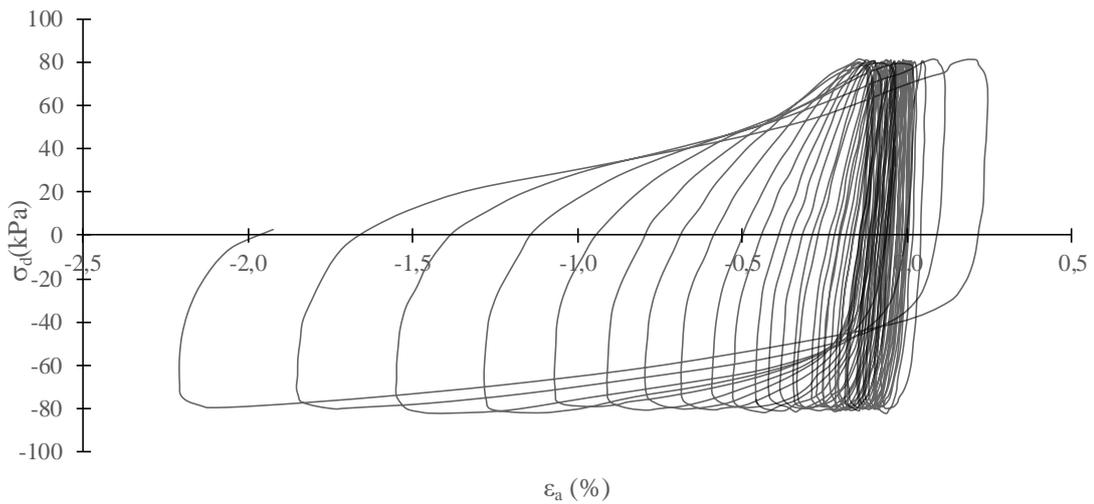
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 31/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_80R3 |

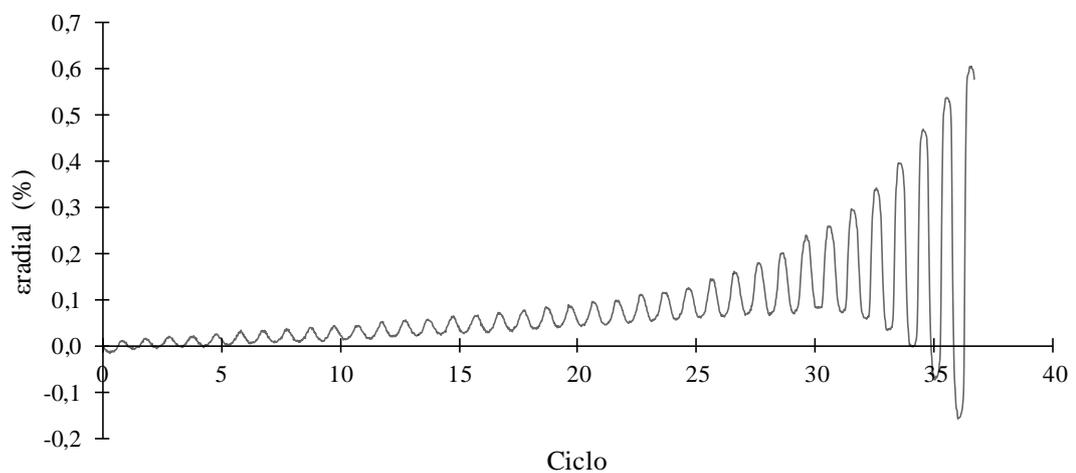
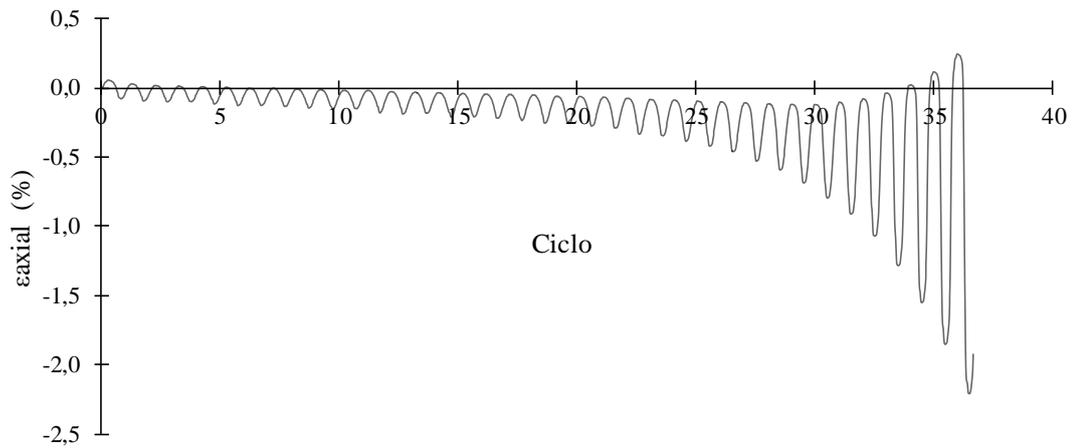
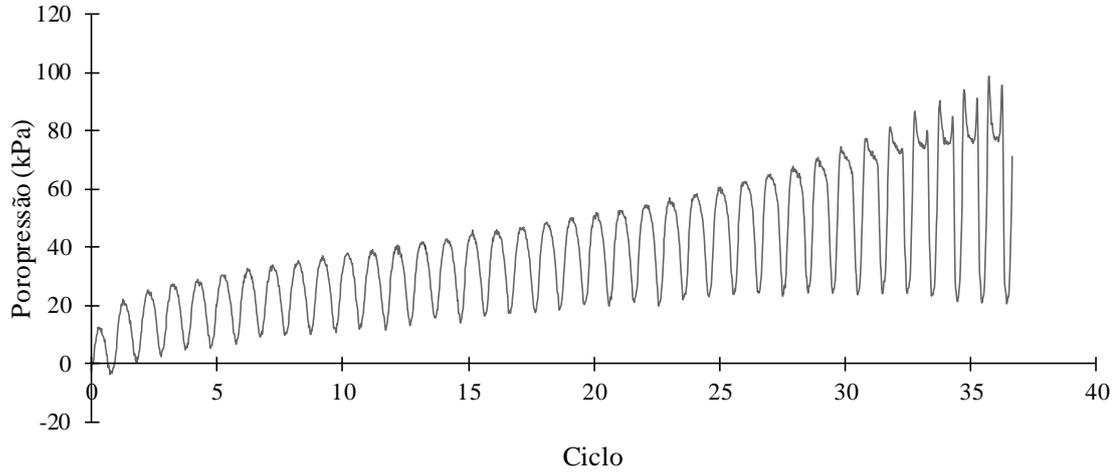
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 2,717 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2620 g | Nf | 36 ciclos |
| Varição teor de umidade | 0,00 % | | |
| Varição diâmetro | 0 mm | | |
| Varição altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,606 g/cm ³ | | |



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 31/10/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_80R3 |

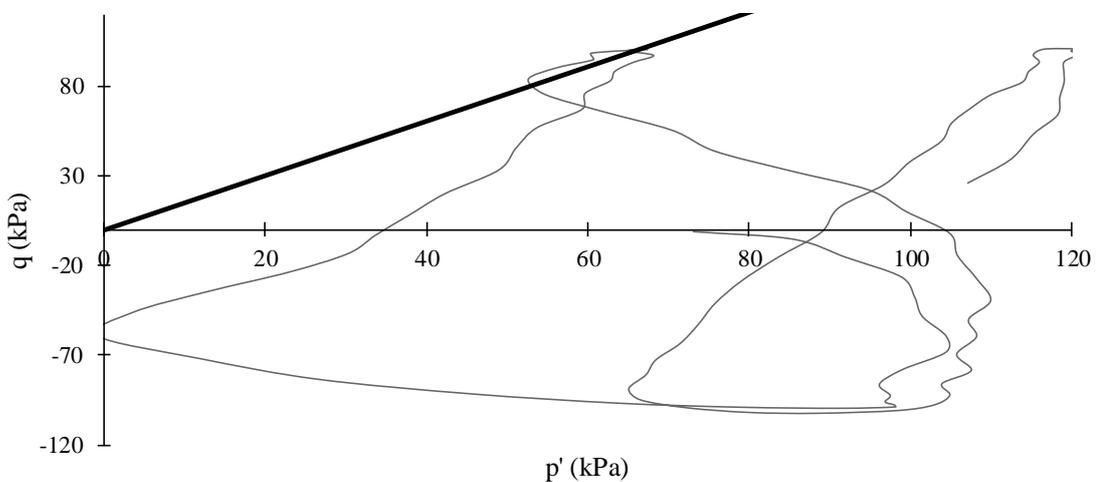
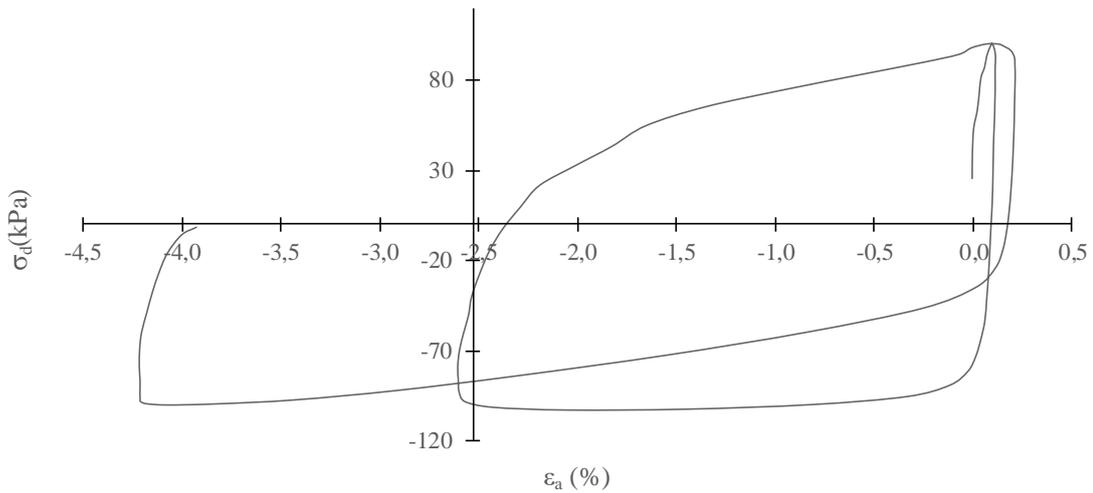
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 100 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 18/05/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_100 |

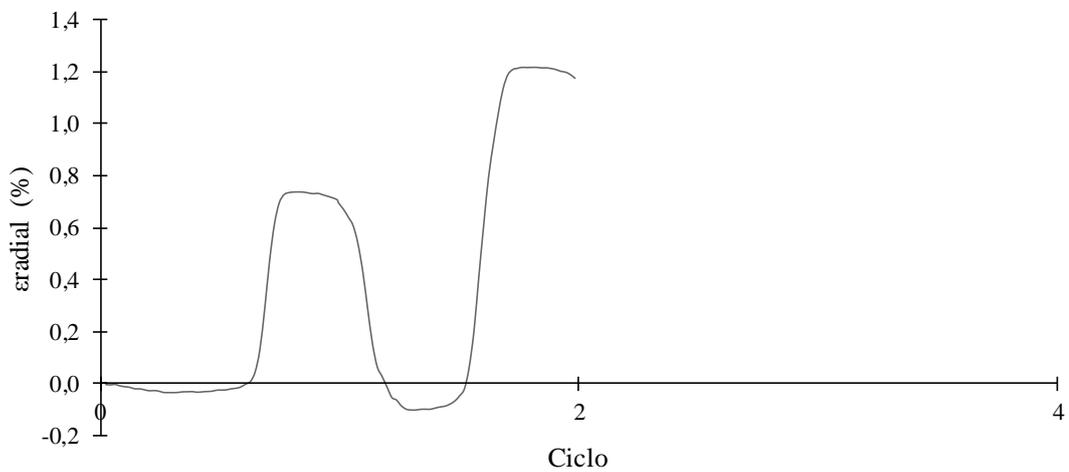
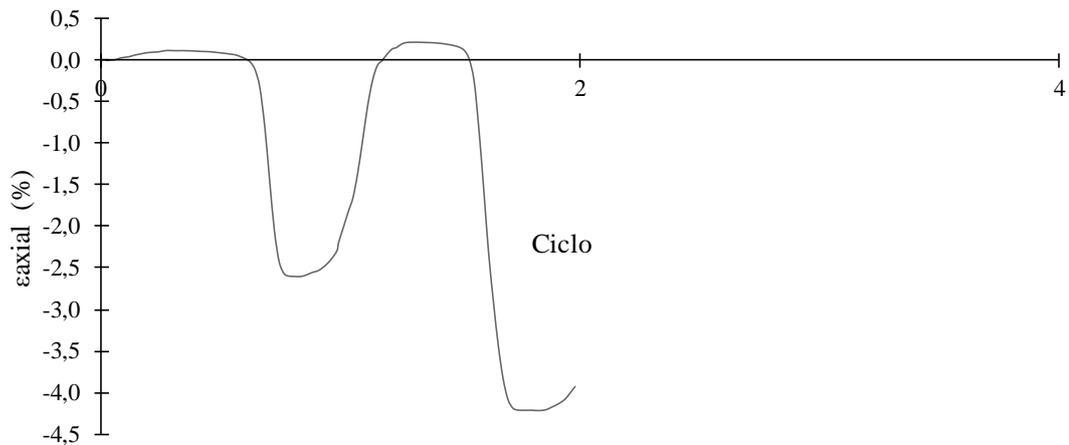
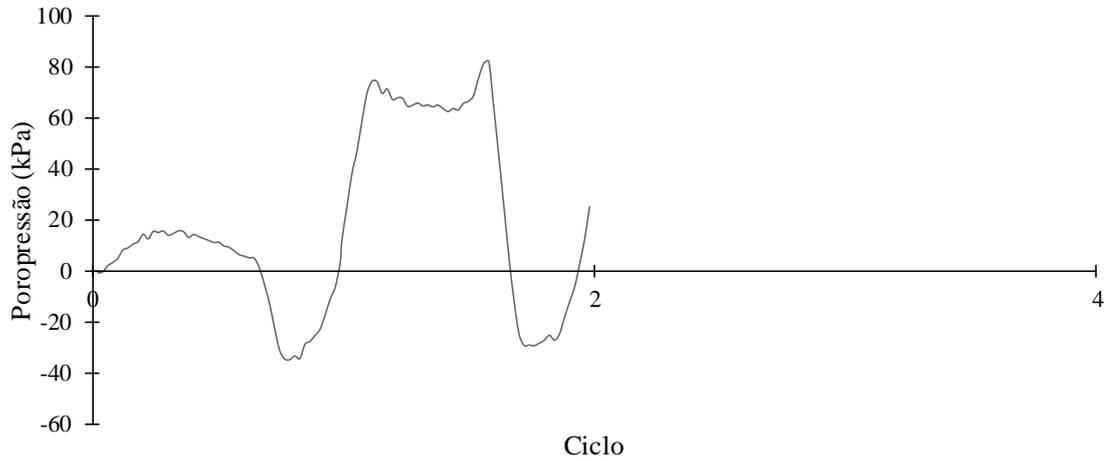
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 2,933 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2570 g | Nf | 2 ciclos |
| Varição teor de umidade | -0,44 % | | |
| Varição diâmetro | 0 mm | | |
| Varição altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,581 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 100 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 18/05/2016 |
| Código ensaio | A_90_100_100 |

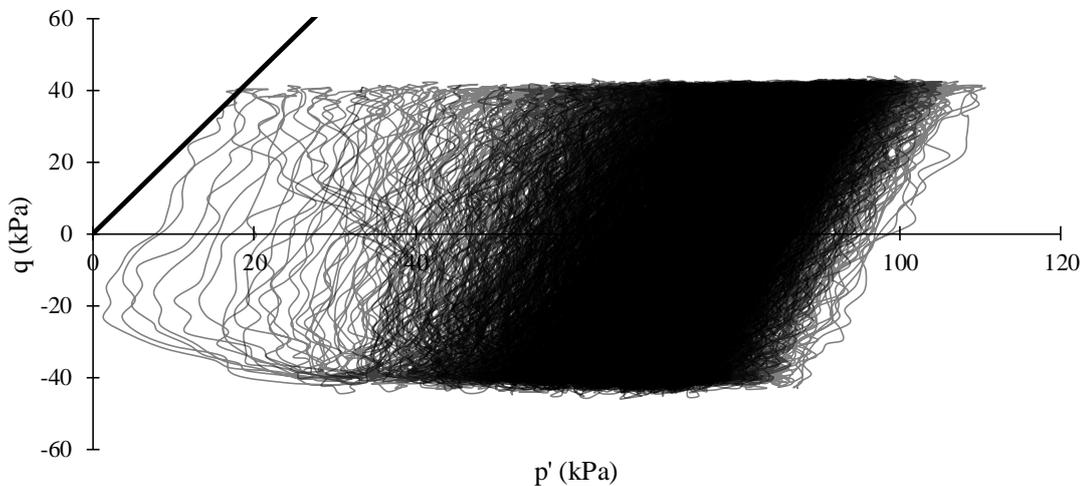
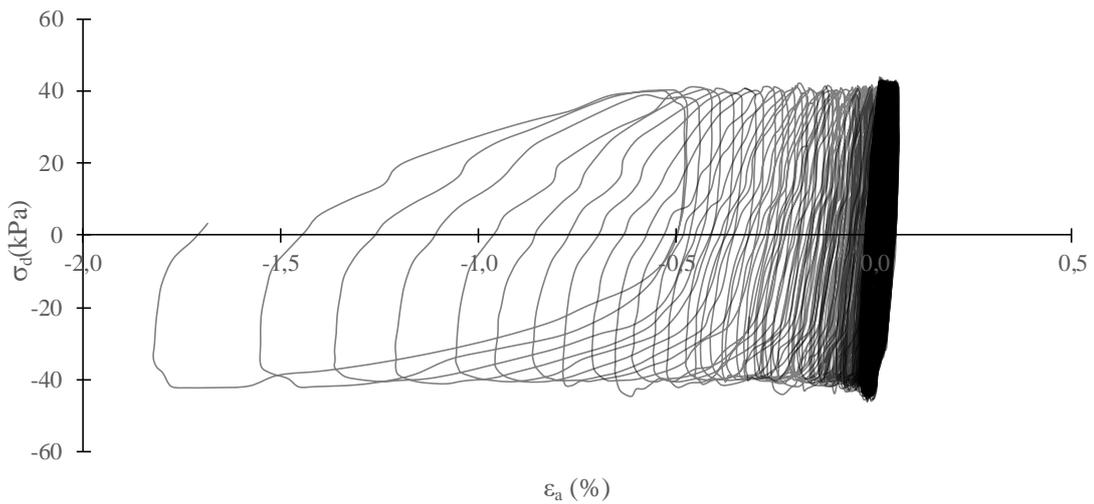
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 40 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 6/05/2016 |
| Código ensaio | AF_90_100_40 |

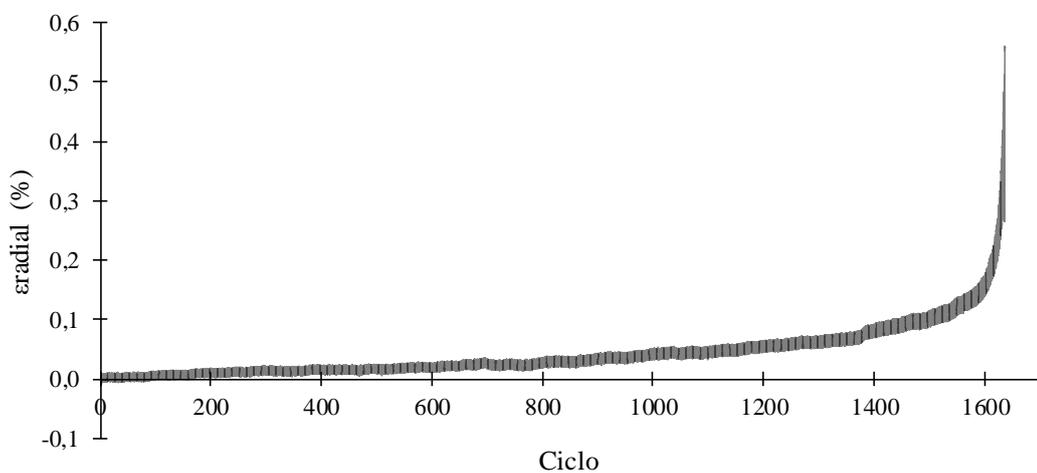
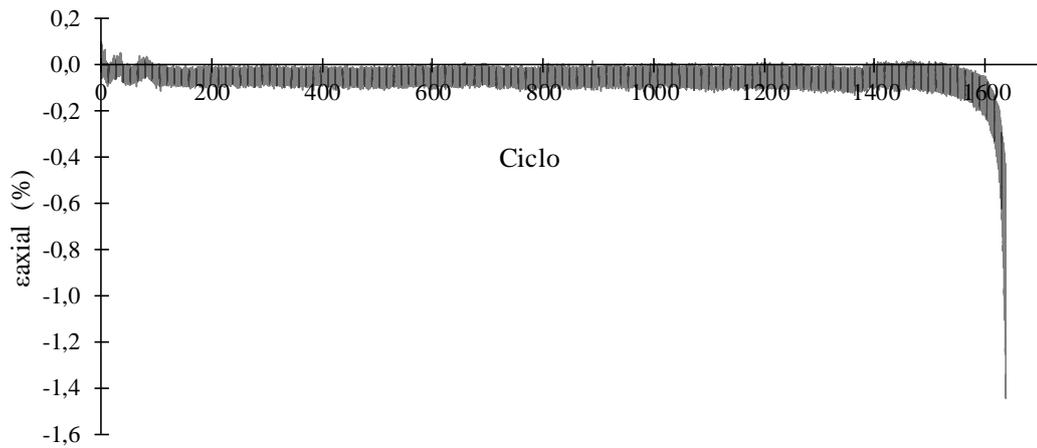
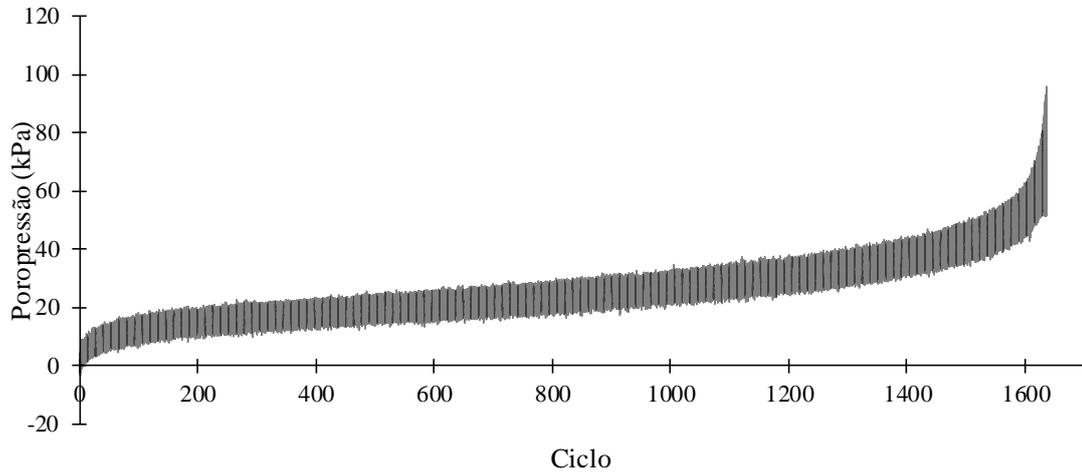
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 3,139 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2600 g | Nf | 1652 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,33 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,581 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 40 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 6/05/2016 |
| Código ensaio | AF_90_100_40 |

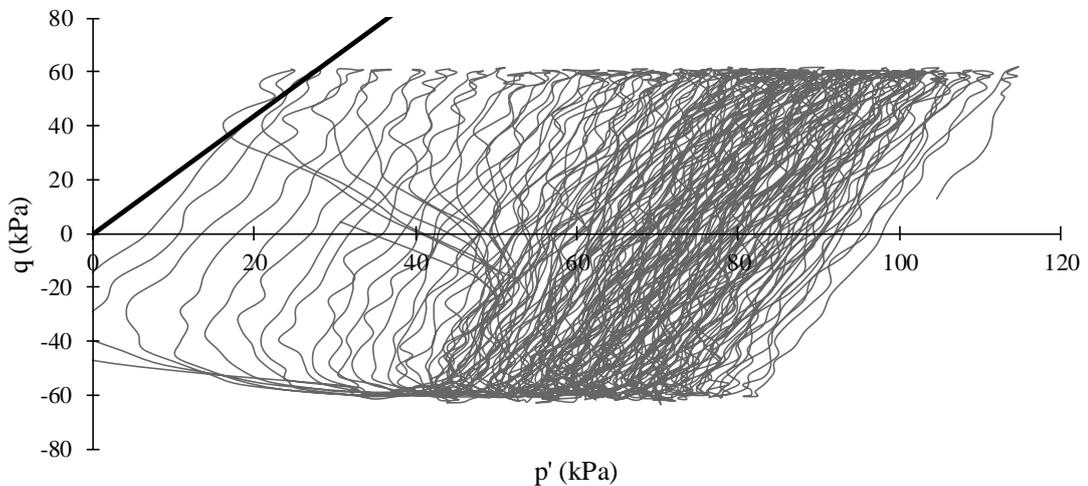
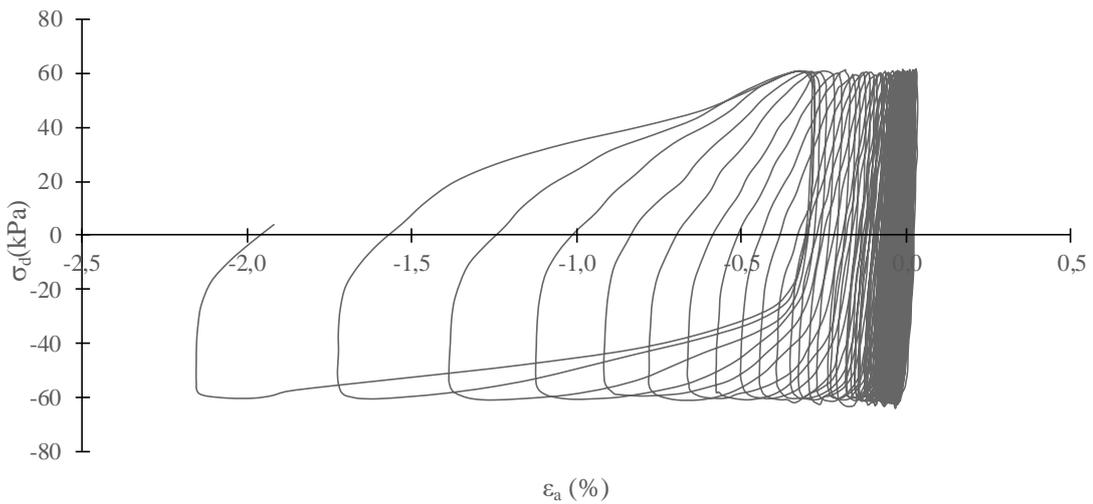
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 22/04/2016 |
| Código ensaio | AF_90_100_60 |

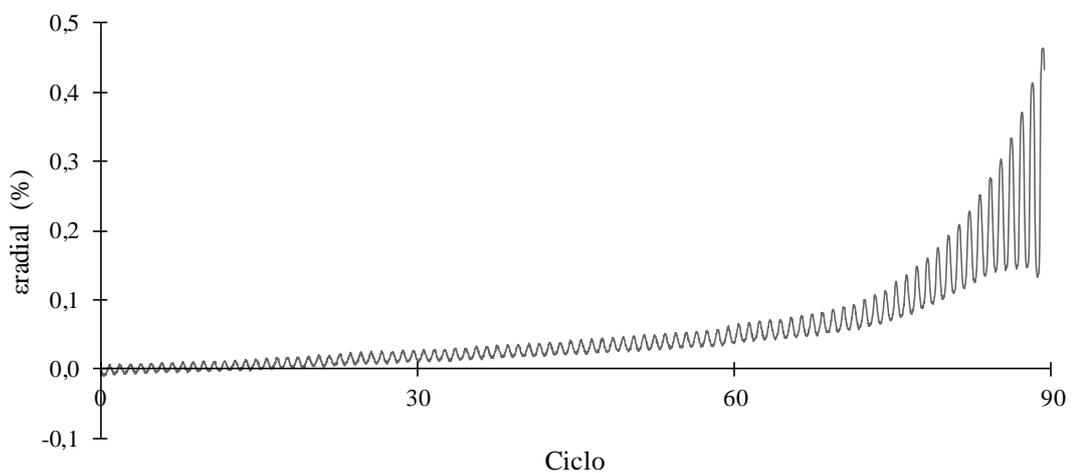
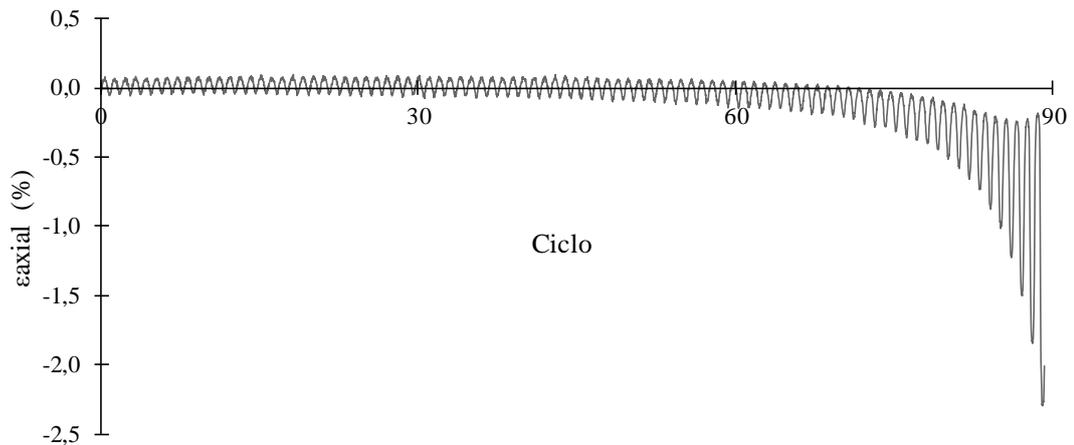
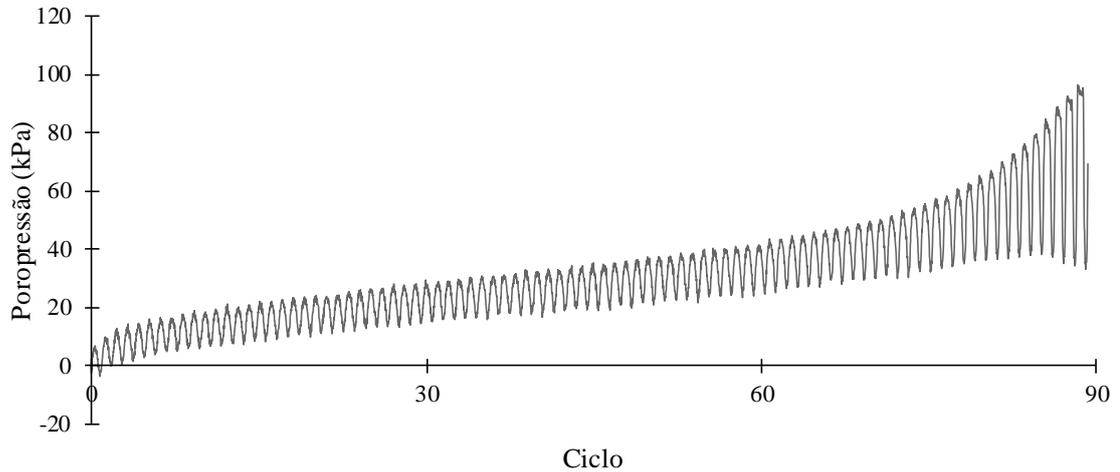
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 3,132 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2590 g | Nf | 89 ciclos |
| Variação teor de umidade | -0,17 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,590 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 22/04/2016 |
| Código ensaio | AF_90_100_60 |

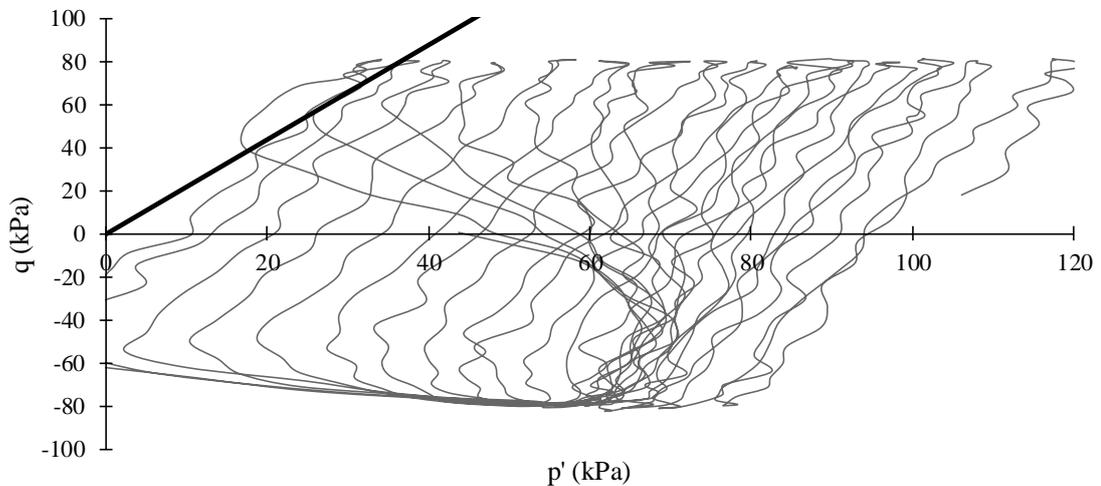
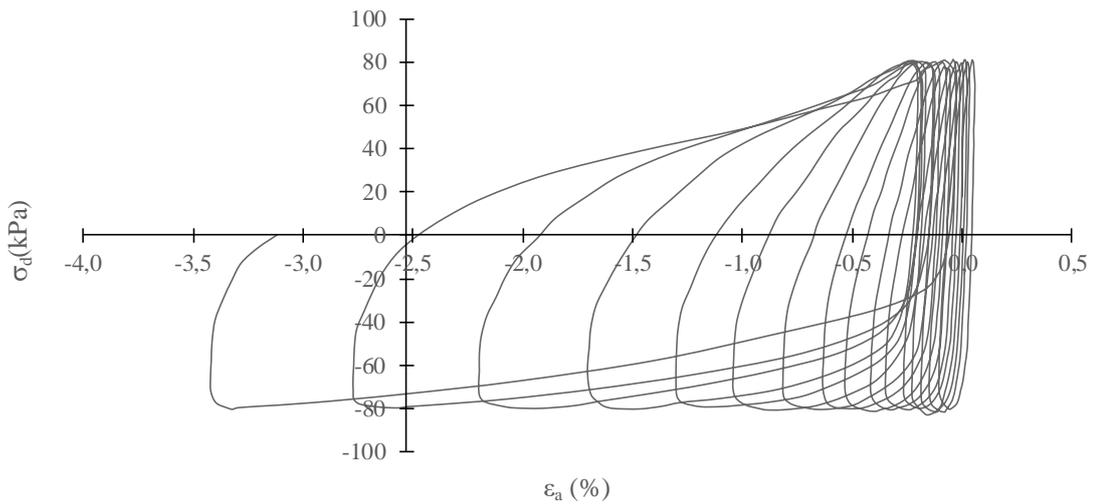
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 26/04/2016 |
| Código ensaio | AF_90_100_80 |

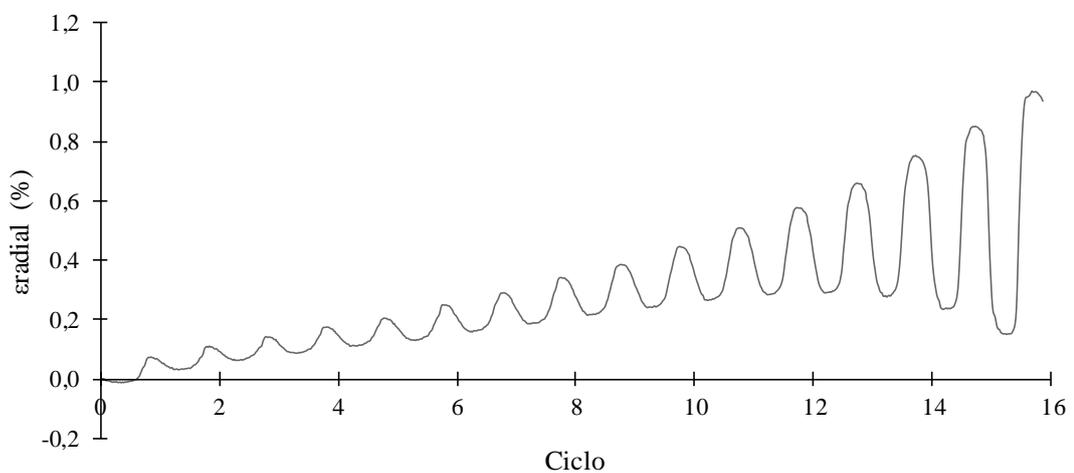
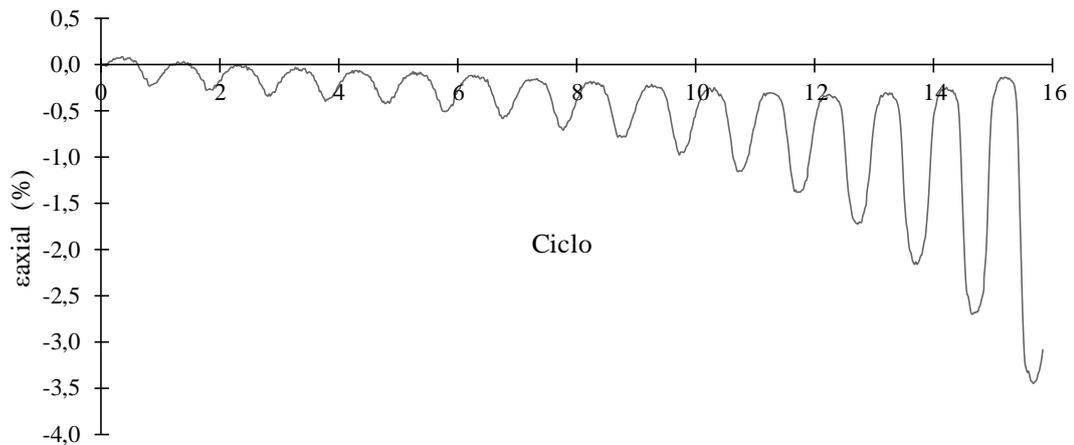
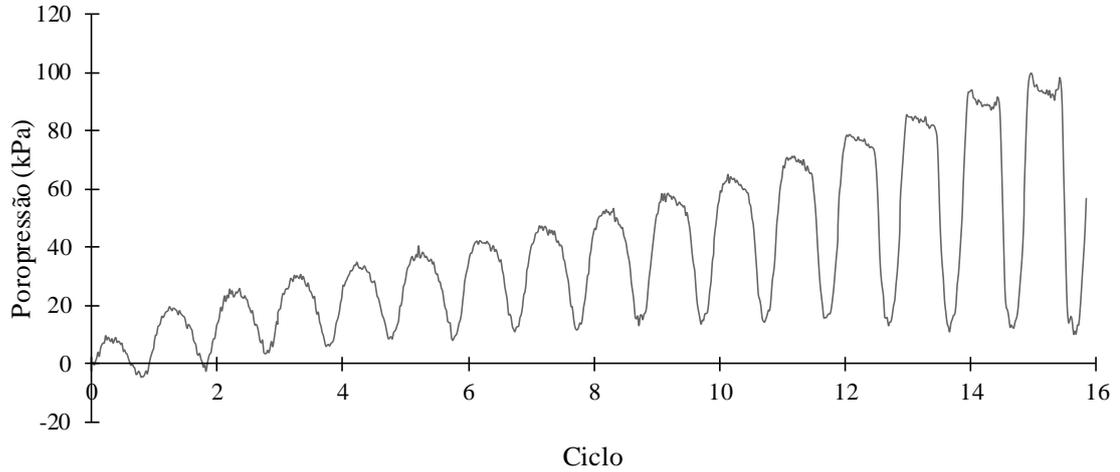
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 2,930 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2590 g | Nf | 15 ciclos |
| Variação teor de umidade | -0,13 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,589 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 26/04/2016 |
| Código ensaio | AF_90_100_80 |

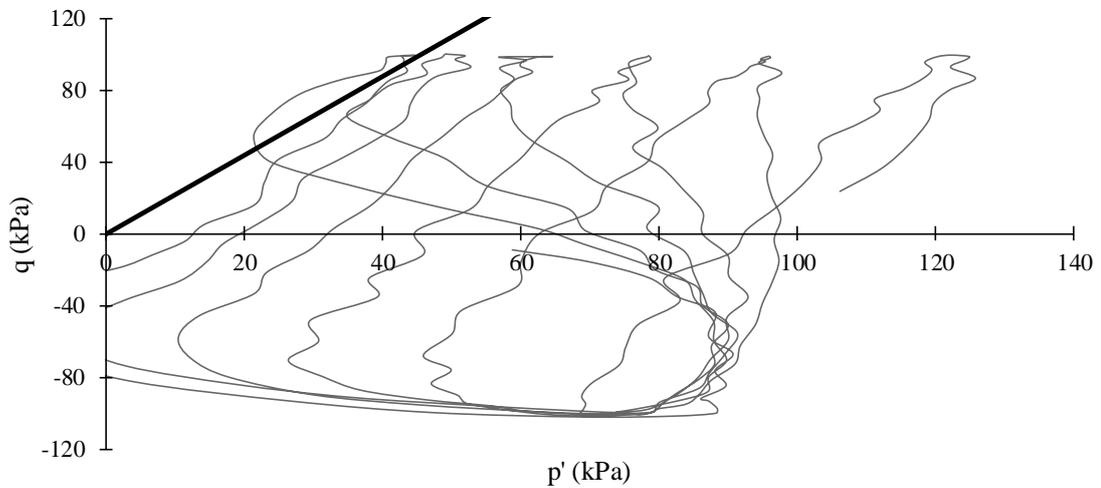
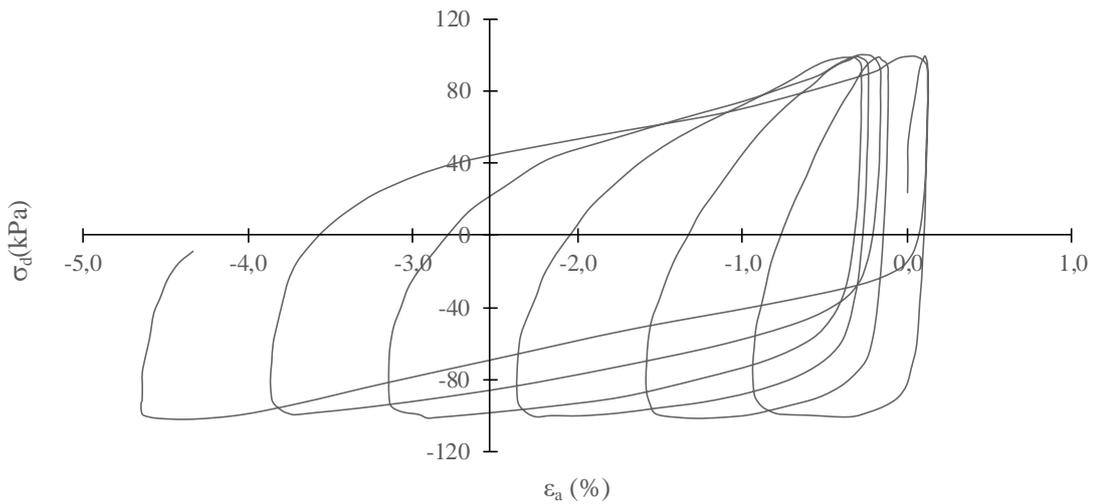
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 100 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 20/05/2016 |
| Código ensaio | AF_90_100_100 |

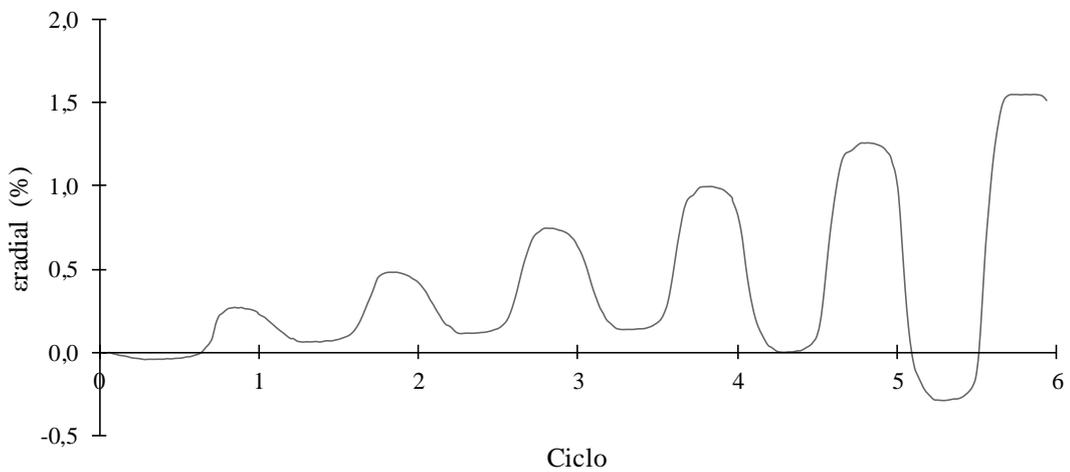
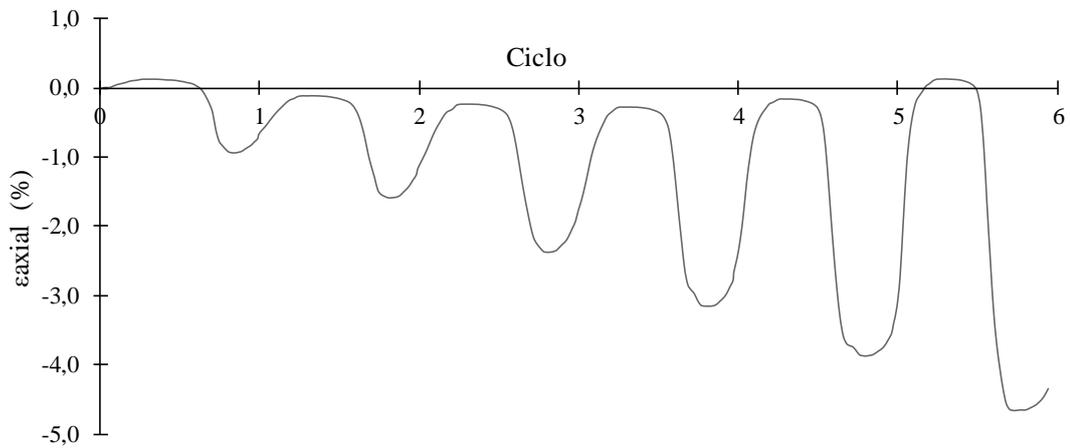
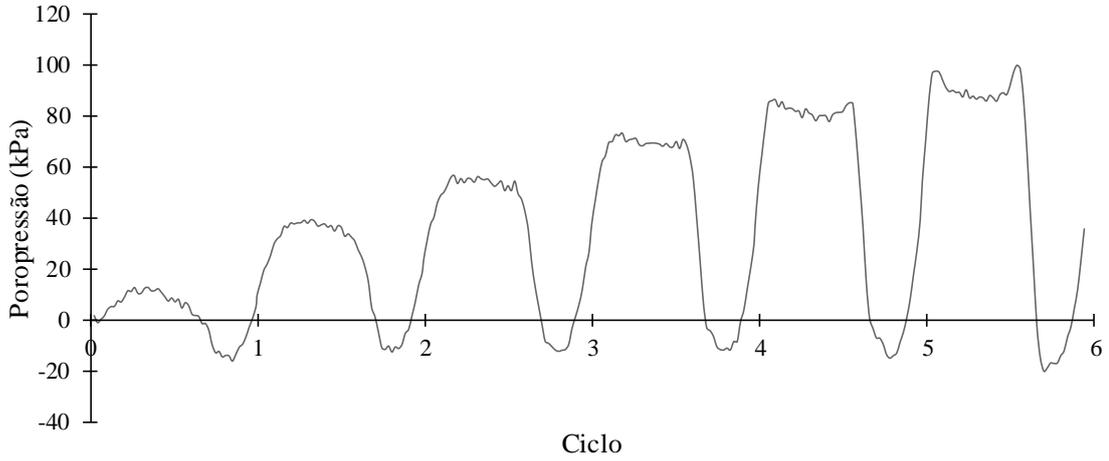
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 3,361 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2590 g | Nf | 5 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,03 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,587 g/cm ³ | | |



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 100 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 20/05/2016 |
| Código ensaio | AF_90_100_100 |

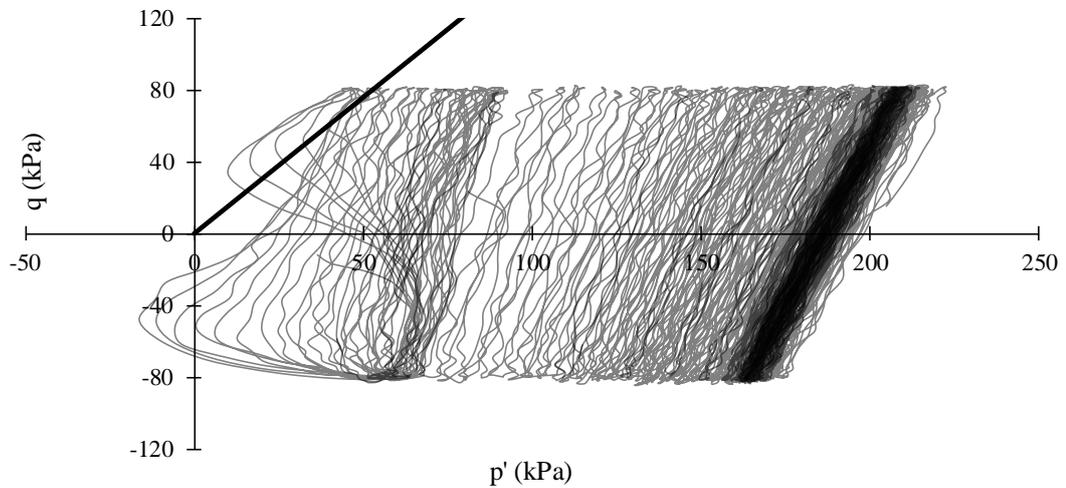
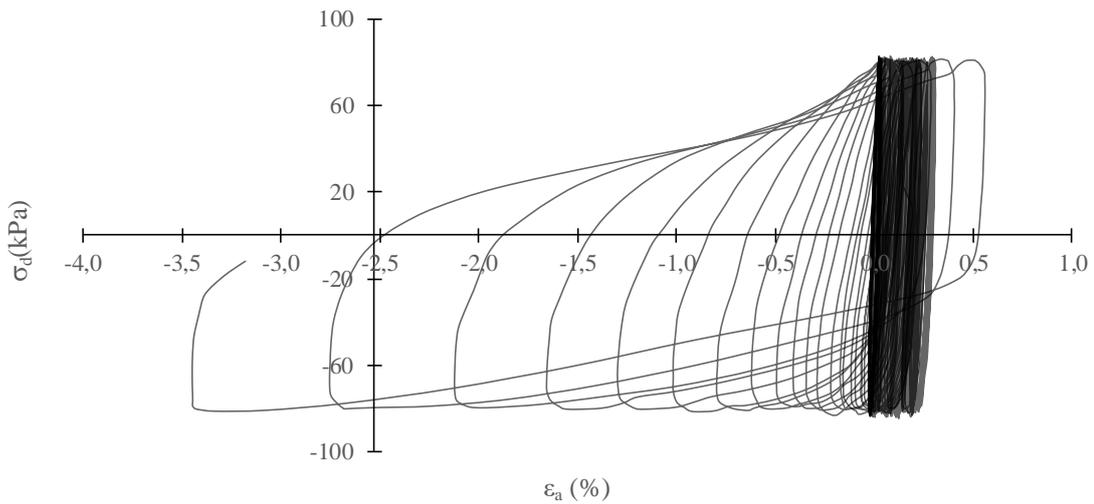
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 1/07/2016 |
| Código ensaio | A_90_200_80 |

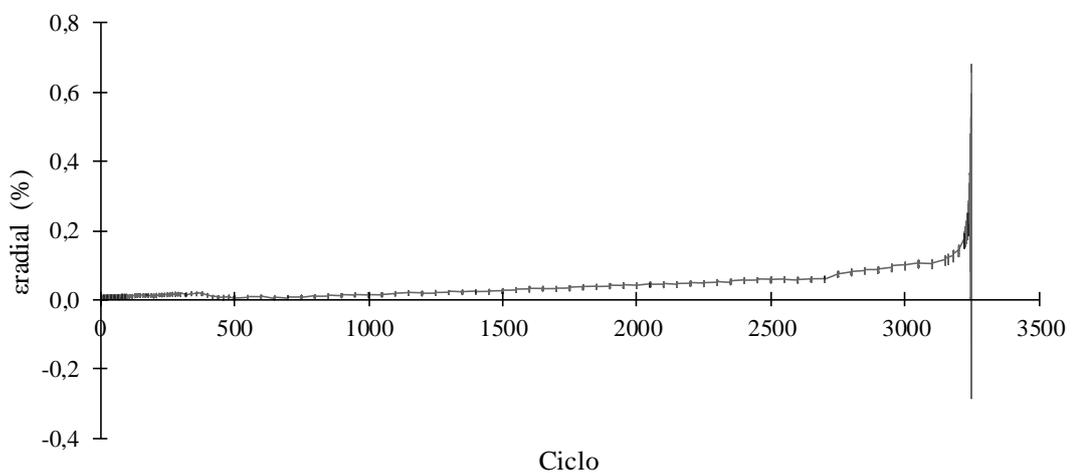
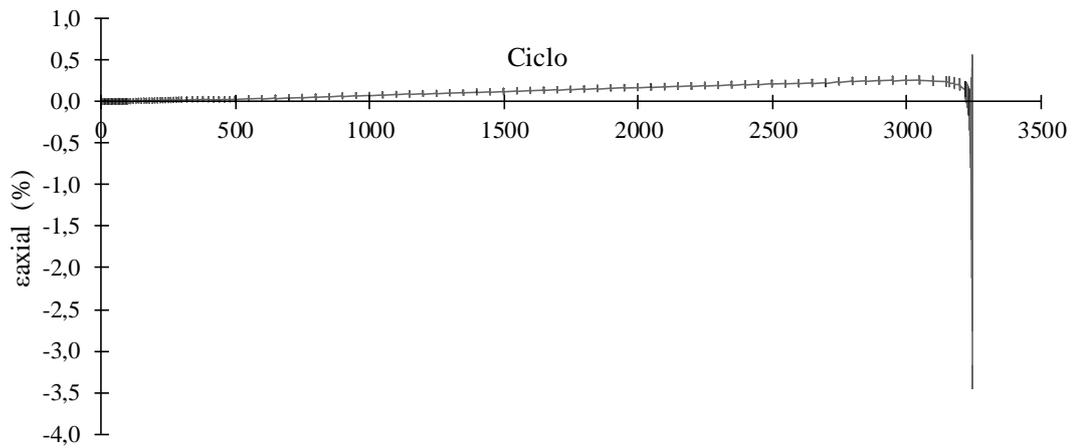
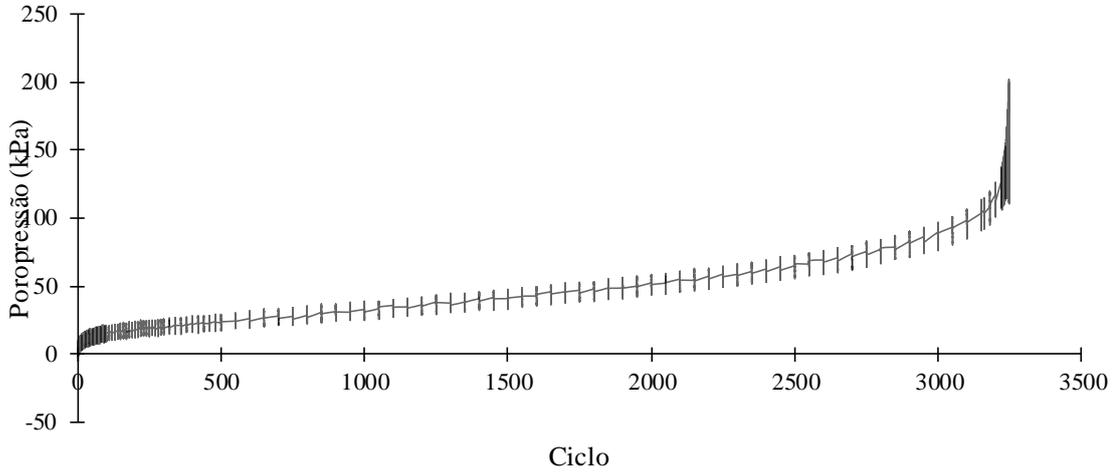
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 5,309 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2620 g | Nf | 3246 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,21 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,603 g/cm ³ | | |



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 1/07/2016 |
| Código ensaio | A_90_200_80 |

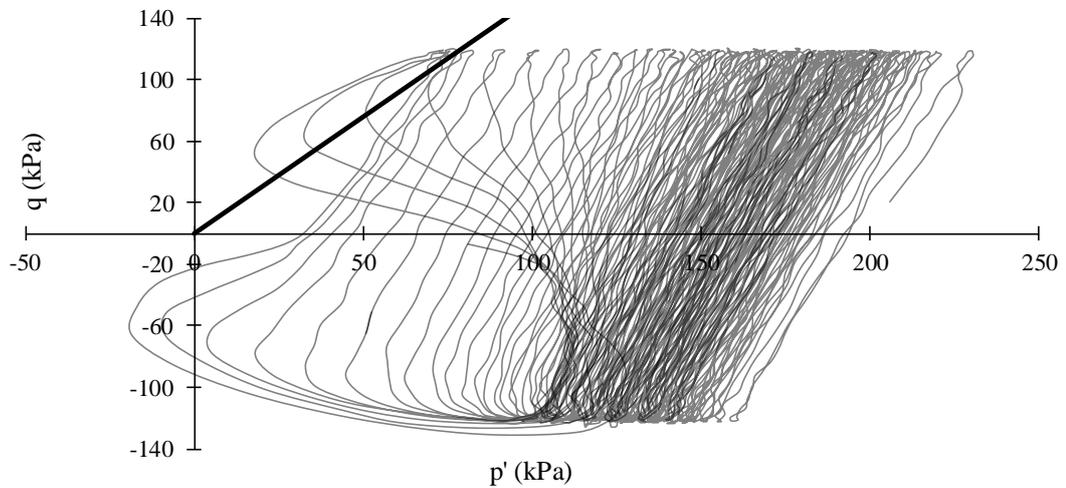
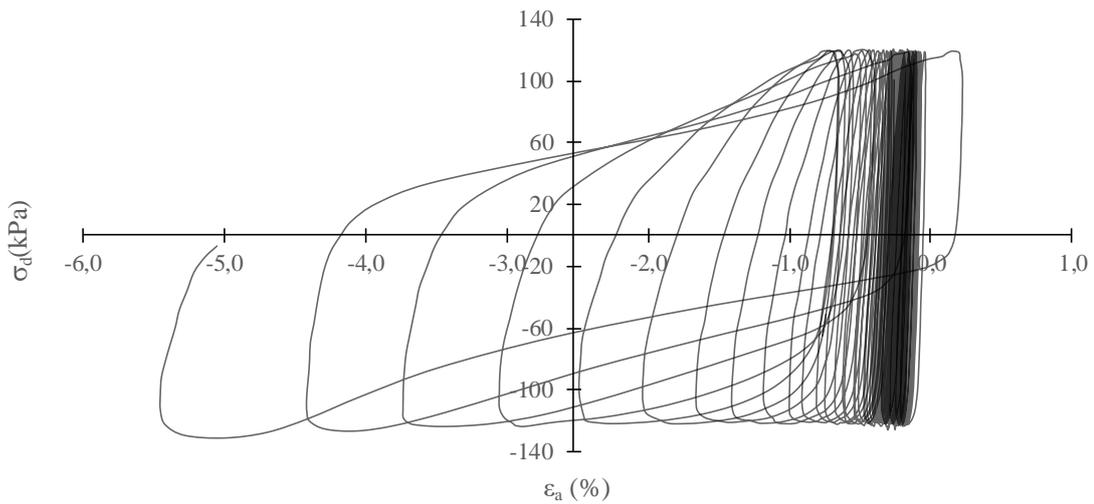
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 120 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 30/06/2016 |
| Código ensaio | A_90_200_120 |

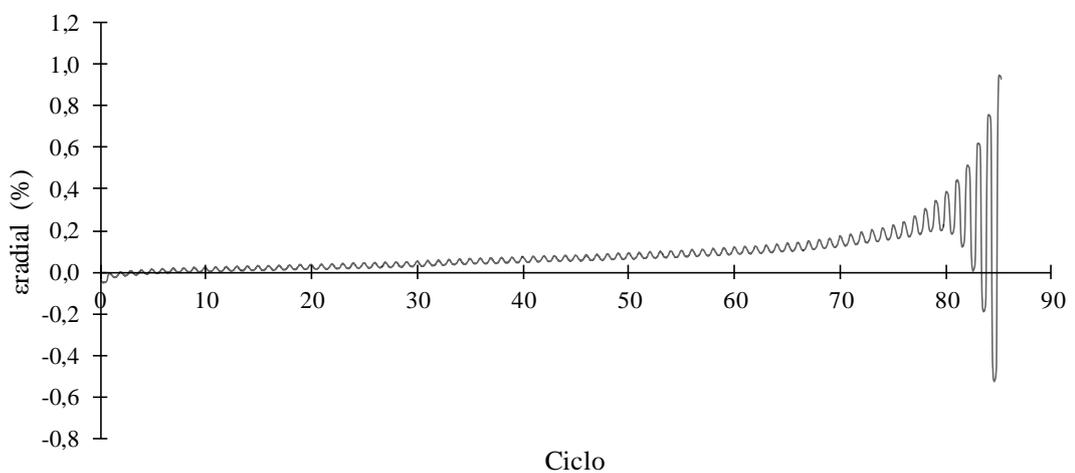
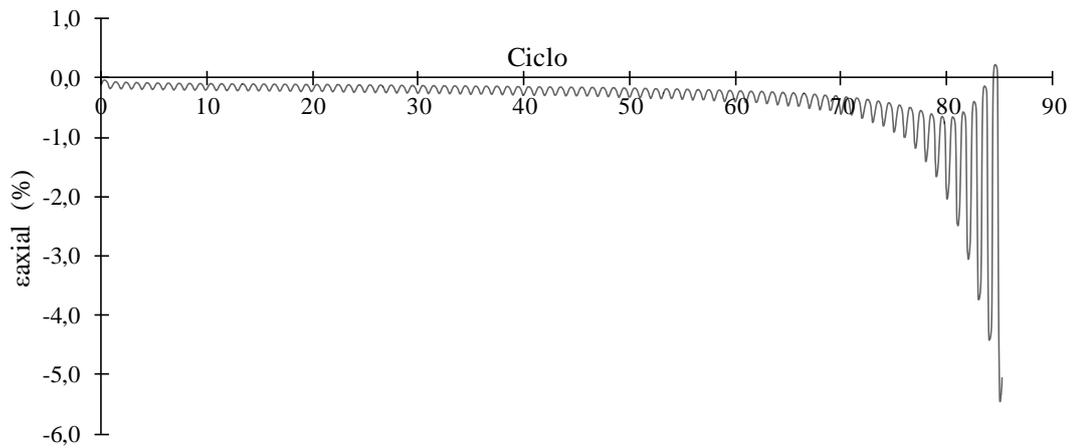
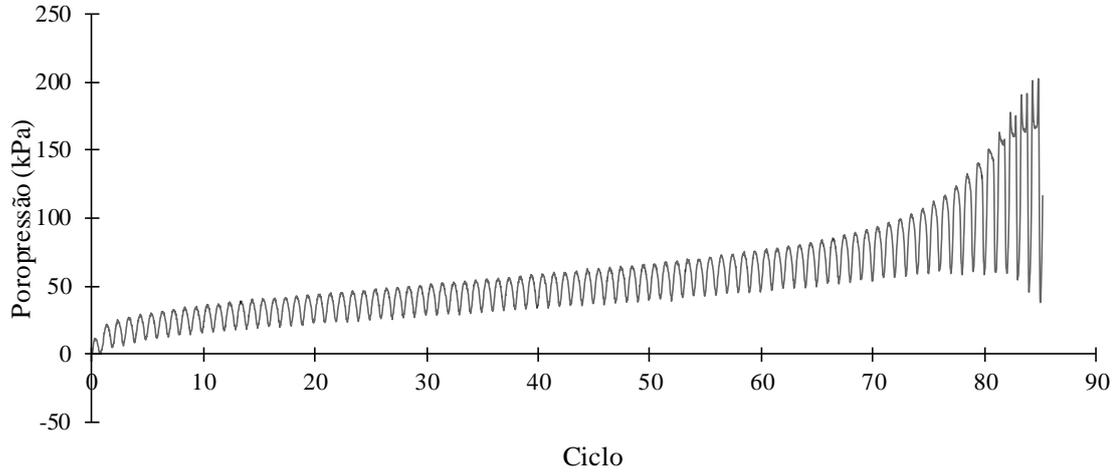
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 5,469 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2620 g | Nf | 84 ciclos |
| Variação teor de umidade | -0,34 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,603 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 120 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 30/06/2016 |
| Código ensaio | A_90_200_120 |

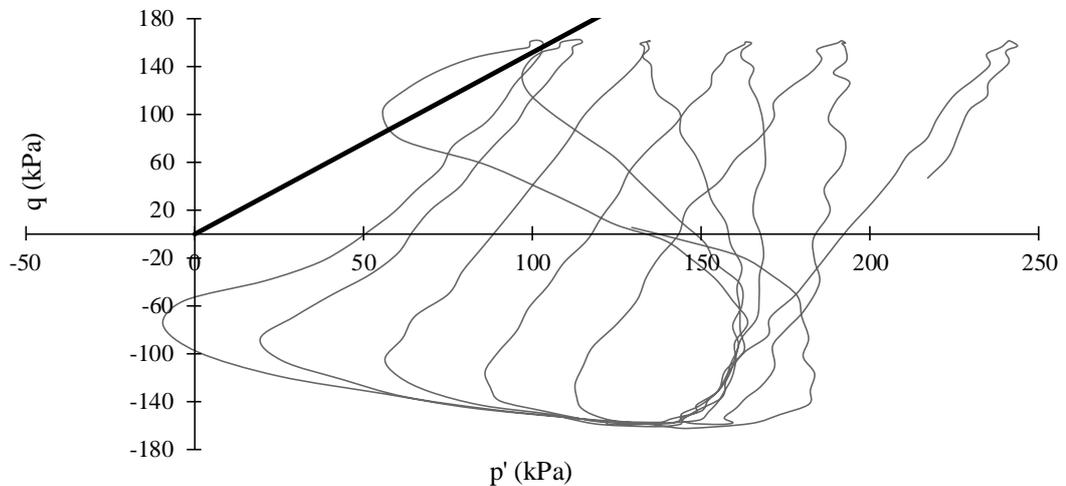
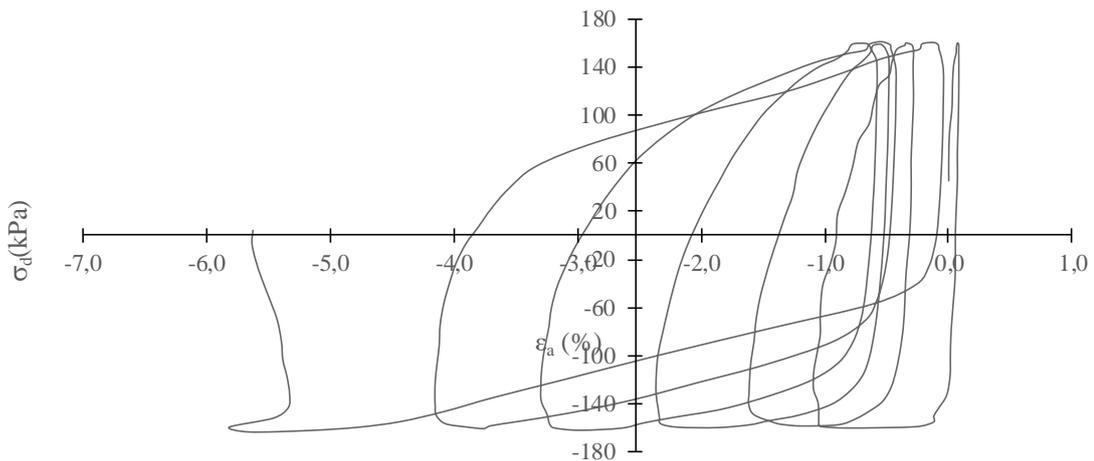
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|----------------------------------|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (±) | 160 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 29/06/2016 |
| Código ensaio | A_90_200_160 |

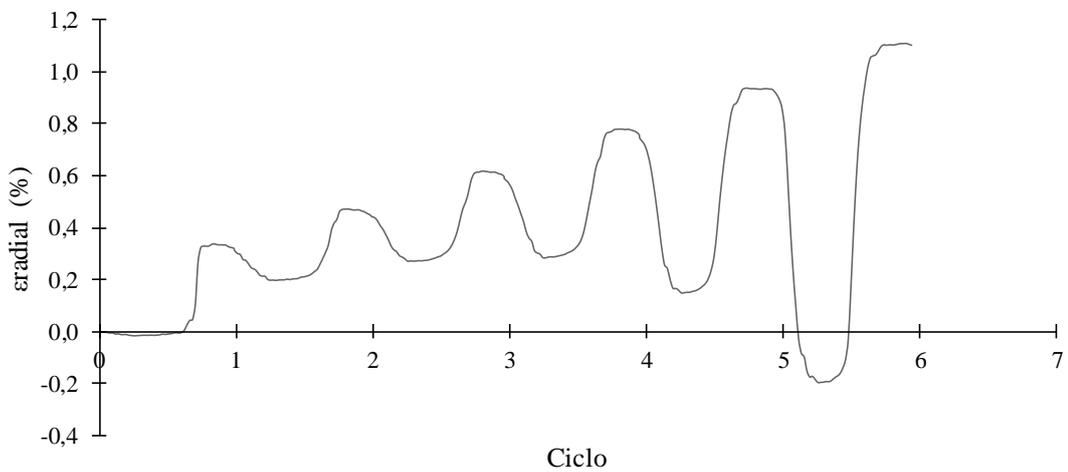
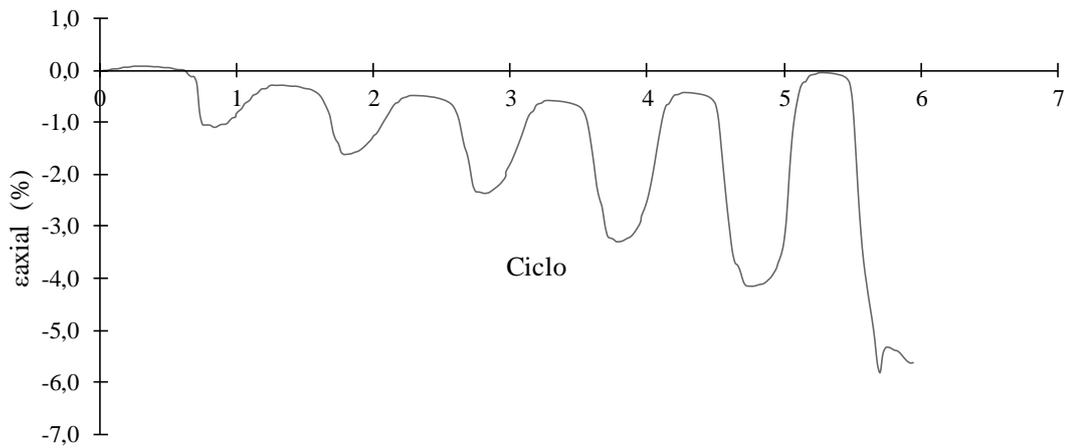
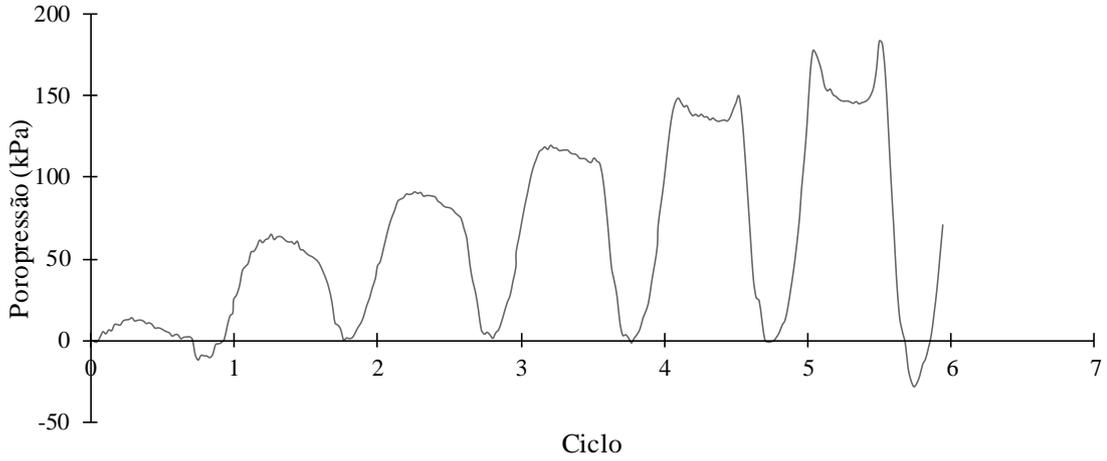
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 5,658 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2620 g | Nf | 1 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,87 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,603 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 160 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 29/06/2016 |
| Código ensaio | A_90_200_160 |

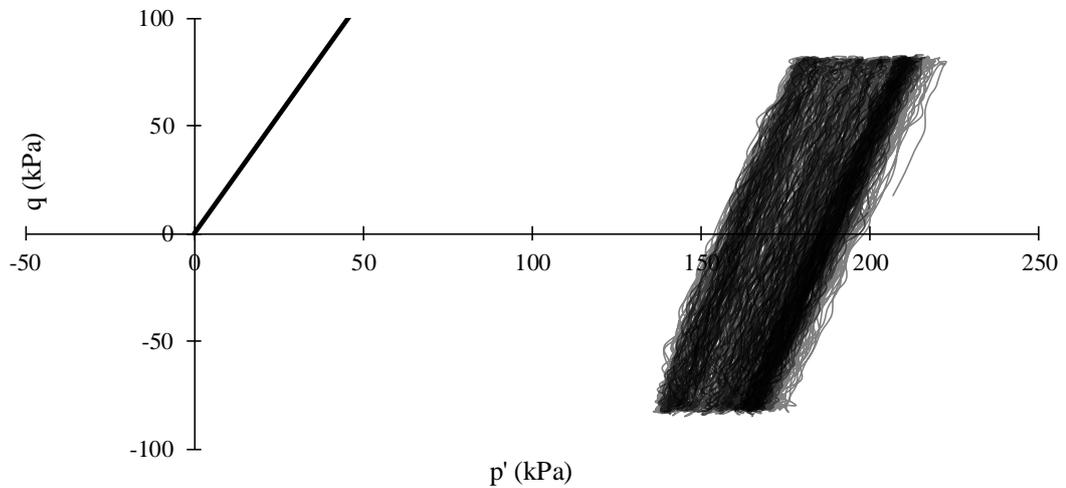
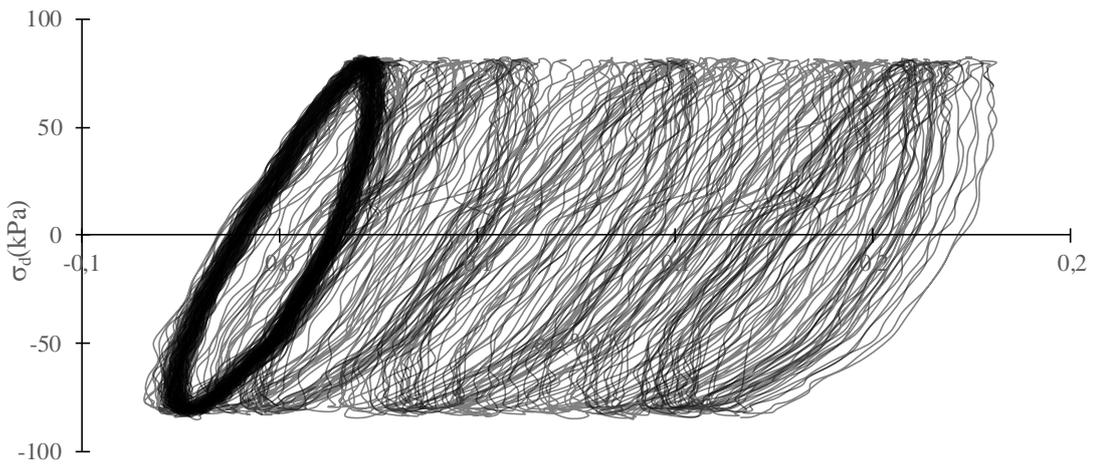
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 8/07/2016 |
| Código ensaio | AF_90_200_80 |

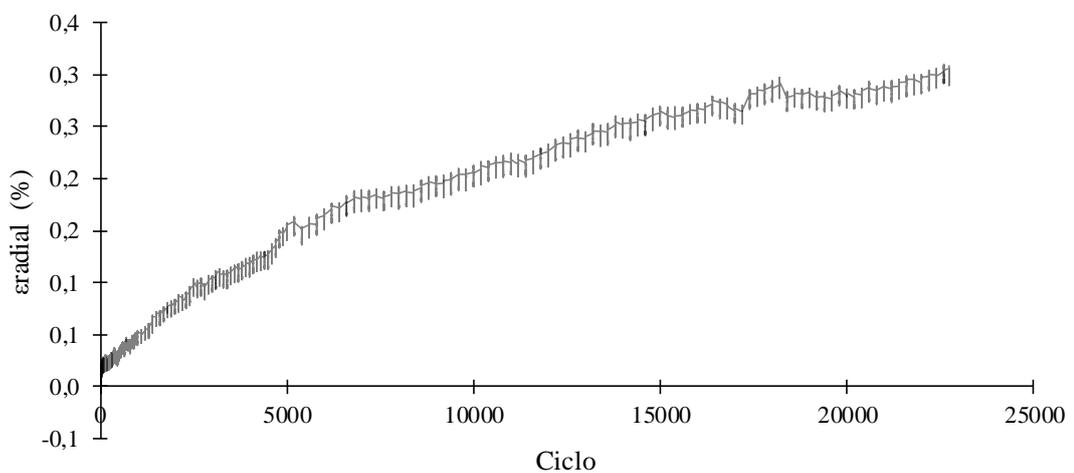
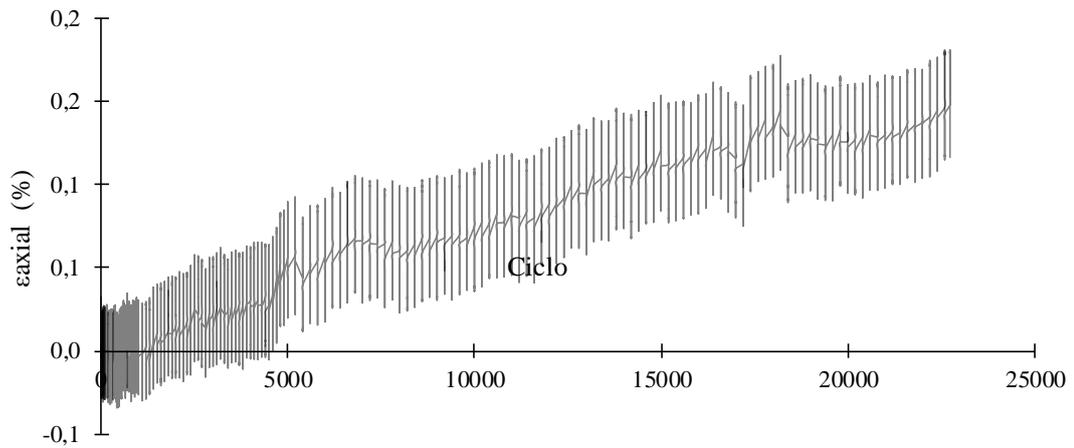
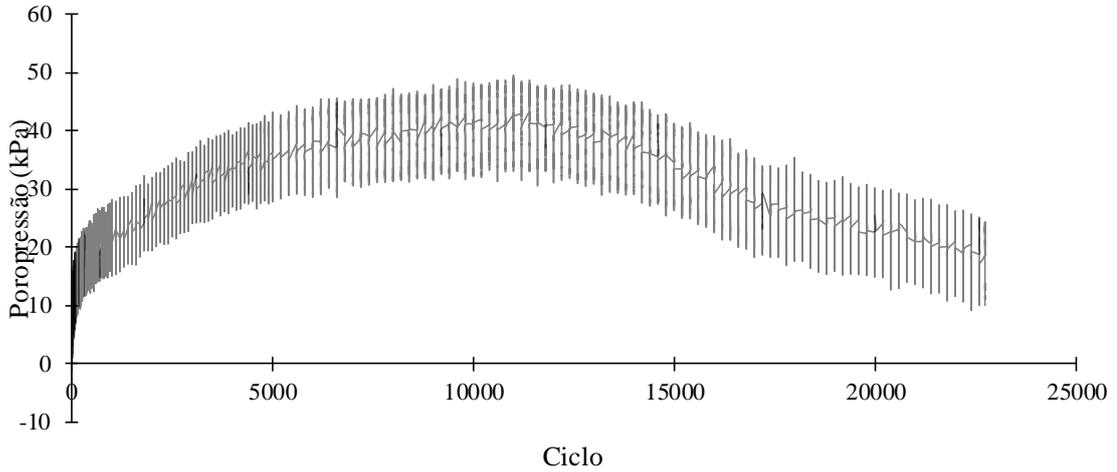
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 5,811 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | Nf | > 22.000 ciclos |
| Massa CP úmido | 2620 g | | |
| Variação teor de umidade | 0,33 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,603 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 80 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 8/07/2016 |
| Código ensaio | AF_90_200_80 |

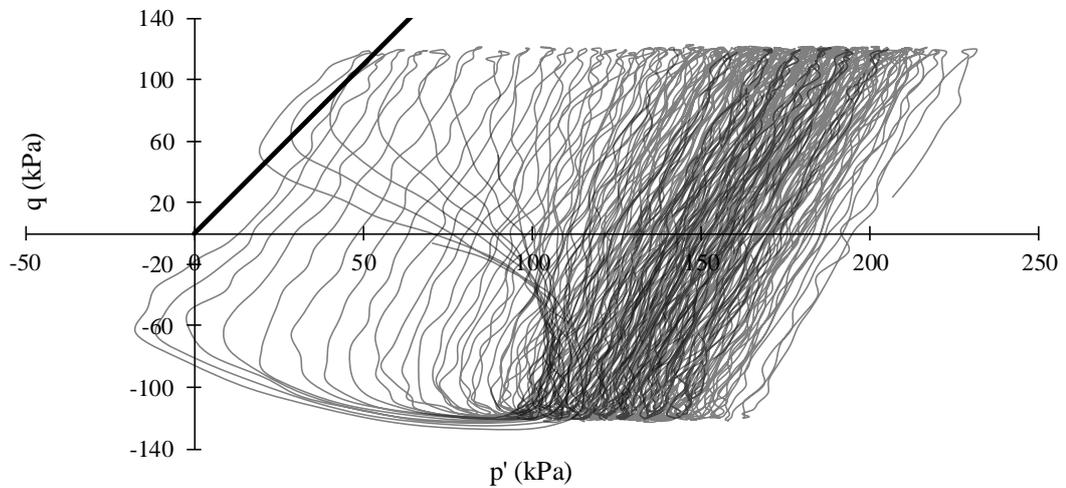
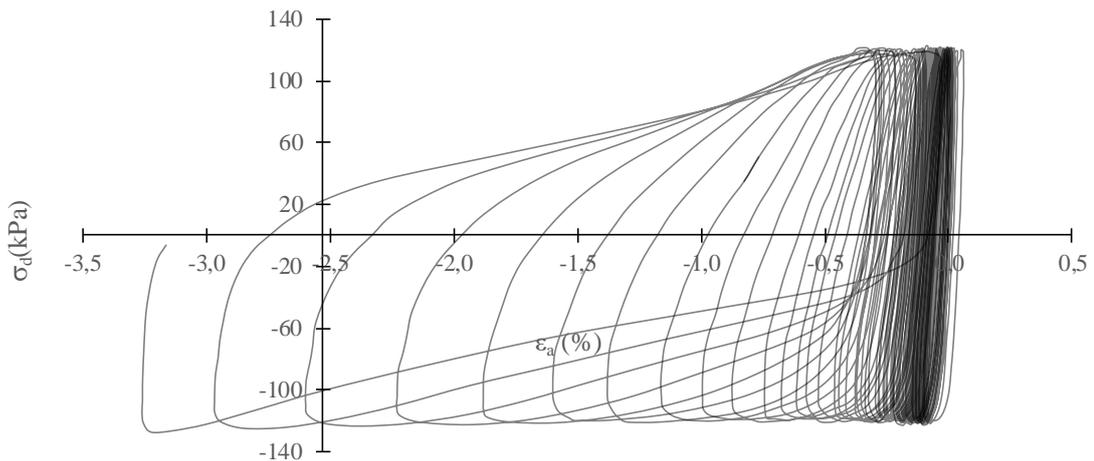
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 120 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 5/07/2016 |
| Código ensaio | AF_90_200_120 |

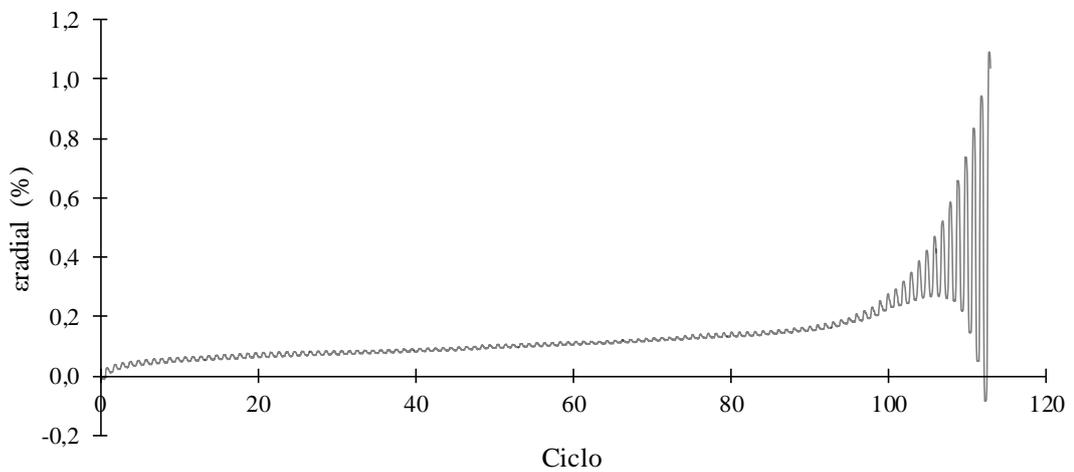
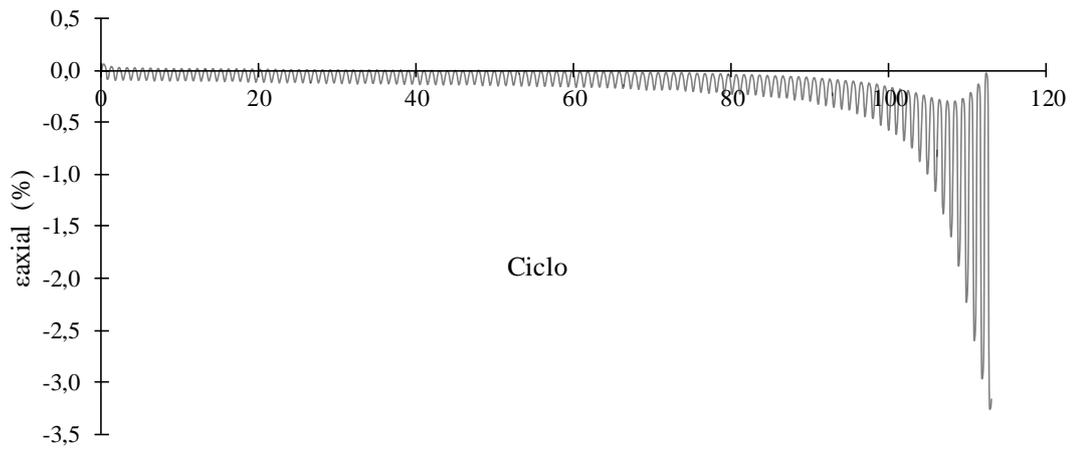
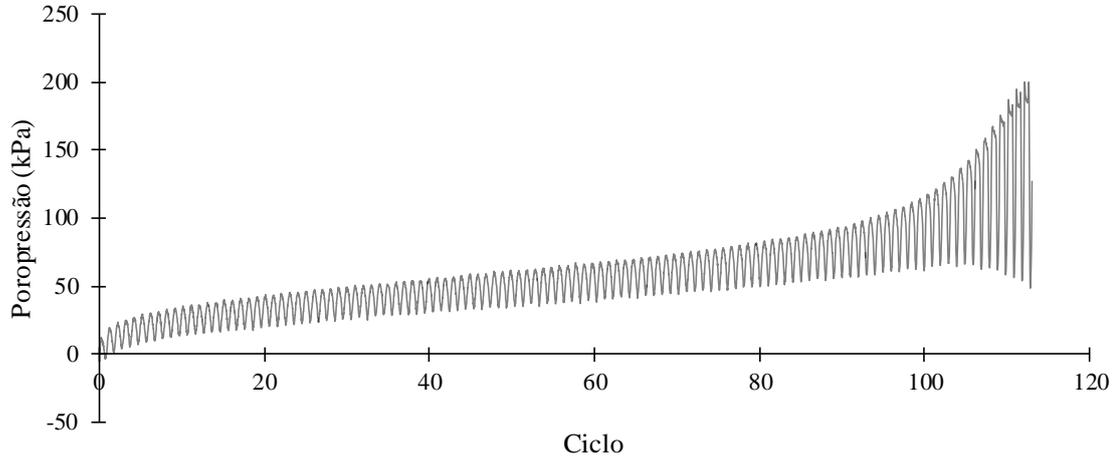
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 6,185 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | Nf | 112 ciclos |
| Massa CP úmido | 2620 g | | |
| Variação teor de umidade | 0,72 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,603 g/cm ³ | | |



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 120 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 5/07/2016 |
| Código ensaio | AF_90_200_120 |

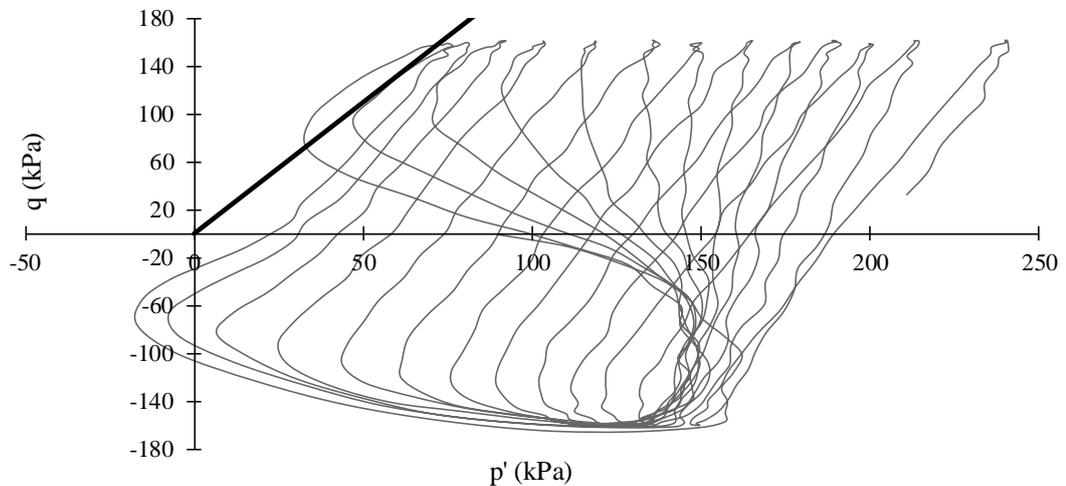
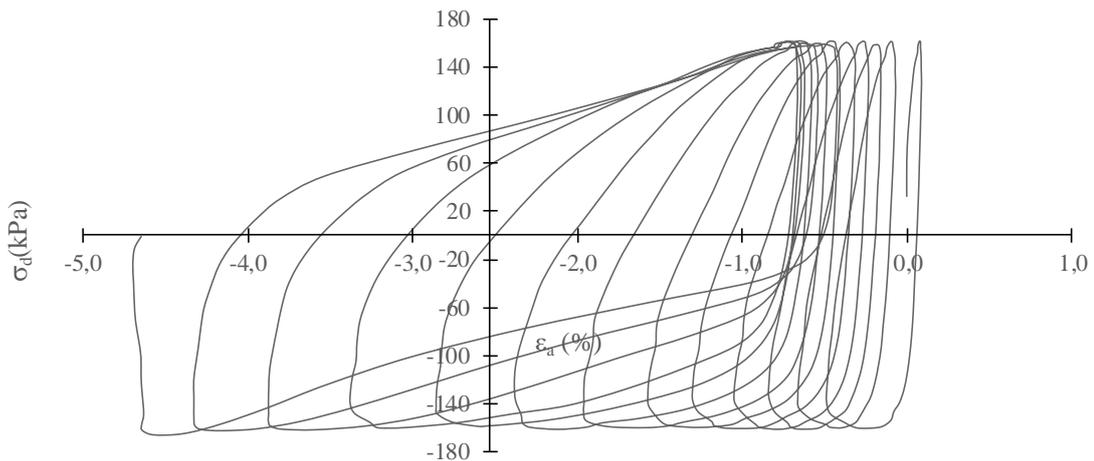
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 160 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 6/07/2016 |
| Código ensaio | AF_90_200_160 |

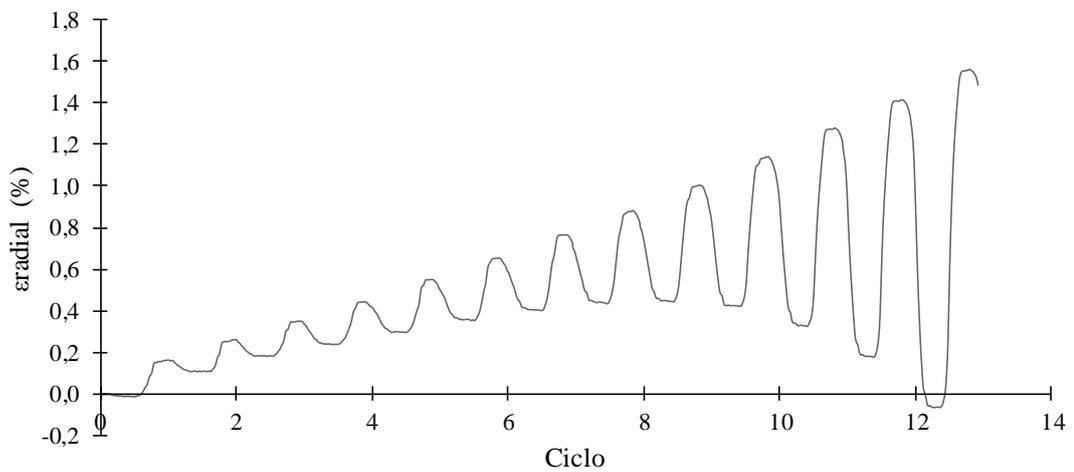
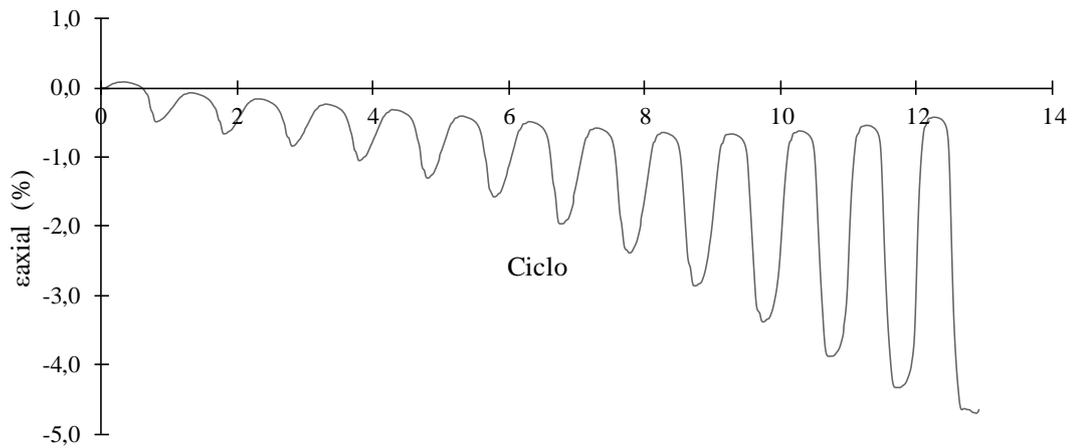
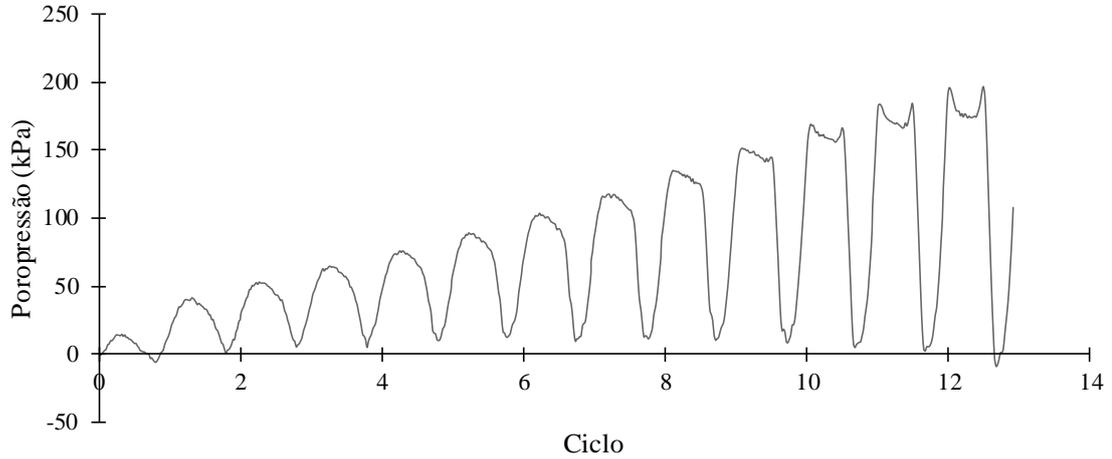
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 8,768 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2620 g | Nf | 13 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,28 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,603 g/cm ³ | | |



| | |
|---|---------------|
| Índice de vazios | 0,63 |
| Tensão efetiva inicial | 200 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 160 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 6/07/2016 |
| Código ensaio | AF_90_200_160 |

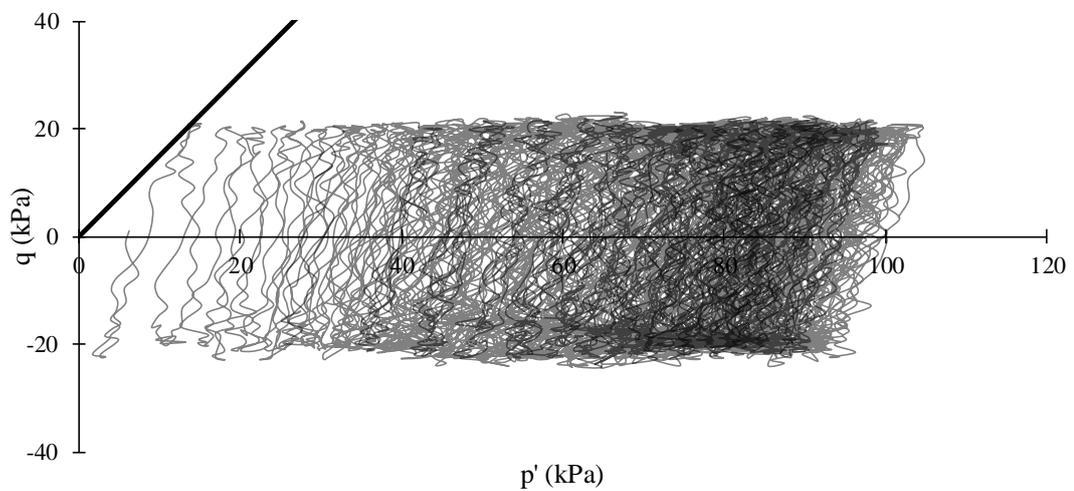
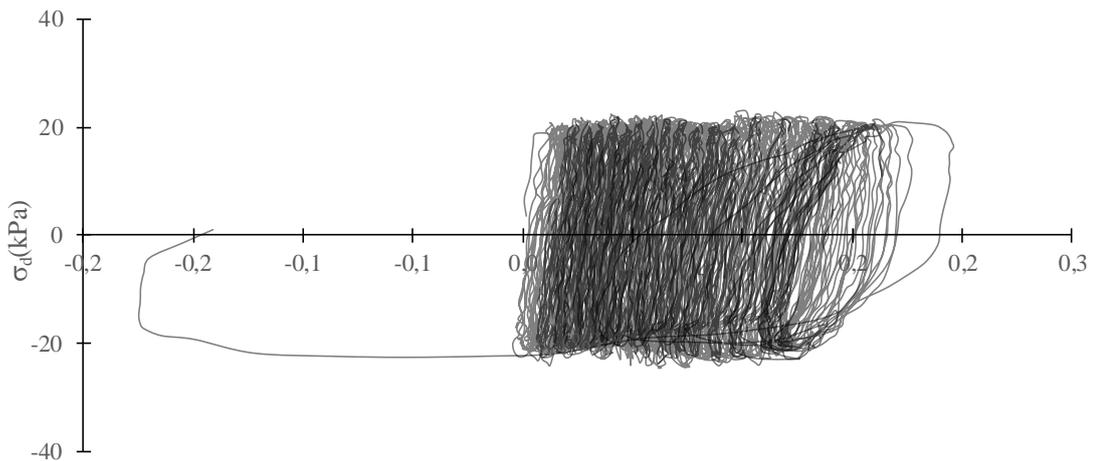
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 20 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 18/01/2016 |
| Código ensaio | A_50_100_20 |

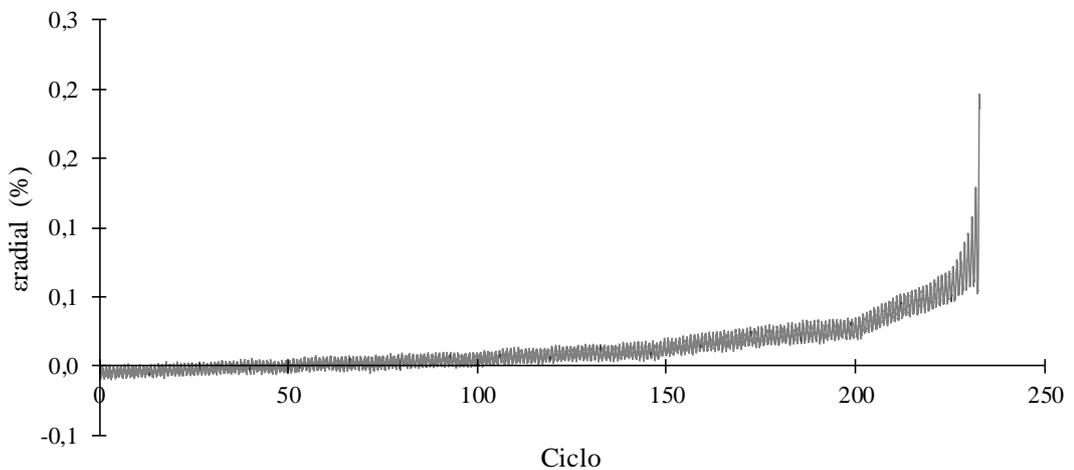
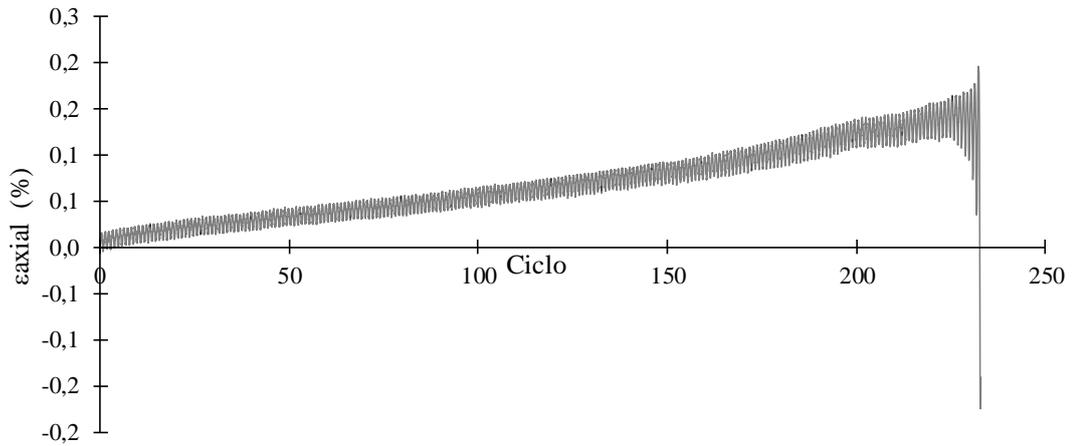
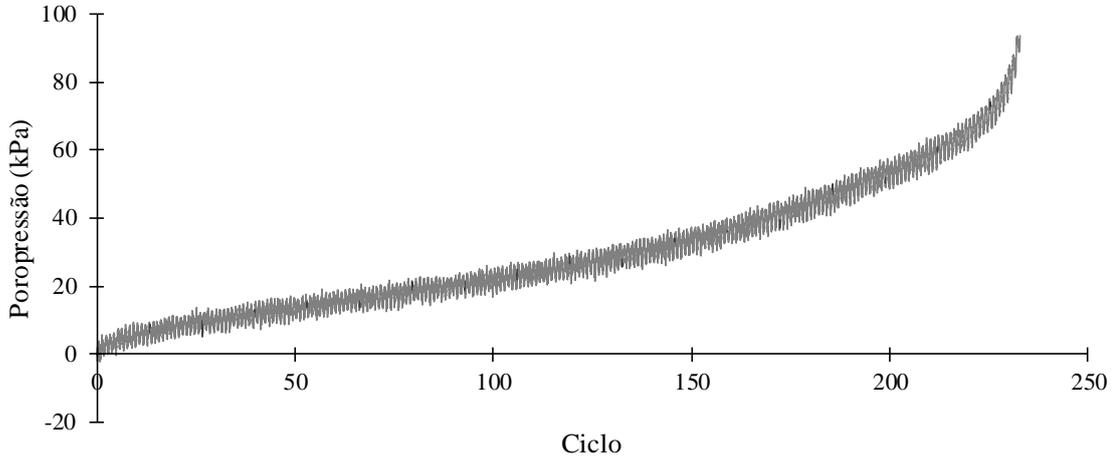
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 5,735 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2440 g | Nf | 234 ciclos |
| Varição teor de umidade | 0,30 % | | |
| Varição diâmetro | 0 mm | | |
| Varição altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,491 g/cm ³ | | |



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 20 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 18/01/2016 |
| Código ensaio | A_50_100_20 |

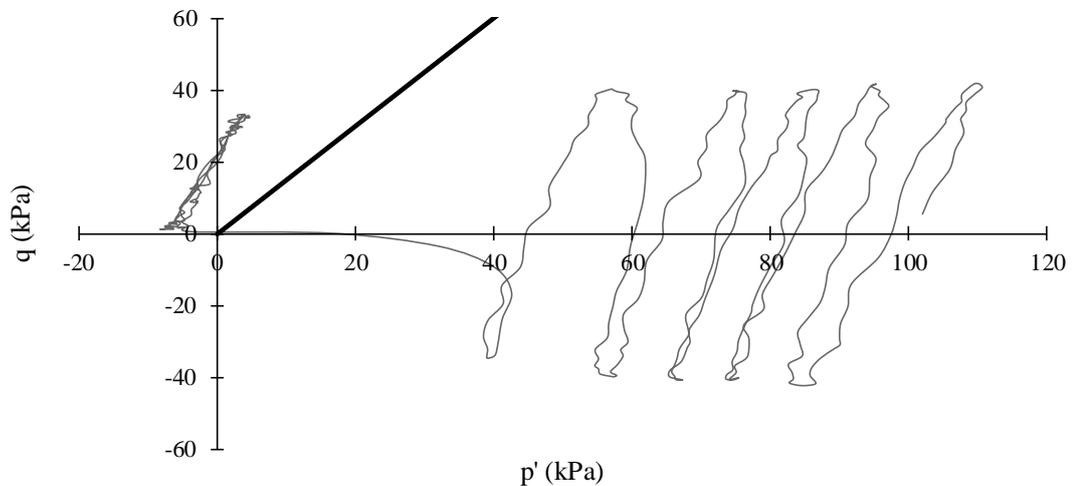
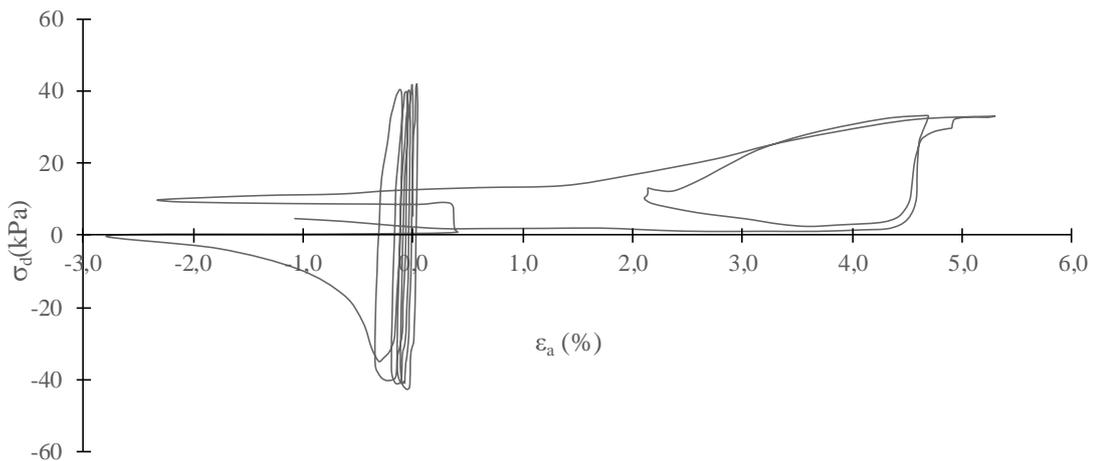
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 40 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 14/01/2016 |
| Código ensaio | A_50_100_40 |

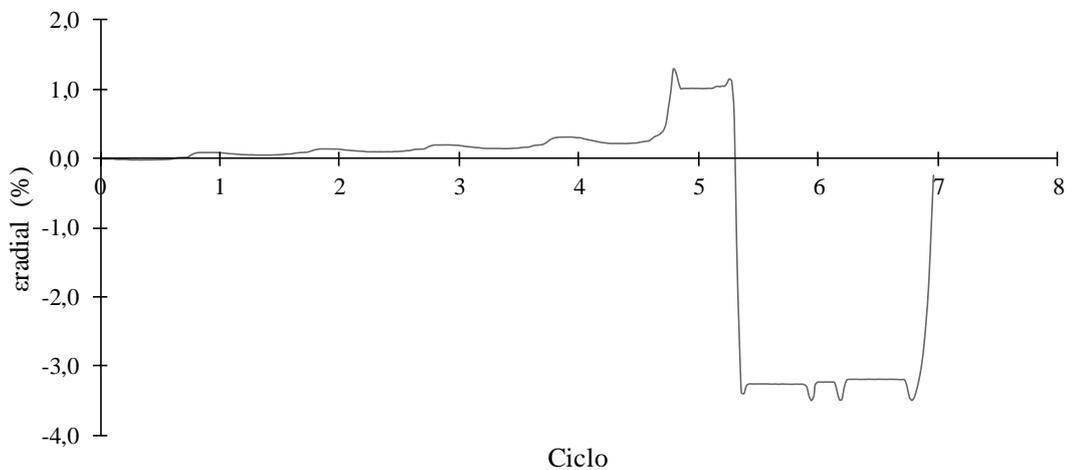
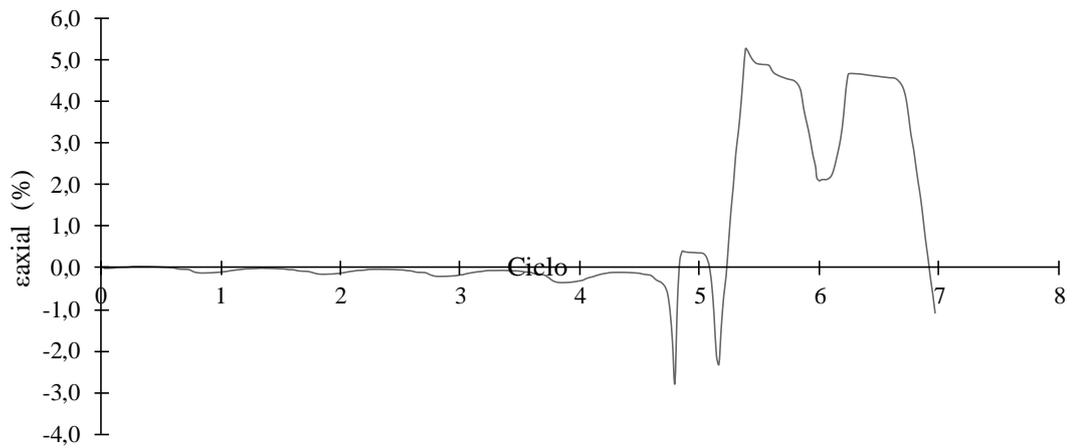
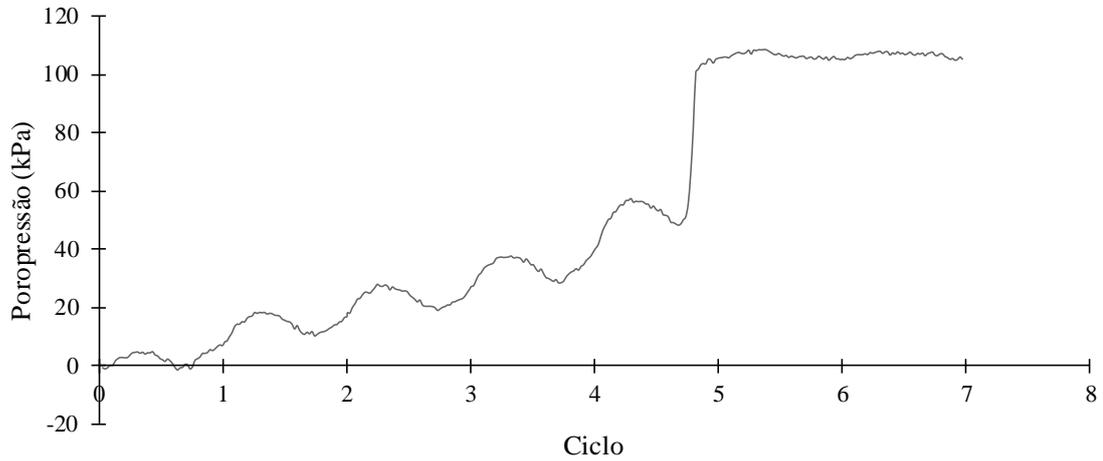
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|---|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolum após consolidação | 5,223 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2420 g | Nf | 6 ciclos |
| Varição teor de umidade | 0,15 % | | |
| Varição diâmetro | 0 mm | | |
| Varição altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,481 g/cm ³ | | |



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 40 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 14/01/2016 |
| Código ensaio | A_50_100_40 |

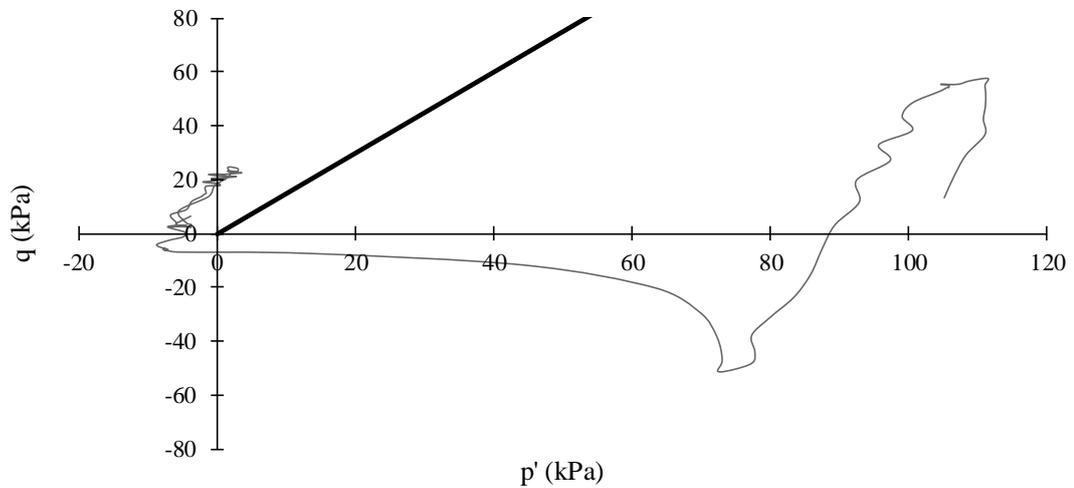
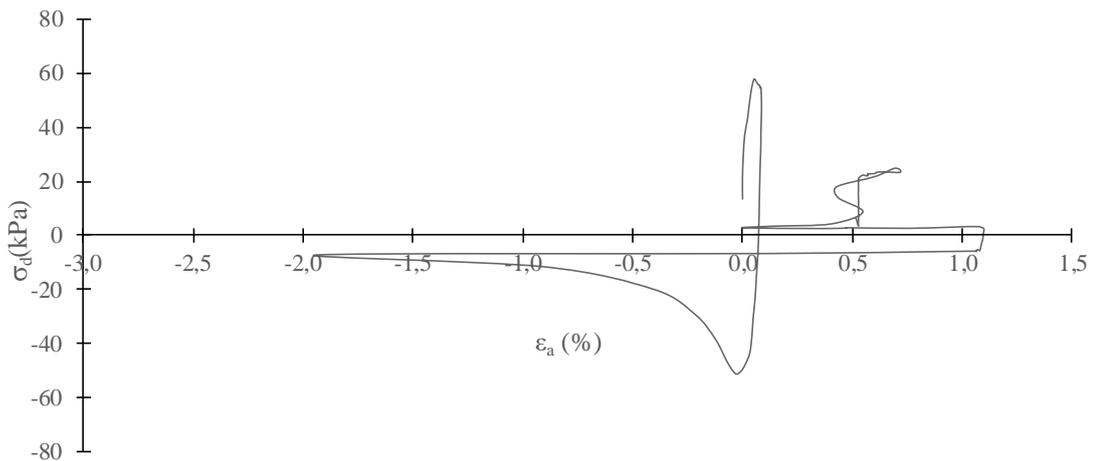
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 8/01/2016 |
| Código ensaio | A_50_100_60 |

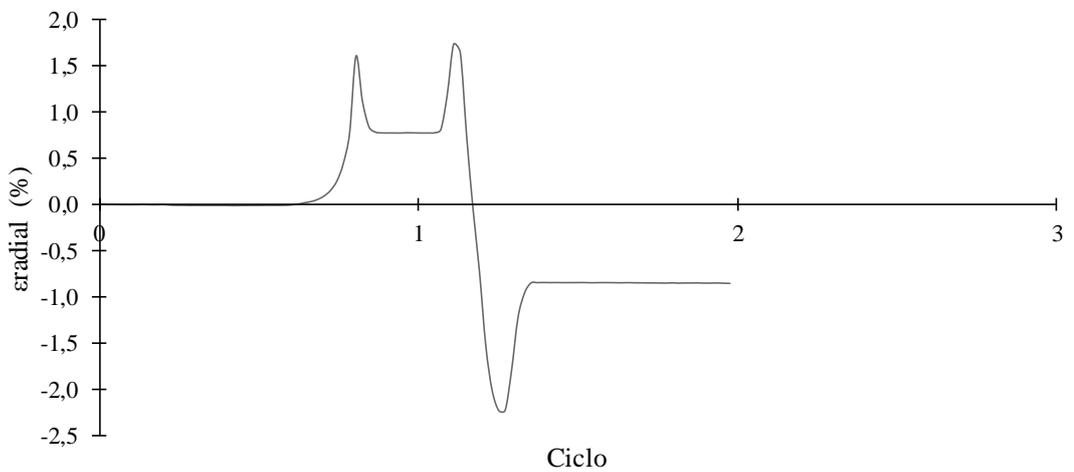
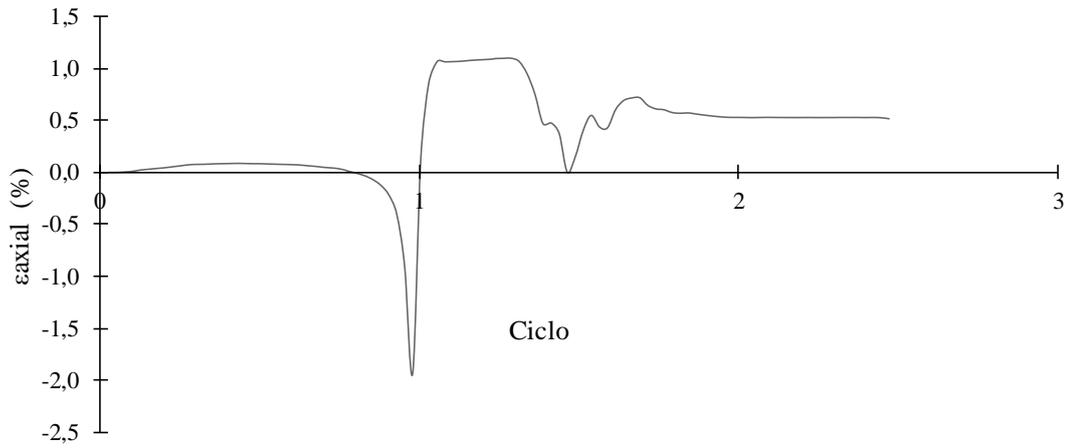
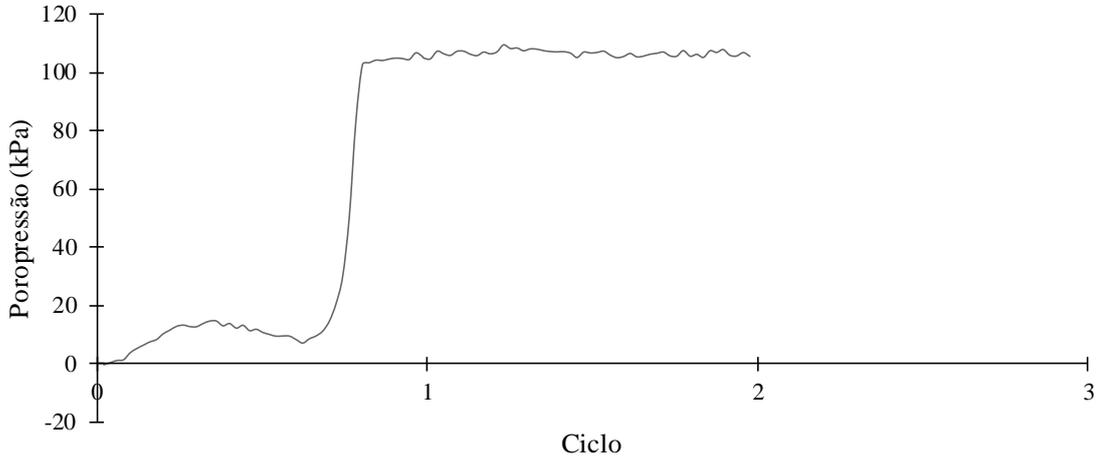
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 5,658 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2440 g | Nf | 1 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,30 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,491 g/cm ³ | | |



| | |
|---|-------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 8/01/2016 |
| Código ensaio | A_50_100_60 |

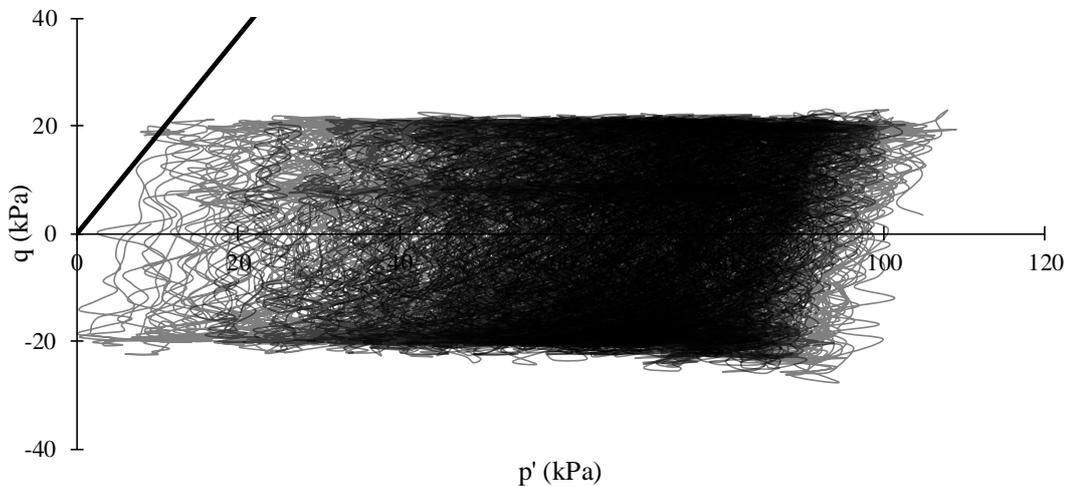
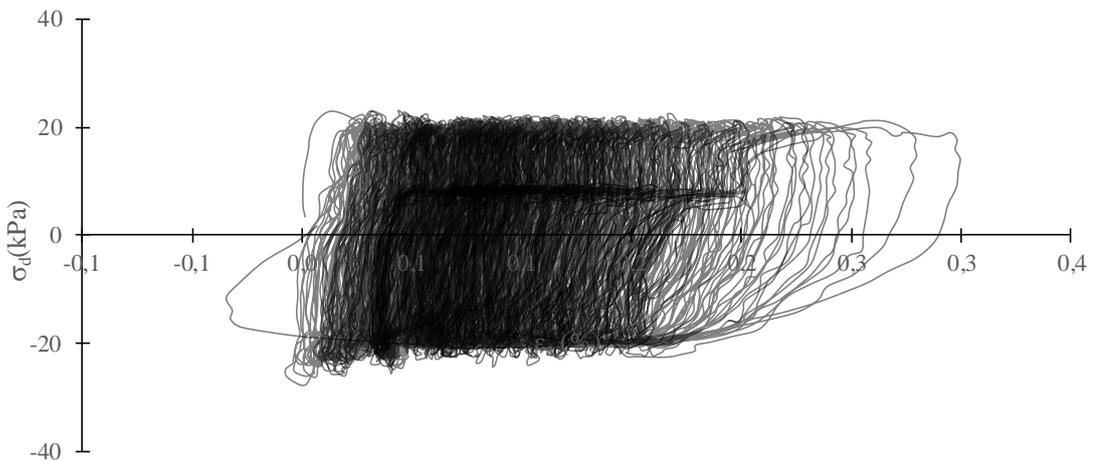
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 20 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 11/04/2016 |
| Código ensaio | AF_50_100_20 |

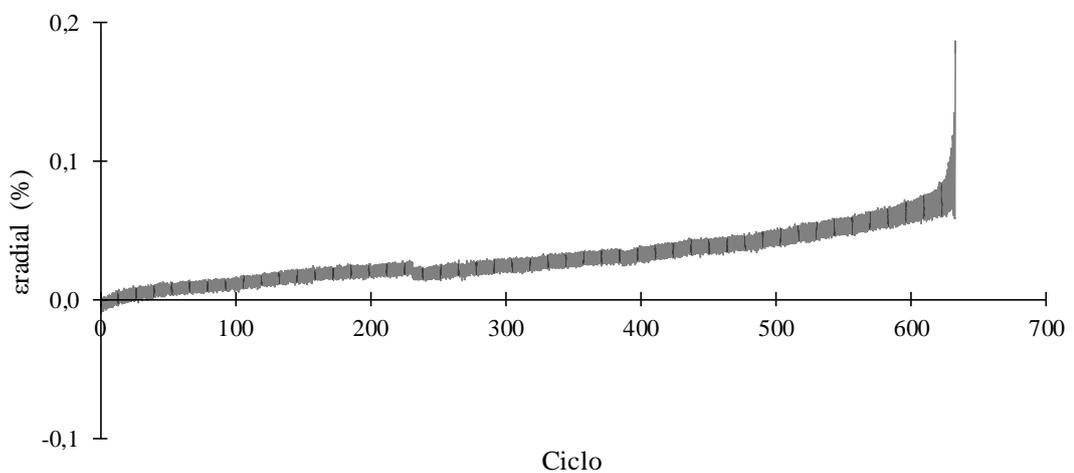
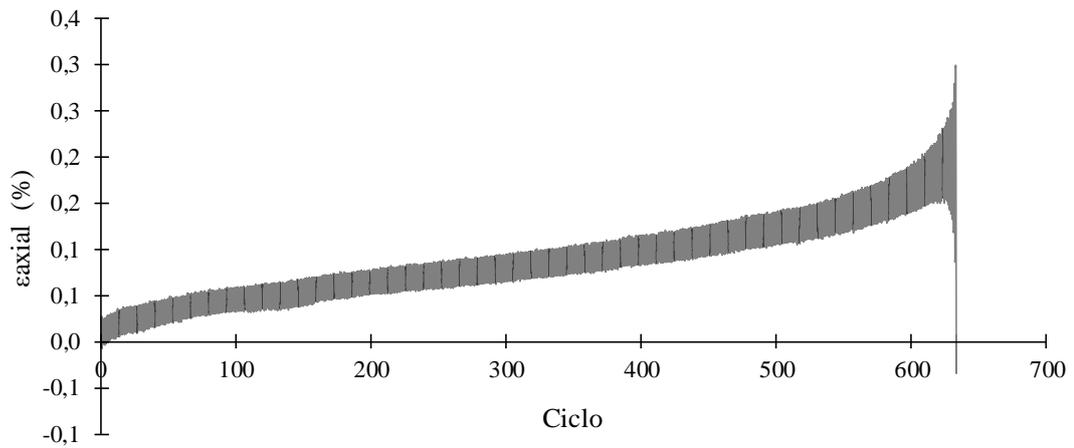
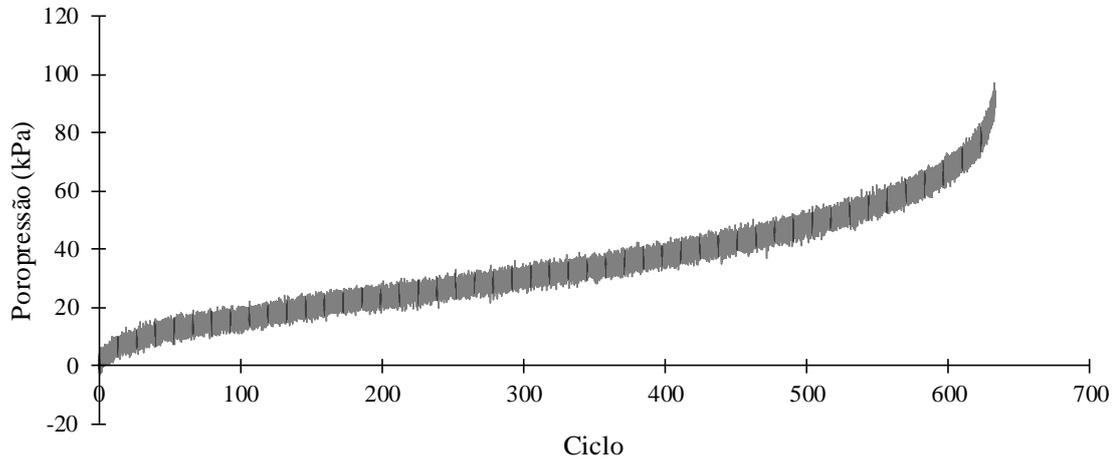
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 6,310 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | Nf | 635 ciclos |
| Massa CP úmido | 2410 g | | |
| Variação teor de umidade | 0,35 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,472 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 20 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 11/04/2016 |
| Código ensaio | AF_50_100_20 |

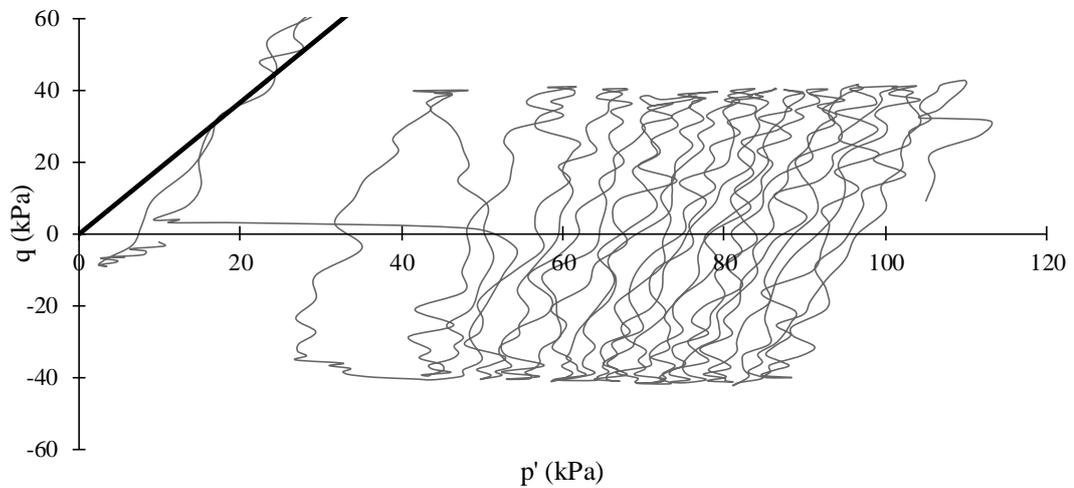
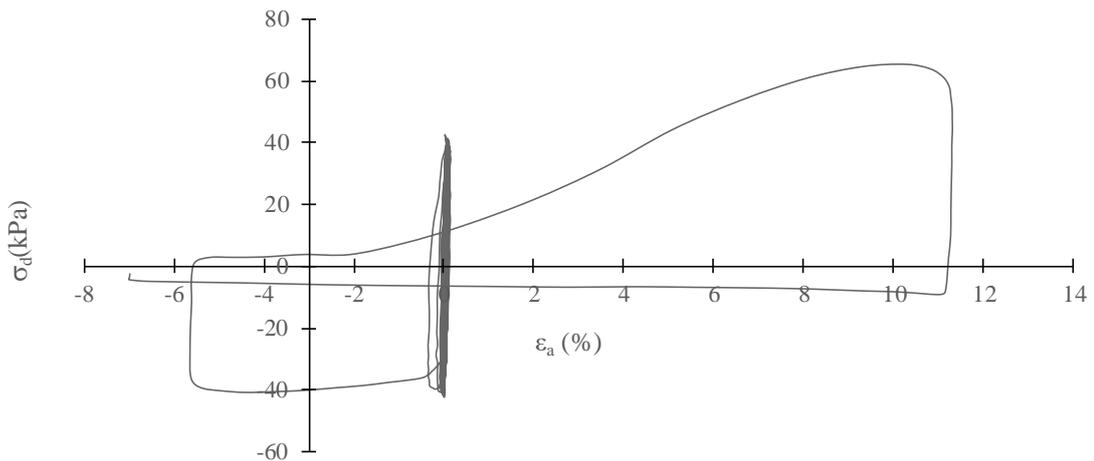
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 40 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 4/04/2016 |
| Código ensaio | AF_50_100_40 |

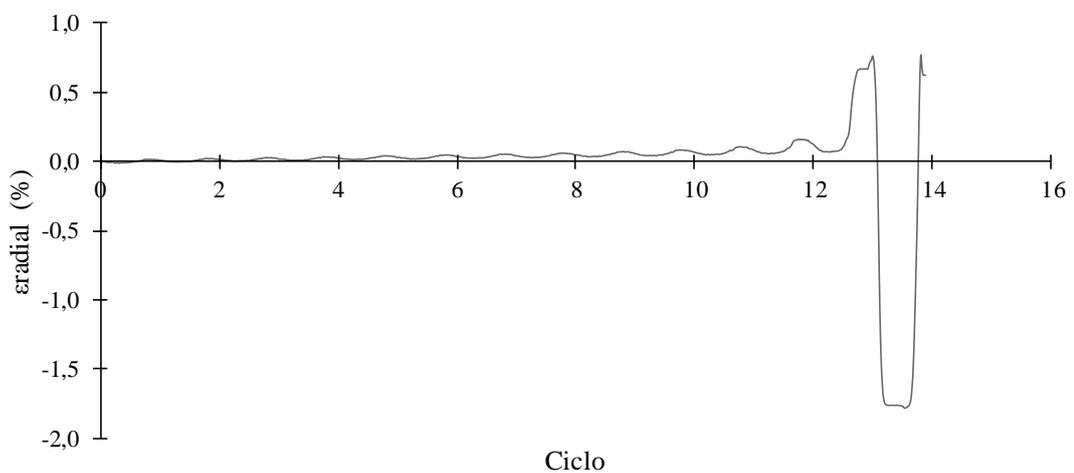
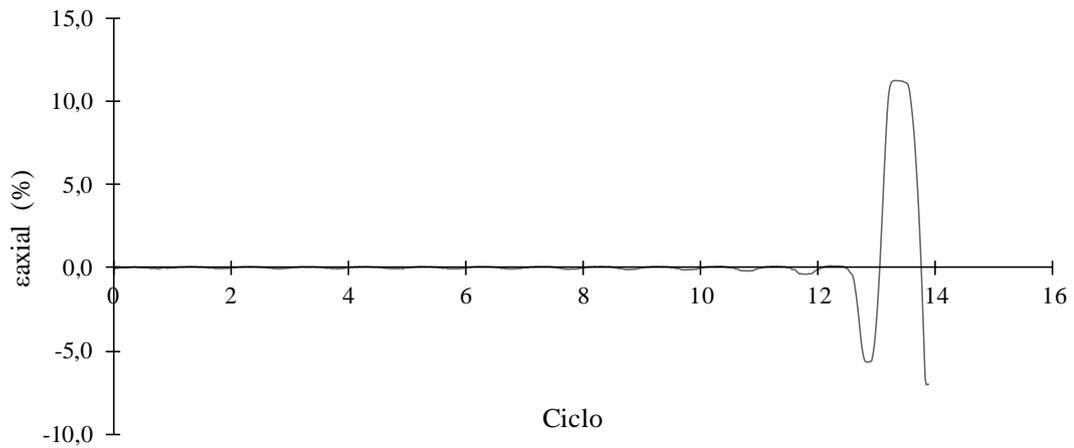
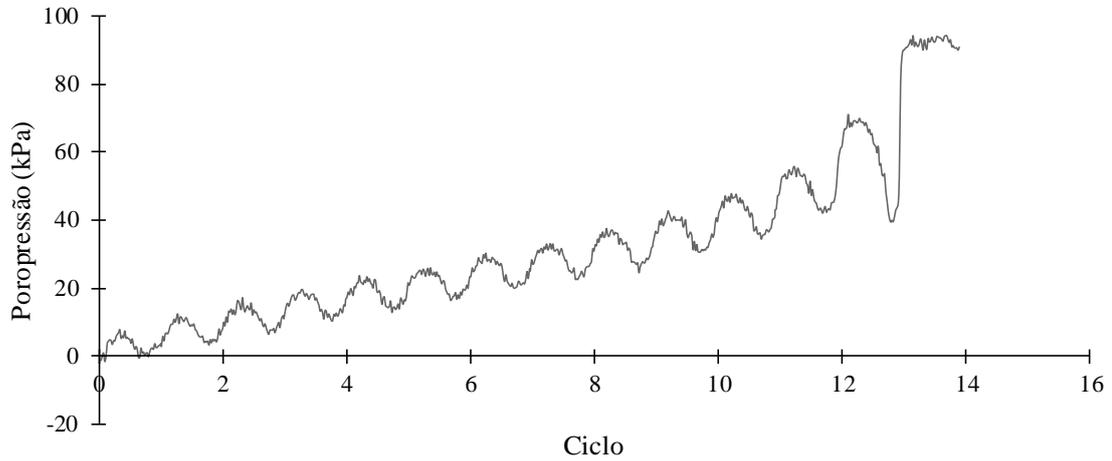
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 6,214 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2430 g | Nf | 14 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,33 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,485 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 40 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 4/04/2016 |
| Código ensaio | AF_50_100_40 |

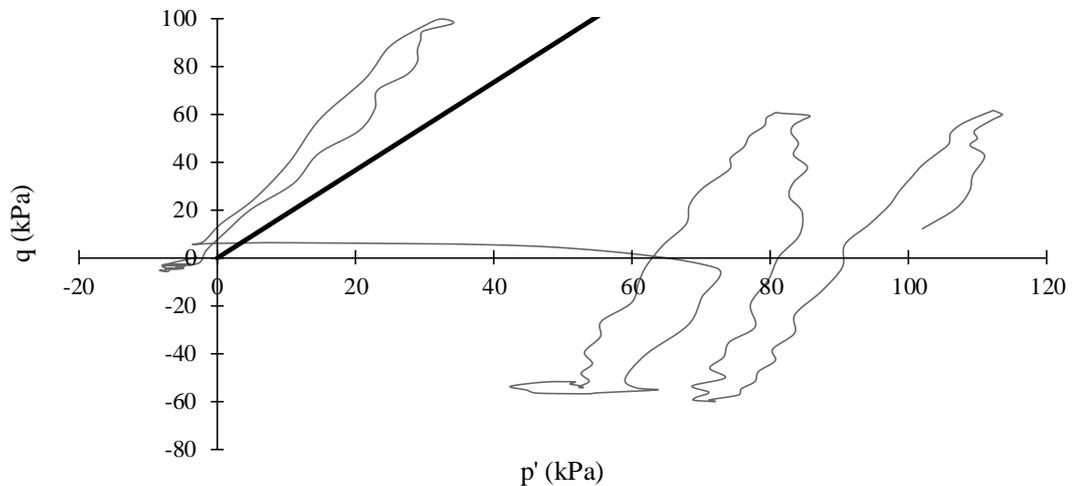
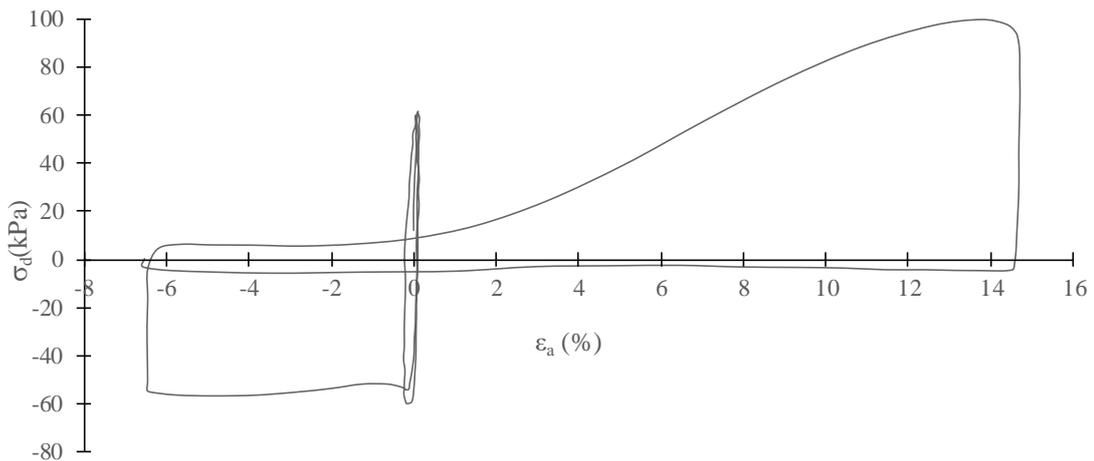
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 7/04/2016 |
| Código ensaio | AF_50_100_60 |

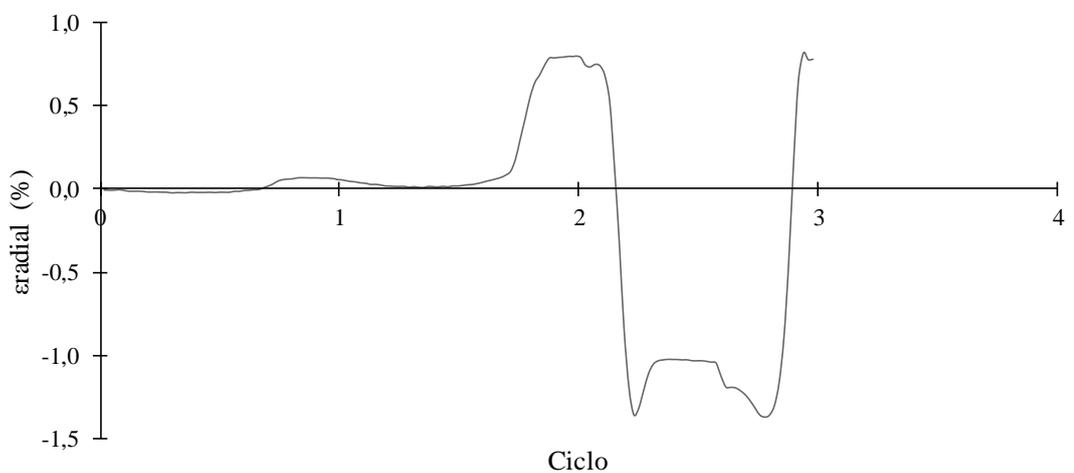
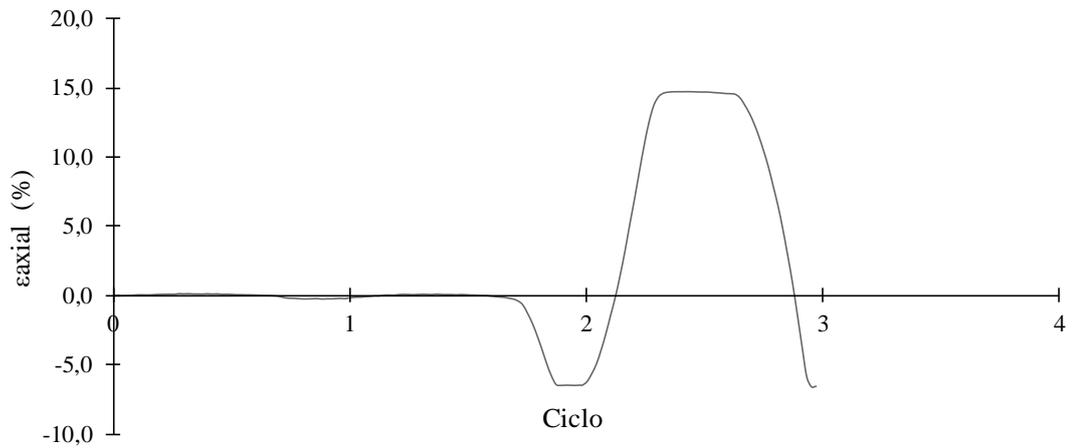
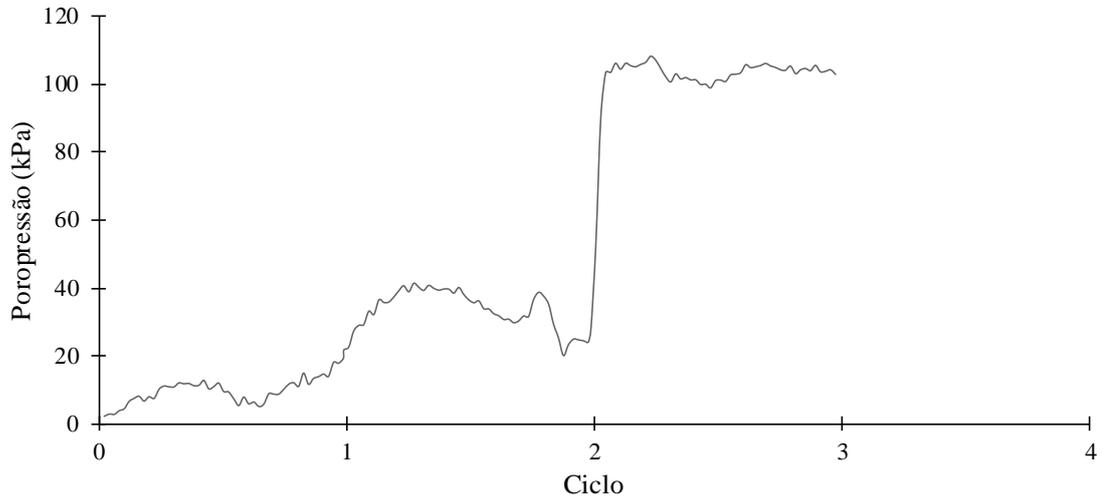
| | |
|---------------|------------|
| Página | 1/2 |
|---------------|------------|

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|
| Diâmetro corpo de prova | 9,88 cm | Δvolume após consolidação | 10,105 cm ³ |
| Altura corpo de prova | 19,35 cm | | |
| Teor de fibra | 0,5 % | | |
| Teor de umidade alvo | 10 % | | |
| Massa CP úmido | 2410 g | Nf | 3 ciclos |
| Variação teor de umidade | 0,17 % | | |
| Variação diâmetro | 0 mm | | |
| Variação altura | 0 mm | | |
| γseco obtido | 1,475 g/cm ³ | | |



| | |
|---|--------------|
| Índice de vazios | 0,75 |
| Tensão efetiva inicial | 100 kPa |
| Tensão desvio cíclica (\pm) | 60 kPa |
| Frequência | 0,1 Hz |
| Data do ensaio | 7/04/2016 |
| Código ensaio | AF_50_100_60 |

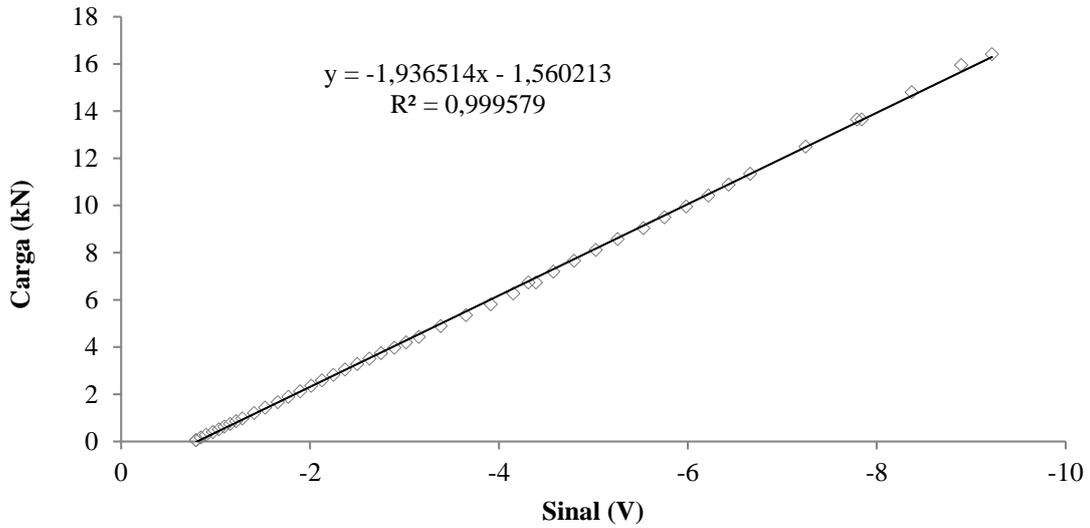
| | |
|---------------|------------|
| Página | 2/2 |
|---------------|------------|



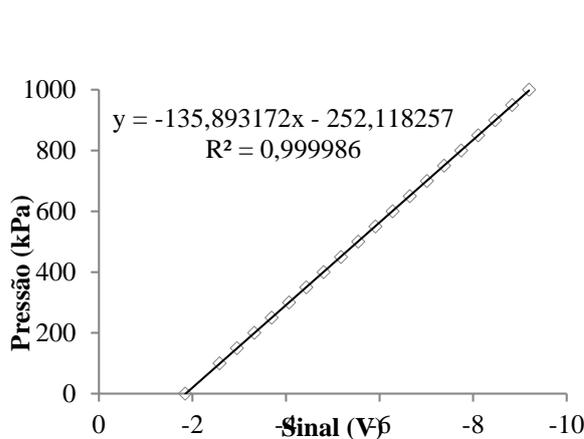
APÊNDICE B. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

- CÉLULA DE CARGA.
- TRANSDUTORES DE PRESSÃO.
- MEDIDOR DE VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA
- MEDIDORES DE DESLOCAMENTO

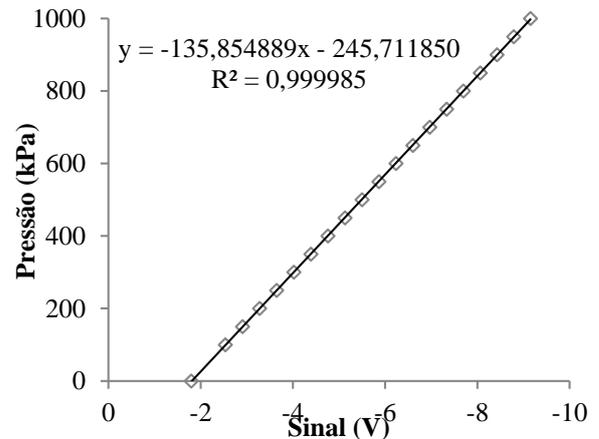
- **Célula de carga**



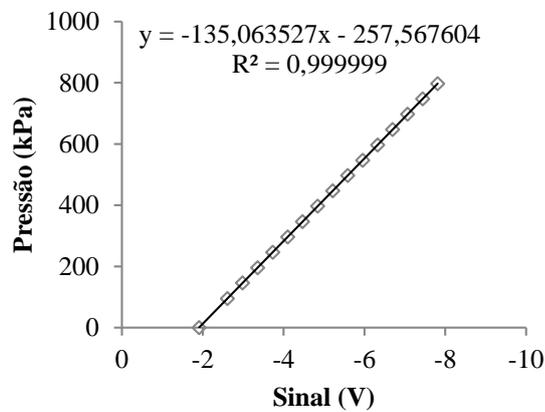
- **Transdutores de pressão**



(a) Pressão confinante

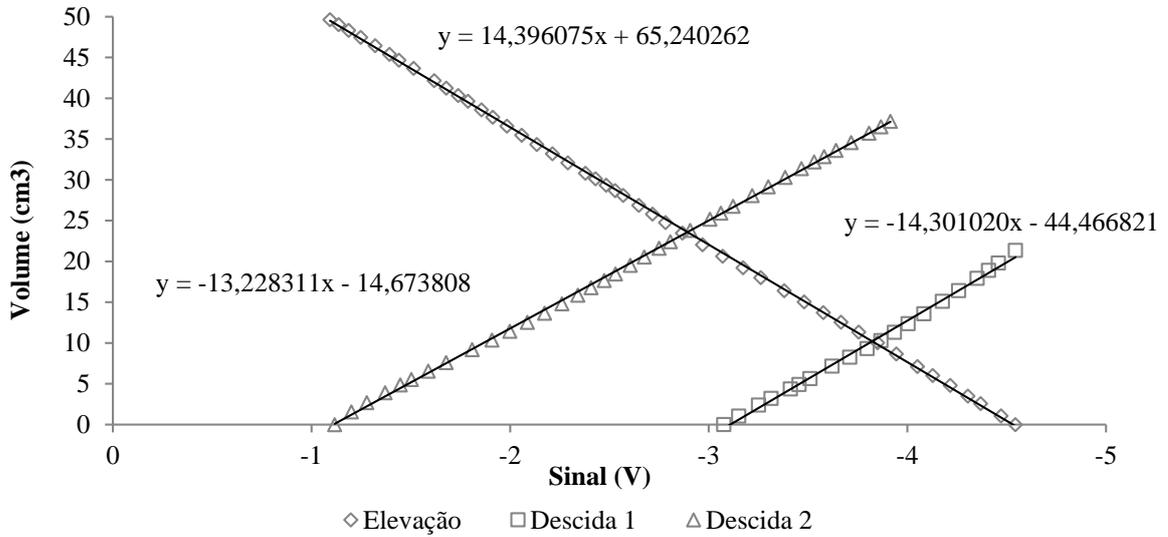


(b) Contrapressão - Base

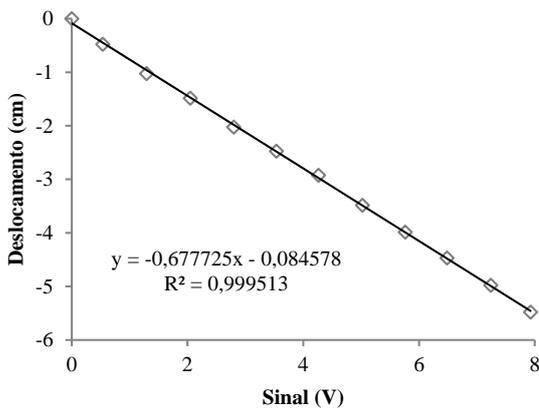


(c) Contrapressão - Topo

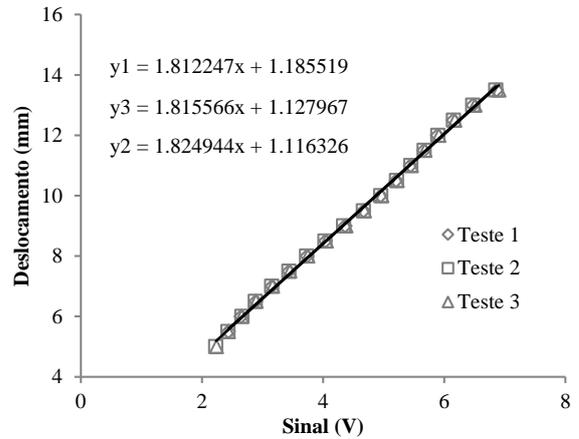
- **Medidor de variação volumétrica**



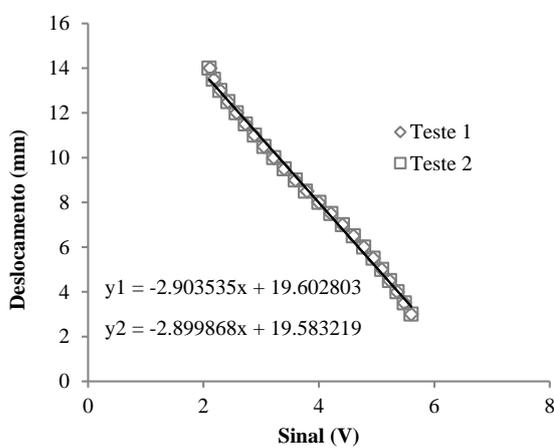
- **Medidores de deslocamento**



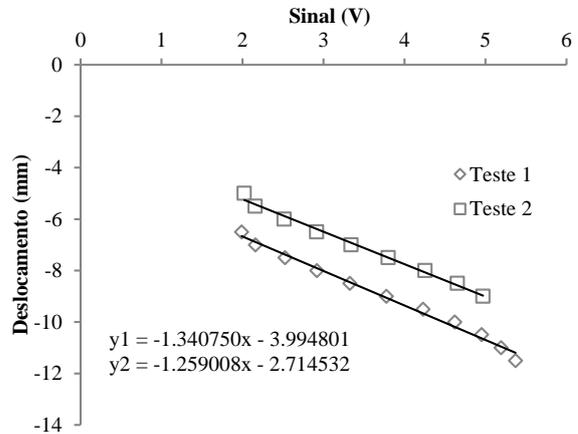
(a) Axial Externo



(b) Axial Interno 01 (1,566388)



(c) Axial Interno 02 (2,901702)



(d) Radial (1,339170)