



Rodman Raúl Córdova Rodríguez

**Desenvolvimento de um Equipamento para a Determinação
da Resistência ao Cisalhamento Direto de
Descontinuidades não Preenchidas de Rochas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
Co-orientadora: Prof.^a Raquel Quadros Velloso

Rio de Janeiro

Março de 2018



Rodman Raúl Córdova Rodríguez

**Desenvolvimento de um Equipamento para a Determinação
da Resistência ao Cisalhamento Direto de
Descontinuidades não Preenchidas em Rochas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof.^a Raquel Quadros Velloso

Co-Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Flávio de Andrade Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Antonio Claudio Soares

CENPES – Petrobras

Prof. Márcio Fernandes Leão

Departamento de Geologia – UFRJ

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 7 de março de 2018

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Rodman Raúl Córdova Rodríguez

Graduou-se em Engenharia Civil pela Escola Militar de Engenharia Mscal. Antonio José De Sucre (La Paz – Bolívia) em 2009. Realizou um Mestrado Scientiarum em Engenharia Civil Estrutural e Especializações em Engenharia Civil em 2015. Trabalhou em projetos da prefeitura da cidade de La Paz e do governo da Bolívia, além de obras privadas no período 2009-2015. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro no semestre 2016.1, atuando na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental e Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Córdova Rodríguez, Rodman Raúl

Desenvolvimento de um equipamento para a determinação da resistência ao cisalhamento direto de descontinuidades não preenchidas de rochas/ Rodman Raul Cordova Rodriguez ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr ; co-orientadora: Raquel Quadros Velloso. – 2018.

135 f. : il. (color.); 30 cm

Dissertação (Mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Equipamento de cisalhamento direto. 3. Descontinuidades 4. Resistencia ao cisalhamento direto. 5. Rugosidade. 6. Ensaio de laboratório I. Vargas Júnior., Eurípedes A. II. Velloso, Raquel Quadros. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Dedico o trabalho à minha amada família: aos meus pais Raúl e Jessie, às minhas irmãs Jessica e Maria Fernanda, à minha sobrinha Luana, ao meu cunhado Carlos e a meu querido e lembrado tio †Alberto Rodriguez. A todos eles pelo amor, confiança e apoio que me deram durante toda a minha vida.

Agradecimentos

A Deus, por ser a luz que guia minha vida e por me permitir esta realização;

Aos meus orientadores, professor Eurípedes do Amaral Vargas Jr. e professora Raquel Quadros Velloso, pela orientação, apoio e sugestões sem os quais eu não teria concluído este trabalho;

Ao departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e aos professores do Mestrado de Geotecnia pelos conhecimentos transmitidos;

À minha família, em especial aos meus pais, pelos valores ensinados e pela ajuda constante para cumprir meus objetivos, às minhas irmãs, minha sobrinha e meu cunhado, que sempre me impulsionaram e por todo o carinho recebido;

Agradeço à minha namorada Juliana, principalmente por fazer parte da minha vida, pelo amor, por todo o incentivo, confiança, apoio e sugestões acertadas;

A João M. Mendonça, pela amizade e a grande ajuda no desenvolvimento do equipamento e realização de ensaios;

Ao Dario Prada, pela importante ajuda no desenho e desenvolvimento do equipamento;

Ao pessoal do laboratório de estruturas da PUC-Rio, pela ajuda na montagem e realização de ensaios.

Aos colegas da PUC-Rio, que fizeram com que a adaptação ao ambiente do mestrado fosse o melhor possível e pelos momentos compartilhados;

Aos meus amigos, Erland Gonzalez, Gerson Ortiz, Rodrigo Tamayo, Arthur Santos Coelho, Jhonatan García, Lizardo Romero, Celso Salvador, Paul Pinedo, Jainor Cabrera, Kevin Calvay, Judith Ramos, Carlo Aguinda, Andrea Vecci, Ana Luiza Rossini, pelo agradável ambiente de convívio, pelo apoio e principalmente pela amizade recebidos.

A todos os que prestaram sua contribuição de modo direto ou indireto;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo de mestrado.

Resumo

Córdova Rodríguez, Rodman Raúl; Do Amaral Vargas Jr., Eurípedes; Quadros Velloso, Raquel. **Desenvolvimento de um equipamento para a determinação da resistência ao cisalhamento direto de descontinuidades não preenchidas de rochas**. Rio de Janeiro, 2018. 135p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A resistência ao cisalhamento de descontinuidades é fortemente influenciada pela rugosidade e pela tensão normal aplicada, além de outras propriedades das descontinuidades. A sua avaliação é de vital importância nos projetos de escavações subterrâneas, estabilidade de taludes, túneis, fundações e outros tipos de obras da engenharia em rochas. O propósito principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um equipamento de cisalhamento direto convencional que permite avaliar a resistência ao cisalhamento em descontinuidades de rochas sem preenchimento, em escala de laboratório. A força normal e a força cisalhante foram aplicadas através de atuadores hidráulicos servo controlados. Encontram-se acoplados nos atuadores os dispositivos para medir cargas e deslocamentos verticais e horizontais. O controlador de aquisição de dados converte os sinais mecânicos e elétricos em dados digitais. Os dados foram registrados nos intervalos desejados num computador. Foram feitos ensaios de cisalhamento em juntas artificiais e naturais de dois tipos de gnaiss, o Microclina Gnaiss e o Plagioclásio biotita hornblenda gnaiss. Os resultados obtidos apresentaram uma variação no padrão da rugosidade, com uma diminuição da dispersão com o aumento da escala das amostras, as juntas naturais apresentaram uma dispersão maior nos resultados do que as juntas artificiais. Os parâmetros de resistência obtidos experimentalmente foram então comparados, com os parâmetros de resistência obtidos através do método empírico de Barton & Choubey (1977) e também com dados encontrados na bibliografia. Os resultados mostram-se satisfatórios, validando o equipamento desenvolvido.

Palavras-chave

Equipamento de cisalhamento direto; descontinuidades; resistência ao cisalhamento; rugosidade; ensaios de laboratório.

Abstract

Córdova Rodríguez, Rodman Raúl; Do Amaral Vargas Jr., Eurípedes (Advisor); Quadros Velloso, Raquel. (Co-advisor). **Development of an equipment to determine the direct shear strength of unfilled rock discontinuities.** Rio de Janeiro, 2018. 135p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The shear strength of discontinuities is strongly influenced by the roughness and the normal stress applied, as well as other properties of the discontinuities. Their assessment is of vital importance in underground excavation projects, slope stability, tunnels, foundations and other types of rock engineering activities. The main purpose of this work was the development of a conventional direct shear equipment to determine the shear strength of unfilled rock discontinuities at laboratory scale. Normal force and shear force were applied with servo controlled hydraulic actuators. The devices for measuring loads and vertical and horizontal displacements are coupled to the actuators. The data acquisition controller converts the mechanical and electrical signals into digital data. The data was recorded at the desired intervals on a computer. Shear tests were performed on artificial and natural joints of two types of gneiss, the Microcline gneiss and the Plagioclase biotite hornblende gneiss, common rocks in the southern region of Rio de Janeiro city. The results showed a variation in the roughness pattern, with a decrease of the dispersion with the increase of the samples size, the natural joints presented a greater dispersion in results than the artificial joints. The resistance parameters obtained experimentally were then compared with the resistance parameters obtained through the empirical method of Barton and Choubey (1977) and also with data found in the literature. The results obtained are satisfactory, validating the developed equipment.

Keywords

Direct shear strength equipment; discontinuities; shear strength; roughness; laboratory testing.

Sumário

1	Introdução	16
1.1.	Objetivos	17
1.2.	Estrutura da dissertação	18
2	Revisão Bibliográfica	19
2.1.	Considerações iniciais	19
2.2.	Características das descontinuidades	20
2.3.	A resistência ao cisalhamento de descontinuidades	22
2.4.	Comportamento durante o cisalhamento	24
2.5.	Critérios de resistência de descontinuidades	26
2.5.1.	Critério de Mohr-Coulomb	26
2.5.2.	Critério de Patton	27
2.5.3.	Modelo de Barton e Bandis	29
2.5.3.1.	Caracterização da rugosidade	32
2.5.3.2.	Resistência à compressão da parede de uma descontinuidade	34
2.6.	Procedimento do ensaio de cisalhamento direto	35
2.7.	Efeito de escala	41
2.8.	Considerações finais	42
3	Desenvolvimento do Equipamento	44
3.1.	Considerações iniciais	44
3.2.	Concepção do equipamento de cisalhamento direto	45
3.3.	Estrutura do equipamento	45
3.4.	Caixas de cisalhamento	53
3.5.	Sistema de aplicação da força cisalhante	59
3.6.	Sistema de aplicação da força normal	60
3.7.	Registro e aquisição de dados	60
4	Programa experimental	62
4.1.	Considerações iniciais	62

4.2. Materiais	62
4.2.1. Localização	62
4.2.2. Caracterização de amostras	63
4.3. Caracterização da rugosidade	68
4.4. Determinação da resistência na superfície da descontinuidade	70
4.5. Procedimento do ensaio	71
4.5.1. Amostragem	72
4.5.2. Preparação das amostras	72
4.5.3. Montagem das amostras	73
4.5.4. Metodologia de ensaio	78
4.5.5. Dados do ensaio	81
5 Apresentação e análise dos resultados	82
5.1. Resistência ao cisalhamento	82
6 Conclusões e sugestões	99
6.1. Conclusões	99
6.2. Sugestões	100
Referências bibliográficas	103
Apêndice I	108

Lista de Figuras

Figura 2.1: Vista esquemática das principais características de descontinuidades (modificado - Hudson & Harrison, 1997)	22
Figura 2.2: Fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento de descontinuidades (modificado - Hencher & Richards, 2014)	22
Figura 2.3: Representação das envoltórias de resistência de pico e residual (ISRM. Muralha et al., 2013)	24
Figura 2.4: Comportamento ao cisalhamento das descontinuidades (modificado - Goodman, 1980)	25
Figura 2.5: Critério bilinear de Patton	28
Figura 2.6: Perfis de rugosidade e seu valor JRC (Barton & Choubey, 1977)	32
Figura 2.7: Ábaco de Miller (1965, apud Barton e Choubey, 1977)	35
Figura 2.8: Análise de tensões no plano de cisalhamento	40
Figura 2.9: Efeito de escala na resistência ao cisalhamento de descontinuidades (Modificado – Bandis, 1990)	41
Figura 3.1: Vista esquemática do desenho do equipamento de cisalhamento direto	46
Figura 3.2: Detalhe da base do equipamento de cisalhamento direto	47
Figura 3.3: Vista da estrutura do equipamento de cisalhamento direto	47
Figura 3.4: Esquema da montagem do equipamento de cisalhamento direto	48

Figura 3.5: Vista esquemática em planta da estrutura do equipamento (medidas em mm)	49
Figura 3.6: Vista esquemática lateral da estrutura do equipamento de cisalhamento direto (medidas em mm)	50
Figura 3.7: Vista esquemática posterior da estrutura do equipamento de cisalhamento direto (medidas em mm)	50
Figura 3.8: Equipamento de cisalhamento direto construído	51
Figura 3.9: Vista posterior do equipamento de cisalhamento	52
Figura 3.10: Equipamento de cisalhamento direto em andamento de ensaio	53
Figura 3.11: a) Desenho da caixa superior de cisalhamento, b) Desenho da caixa inferior de cisalhamento, c) Desenho das caixas superior e inferior de cisalhamento e vista esquemática da argamassa para preencher as amostras	54
Figura 3.12: Desenho da caixa superior de cisalhamento (medidas em milímetros e sem escala): a) Vista em planta, b) Vista lateral, c) Vista frontal e d) Vista isométrica	55
Figura 3.13: Desenho caixa inferior de cisalhamento (medidas em milímetros e sem escala): a) Vista lateral, b) Vista frontal, c) Vista em planta, d) Vista isométrica	56
Figura 3.14: Desenho da tampa lateral da caixa inferior de cisalhamento (medidas em milímetros e sem escala): a) Vista frontal e espessura, b) Vista em planta, c) Vista isométrica	57
Figura 3.15: Caixas de cisalhamento, no processo de secagem da argamassa	57
Figura 3.16: Caixas de cisalhamento, durante um teste em andamento	58
Figura 3.17: Caixas de cisalhamento, pouco antes de um ensaio de cisalhamento	58

Figura 3.18: Sistema de redução de atrito	59
Figura 3.19: Vista esquemática do sistema de registro e aquisição de dados	61
Figura 4.1: Mapa Geológico simplificado da Região Sul do Rio de Janeiro (Da Silva, 2001). Legenda: Círculo branco indica aproximadamente a localização do túnel do Joá, com Biotita Gnaiss, Gnaiss facoidal, etc.	63
Figura 4.2: Amostras de rocha tipo microclina gnaiss facoidal	65
Figura 4.3: Amostra de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss (Sampaio, 2017)	66
Figura 4.4: Processo de obtenção de amostras artificiais, através do ensaio de carga pontual: a) Equipamento do ensaio, b) Junta artificial gerada de microclina gnaiss Hx, c) Amostra de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss Nx, d) Junta artificial gerada de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.	67
Figura 4.5: Obtenção de perfis de rugosidade das amostras das rochas tipo microclima gnaiss facoidal	68
Figura 4.6: Obtenção de perfis de rugosidade das amostras das rochas tipo plagioclásio biotita hornblenda gnaiss	69
Figura 4.7: Espessura da zona de cisalhamento e a altura das caixas de cisalhamento	73
Figura 4.8: Tipos de amostras: a), b), c) e d) Amostras Hx de microclina gnaiss facoidal com juntas naturais, e) e f) Amostras Nx de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss com juntas artificiais, g) e h) Amostra Hx de microclina gnaiss com juntas artificial.	75
Figura 4.9: O grampo fabricado: a) O grampo segurando a amostra, b) A amostra posicionada na caixa inferior de cisalhamento, antes de colocar a argamassa e c) Depois de colocar argamassa	76
Figura 4.10: Arame para amarrar as duas partes da amostra	77

Figura 4.11: Montagem das amostras: a) Placa de isopor removida, b) Arame e fita cortados e c) Colocação do sistema de redução de atrito	78
Figura 4.12: Programação da metodologia do ensaio	80
Figura 4.13: Vista em planta da amostra 1Hx de microclina gnaïsse facoidal: a) Antes do ensaio de cisalhamento, e b) Depois do ensaio de cisalhamento	81
Figura 5.1: Comportamento ao cisalhamento da amostra 4Nx de microclina gnaïsse facoidal	82
Figura 5.2: Comportamento ao cisalhamento da amostra 5Hx de microclina gnaïsse facoidal	83
Figura 5.3: Comportamento ao cisalhamento da amostra 1Nx de plagioclásio biotita hornblenda gnaïsse	83
Figura 5.4: Envoltória de tensão cisalhante pico versus tensão normal, resultados de todos os ensaios de microclina gnaïsse facoidal	87
Figura 5.5: Envoltória de resistência ao atrito básico, dados de todos os ensaios com amostras de microclina gnaïsse facoidal	87
Figura 5.6: Envoltória de tensão cisalhante pico versus tensão normal, resultados de todos os ensaios de plagioclásio hornblenda gnaïsse	88
Figura 5.7: Envoltória de resistência ao atrito básico dos ensaios de cisalhamento direto de plagioclásio hornblenda gnaïsse	89
Figura 5.8: Comparação da dispersão de dados entre amostras com juntas naturais e juntas serradas	89
Figura 5.9: Tilt test para a obtenção de ângulo de atrito básico.	91
Figura 5.10: <i>Tilt test</i> (ângulo de atrito pico): a) amostra 2Nx plagioclásio hornblenda gnaïsse, b) amostra 2Hx microclina gnaïsse facoidal	93
Figura 5.11: Resultados da amostra 1Nx Microclina gnaïsse facoidal	94
Figura 5.12: Resultados da amostra 2Nx Microclina gnaïsse facoidal	94

Figura 5.13: Resultados da amostra 3Nx Microclina gnaïsse facoidal	94
Figura 5.14: Resultados da amostra 4Nx Microclina gnaïsse facoidal	95
Figura 5.15: Resultados da amostra 1Hx Microclina gnaïsse facoidal	95
Figura 5.16: Resultados da amostra 2Hx Microclina gnaïsse facoidal	95
Figura 5.17: Resultados da amostra 3Hx Microclina gnaïsse facoidal	96
Figura 5.18: Resultados da amostra 4Hx Microclina gnaïsse facoidal	96
Figura 5.19: Resultados da amostra 5Hx Microclina gnaïsse facoidal	96
Figura 5.20: Resultados da amostra 1Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaïsse	97
Figura 5.21: Resultados da amostra 2Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaïsse	97
Figura 5.22: Resultados da amostra 3Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaïsse	97
Figura 5.23: Resultados da amostra 4Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaïsse	98
Figura 5.24: Resultados da amostra 5Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaïsse	98

Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Ângulos de atrito básicos de juntas naturais (Modificado - Hencher e Richards, 2014)	40
Tabela 3-1: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na construção do equipamento	44
Tabela 3-2: Detalhe dos perfis utilizados na construção do equipamento de cisalhamento direto	48
Tabela 3-3: Peças da estrutura do equipamento de cisalhamento direto	49
Tabela 3-4: Peças da estrutura do equipamento de cisalhamento direto	52
Tabela 3-5: Peças da caixa de cisalhamento direto	55
Tabela 4-1: Graus de alteração (IPT, 1984 apud Castro, 2016)	64
Tabela 4-2: Tipo de descontinuidade das amostras estudadas	68
Tabela 4-3: Valores do ângulo médio de inclinação das asperezas (i_{lab}) e valores de JRC a partir do parâmetro R_p (JRC_{R_p}) e por comparação com os perfis de Barton & Choubey (JRC_{perfis})	69
Tabela 4-4: Medidas esclerométricas das amostras ensaiadas	70
Tabela 4-5: Resistência média à compressão simples das amostras	71
Tabela 4-6: Descrição das tensões normais aplicadas nos ensaios realizados em MPa.	79
Tabela 5-1: Comparação dos resultados obtidos com outros dados	90
Tabela 5-2: Resultados de ângulos de atrito básicos das amostras	91
Tabela 5-3: Resultados de JRC e valores do ângulo de atrito pico (θ_p)	92

1 Introdução

Shrivastava & Rao (2015) afirmam que as rochas em geral são heterogêneas e as discontinuidades são partes inevitáveis dos maciços rochosos. As discontinuidades se apresentam no maciço rochoso em diferentes escalas, tais como juntas, falhas, planos de estratificação, fissuras, microfissuras ou outras fraturas planares recorrentes. Na construção civil em engenharia de rochas, a deformação de um maciço rochoso é controlada principalmente pelo comportamento das discontinuidades.

A resistência ao cisalhamento de discontinuidades pode ser avaliada tanto em campo como em laboratório, sendo os testes de campo muito mais caros. Por outro lado, na literatura existem métodos empíricos para determinar a resistência ao cisalhamento de juntas como o método de Barton (1973), além da própria experiência dos projetistas. Porém essas metodologias podem dar origem a erros consideráveis, pois os valores das resistências ao cisalhamento das discontinuidades das rochas podem ser extremamente variáveis, devido a processos geológicos muito variados durante a sua formação, sendo essa variabilidade maior do que a variabilidade dos valores de resistência ao cisalhamento dos solos.

Segundo Shrivastava & Rao (2012), a resistência ao cisalhamento de discontinuidades é frequentemente difícil de prever em grande parte devido à rugosidade. Além das discontinuidades, o comportamento de cisalhamento do maciço rochoso também é influenciado por vários parâmetros, como rugosidade das juntas, velocidade de cisalhamento, condição da junta, isto é, com preenchimento ou sem preenchimento, persistência das discontinuidades, além da própria magnitude da tensão normal aplicada.

A avaliação correta da resistência ao cisalhamento das juntas de rocha é importante para o projeto seguro e econômico de escavações subterrâneas, análise de estabilidade de encostas de rocha ancoradas ou livres, avaliação de risco de disposição de lixo subterrâneo e projeto de fundações sobre rocha (Rao et al., 2009).

O estudo apresentado nesta dissertação abrange o desenvolvimento de um equipamento de cisalhamento direto e a determinação das características de resistência de descontinuidades em amostras de microclina gnaiss facoidal e plagioclásio biotita hornblenda gnaiss do município do Rio de Janeiro.

A resistência ao cisalhamento das descontinuidades naturais e artificiais das amostras foi estudada em escala de laboratório para validar o equipamento desenvolvido, onde o comportamento ao cisalhamento das juntas das amostras foi estudado na condição de contorno com carga normal constante e sem restrição da dilatação durante o processo de cisalhamento. Este modo particular de cisalhamento é apropriado para estudar casos como encostas rochosas não reforçadas, escavações subterrâneas, etc.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um equipamento de cisalhamento direto convencional que possibilite a realização de ensaios de cisalhamento direto em descontinuidades de rochas, a fim de se obter a resistência ao cisalhamento das descontinuidades.

A partir do objetivo geral é necessário estabelecer os seguintes objetivos específicos para atingir os resultados desejados:

- Projetar e desenhar o equipamento para ensaios de cisalhamento direto em descontinuidades de rochas;
- Construir o equipamento e montá-lo no laboratório de Estruturas do departamento de Engenharia Civil da Puc-Rio;
- Instalar e adaptar os atuadores servo-hidráulicos (existentes) no equipamento de cisalhamento direto;
- Realizar a programação do procedimento de ensaios de cisalhamento direto no equipamento;
- Ensaiar amostras de rochas, avaliar os resultados desses ensaios e validar o equipamento desenvolvido.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, iniciando com este capítulo introdutório, o capítulo 1, em que se apresenta o tema fundamental do trabalho e os objetivos.

O capítulo 2, em que é apresentada uma revisão bibliográfica, compreende tópicos referentes aos principais assuntos abordados nesta pesquisa.

O capítulo 3 apresenta o detalhamento da concepção do projeto e da execução do equipamento de cisalhamento direto que foi desenvolvido para a realização deste trabalho.

O capítulo 4 descreve detalhadamente o programa experimental, em que é apresentada a metodologia e os procedimentos de ensaios no equipamento desenvolvido.

O capítulo 5 consiste na apresentação e análise dos resultados desenvolvidos na pesquisa.

O capítulo 6 apresenta as considerações finais deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações iniciais

O termo "descontinuidade", de acordo com a ASTM D5607 (2016), refere-se a qualquer plano de fraqueza relativa num maciço rochoso, que pode ocorrer em várias escalas tais como clivagem, falhas, juntas, microfissuras, planos de acamamento ou xistosidade.

As descontinuidades podem ser de origem antropogênica (ou seja, fraturas induzidas por explosão, pelos esforços ou por fraturamento hidráulico) ou de origem geológica (ou seja, falhas, foliações, planos de clivagem e xistosidade). As descontinuidades, independentemente da sua origem, desempenham um papel considerável no comportamento dos maciços rochosos e, conseqüentemente, nos projetos de engenharia envolvendo encostas, escavações na superfície e escavações subterrâneas como túneis ou cavernas (Muralha et al., 2013).

Hencher & Richards (2014) descrevem os conceitos dos termos relacionados à resistência ao cisalhamento de descontinuidades da seguinte maneira:

Ângulo de atrito básico: Representa somente a componente de atrito da resistência ao cisalhamento para uma descontinuidade relativamente plana, isto é, independente de qualquer elemento de rugosidade que cause dilatação durante o cisalhamento. O ângulo de atrito básico varia com a textura e mineralogia das superfícies da descontinuidade, e habitualmente não é igual ao ângulo de atrito residual de uma descontinuidade rugosa.

Coesão: No critério de resistência de Mohr-Coulomb, é a resistência ao cisalhamento quando a tensão normal é zero, e é independente do nível de tensão normal. Descontinuidades abertas de rochas (sem resistência à tração) não têm uma coesão verdadeira. A coesão verdadeira ocorre onde a descontinuidade possui alguma resistência à tração, por exemplo, onde a descontinuidade é incipiente ou

onde a mineralização secundária preenche por cimentação, por exemplo, as duas metades da descontinuidade.

Coesão aparente: É o valor da intercepção no eixo de tensão cisalhante gerado pela tangente da envoltória da resistência ao cisalhamento, num nível específico de tensão normal. Na obtenção do ângulo de atrito básico e do ângulo de atrito residual, a coesão aparente é geralmente nula.

Resistência ao cisalhamento de pico: É o valor máximo de tensão cisalhante na curva de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para um determinado valor de tensão normal.

Resistência ao cisalhamento residual: É a tensão no qual nenhum aumento ou queda na resistência ao cisalhamento é observada com o aumento do deslocamento horizontal.

2.2. Características das descontinuidades

As particularidades geométricas de descontinuidades são representadas esquematicamente na Figura 2.1, e são descritas abaixo:

Abertura: define-se como a distância perpendicular entre as superfícies rochosas adjacentes da descontinuidade. Este será um valor constante para superfícies adjacentes planas e paralelas, um valor de variação linear para superfícies adjacentes não paralelas, mas planas, e completamente variável para superfícies adjacentes ásperas (Hudson & Harrison, 1997).

Espaçamento: segundo Azevedo & Marques (2006), é definido como a distância perpendicular de separação entre descontinuidades adjacentes. Normalmente, este valor refere-se ao espaçamento médio dos valores medidos para as descontinuidades de uma mesma família.

Família de descontinuidade: refere-se ao agrupamento das descontinuidades em torno das orientações preferidas associadas aos mecanismos de formação. Por isso, é por vezes conveniente considerar o conceito de um conjunto de descontinuidades (que consiste em descontinuidades paralelas ou subparalelas) e o

número de conjuntos que caracterizam uma determinada geometria do maciço rochoso (Hudson & Harrison, 1997).

Orientação, mergulho e direção do mergulho: considerando-se as descontinuidades como um plano, o mergulho é definido como o ângulo máximo de inclinação da descontinuidade com referência ao plano horizontal, e a direção de mergulho é o azimute da linha de máxima inclinação da mesma. O mergulho e a direção do mergulho definem a orientação da descontinuidade (Hudson & Harrison, 1997).

Persistência: Segundo Hudson & Harrison (1997), a persistência é a extensão da descontinuidade no seu próprio plano. Na prática quase sempre medida pela extensão unidimensional do comprimento do traço da fratura exposta em afloramentos ou na parede de uma escavação no maciço rochoso. Segundo Azevedo & Marques (2006), é um dos mais importantes parâmetros dos maciços rochosos, porém é de difícil quantificação, posto que seu valor depende da orientação e da dimensão da superfície rochosa na qual se expõe. A avaliação da persistência das diversas famílias de descontinuidades é fundamental na investigação da ruptura de taludes rochosos.

Preenchimento: é o termo utilizado para descrever todo aquele material que ocupa a distância entre as paredes de rocha de uma descontinuidade, ou seja, a largura da descontinuidade. Dentre os materiais de preenchimento mais comuns, destacam-se: óxido de ferro, calcita, clorita, areias, argilas e siltes (Azevedo & Marques 2006).

Resistência à compressão da parede: Segundo Azevedo & Marques (2006), a resistência à compressão da parede de uma descontinuidade é um parâmetro importante da resistência ao cisalhamento e da deformabilidade do maciço rochoso. Os autores afirmam que pode ser determinada por meio de exames visuais, conforme classificação da ISRM (1981), ou através de testes com martelo Schmidt, sendo possível aplicar o critério de Barton (1974) para obter a resistência ao cisalhamento de descontinuidades.

Rugosidade: é um parâmetro muito importante na resistência ao cisalhamento de descontinuidades, especialmente no caso de fraturas não

preenchidas (Azevedo & Marques, 2006). A rugosidade é representada pela superfície da descontinuidade.

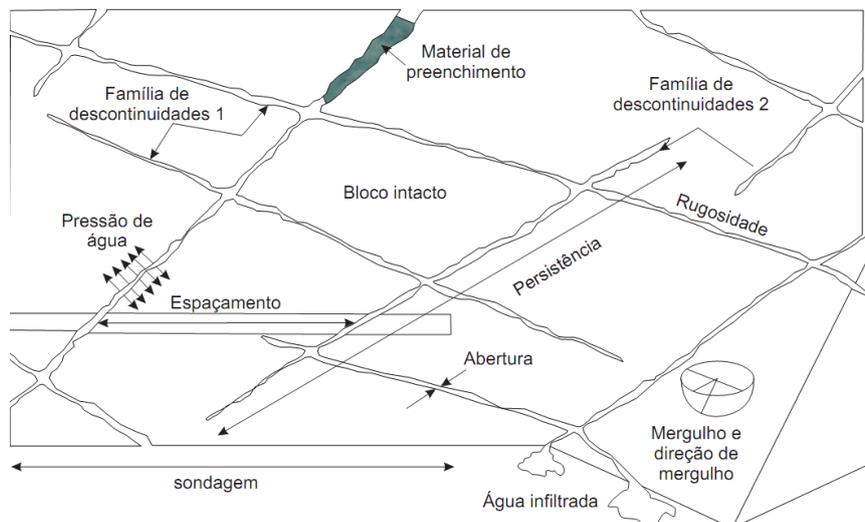


Figura 2.1: Vista esquemática das principais características de descontinuidades (modificado - Hudson & Harrison, 1997)

2.3.

A resistência ao cisalhamento de descontinuidades

As estimativas da resistência ao cisalhamento podem ser obtidas através de ensaios de cisalhamento tanto in situ como no laboratório. As melhores estimativas desse parâmetro são obtidas a partir de ensaios de cisalhamento direto in situ, pois eles são realizados a escalas maiores (Barla et al., 2011). No entanto, devido à duração e ao alto custo de tais testes, é comum praticar testes de cisalhamento direto em laboratório em amostras de descontinuidades relativamente pequenas.

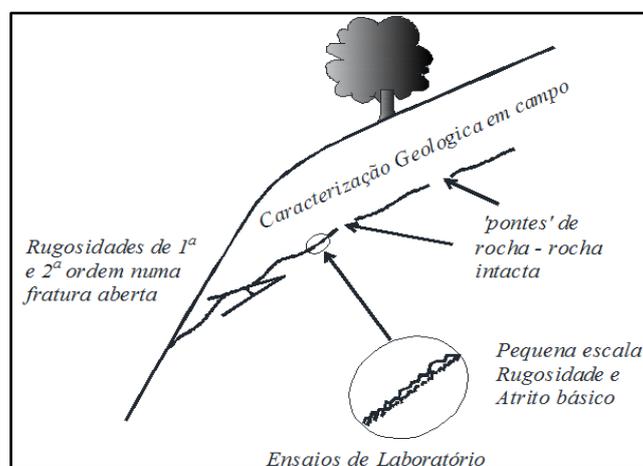


Figura 2.2: Fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento de descontinuidades (modificado - Hencher & Richards, 2014)

Segundo Hencher & Richards (2014), os fatores que influenciam diretamente à resistência ao cisalhamento das descontinuidades da rocha, tais como ilustrados na Figura 2.2 são:

- Coesão verdadeira, que é dada pela resistência das “pontes de minerais da rocha” consistindo em rocha intacta ou defeitos incipientes;
- As rugosidades, que em escala de campo relativamente grande apresentam interligação e dilatação. Quando as rugosidades se apresentam em forma de Ondas em larga escala, com as suas ondulações de ordem de metros são denominadas como “primeira ordem”; quando as rugosidades se apresentam em menor escala são denominadas como “segunda ordem” (ISRM 1978; Wyllie e Norrish 1996).

Segundo Hencher & Richards (2014), a rugosidade precisa ser caracterizada com medições no campo quando as contribuições à resistência ao cisalhamento são feitas pela persistência da primeira ordem (tipicamente maior do que 0.5 metros de comprimento de onda) e da segunda ordem (tipicamente 50-100 milímetros). Em contrapartida, rugosidades relativamente menores sobre perfis curtos de 100 milímetros, como incorporado no coeficiente de rugosidade das juntas (JRC), tal como apresentado pela ISRM (1978), assim como os do atrito básico, podem ser investigadas usando ensaios de cisalhamento direto no laboratório.

As descontinuidades, mudam o comportamento do maciço rochoso, e seus efeitos geram uma considerável anisotropia nas propriedades do maciço rochoso, principalmente quanto a resistência. As descontinuidades influenciam as propriedades geotécnicas relevantes dos maciços rochosos, principalmente a resistência, a deformabilidade e a permeabilidade.

As propriedades mecânicas de uma descontinuidade devem ser evidenciadas por um estudo do seu comportamento quando solicitada por uma tensão normal e por tensão de cisalhamento. O comportamento mecânico das descontinuidades é representado pela relação entre os esforços aplicados e os deslocamentos relativos observados ao nível das descontinuidades, que depende de diversos parâmetros tais como a rugosidade da descontinuidade, grau de alteração, propriedades do material de preenchimento, por exemplo.

O cisalhamento de discontinuidades de um maciço corresponde ao fenômeno de atrito das paredes. No caso de discontinuidades não preenchidas, a rugosidade, a resistência à compressão e as condições das paredes influenciam diretamente.

O ensaio de cisalhamento direto é o método mais comum para estudar a resistência ao cisalhamento de discontinuidades em rocha. O ensaio consiste em aplicar uma tensão normal (σ_n) ao plano da discontinuidade, e uma tensão cisalhante (τ), necessária para produzir um deslocamento. A tensão de cisalhamento é aumentada até atingir a resistência de pico, continuando a aplicação da tensão de cisalhamento e consequente o deslocamento, a resistência ao cisalhamento diminui até alcançar a resistência residual. Com esse procedimento, é possível obter duas envoltórias de resistência com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, a envoltória de resistência ao cisalhamento de pico e residual (Figura 2.3).

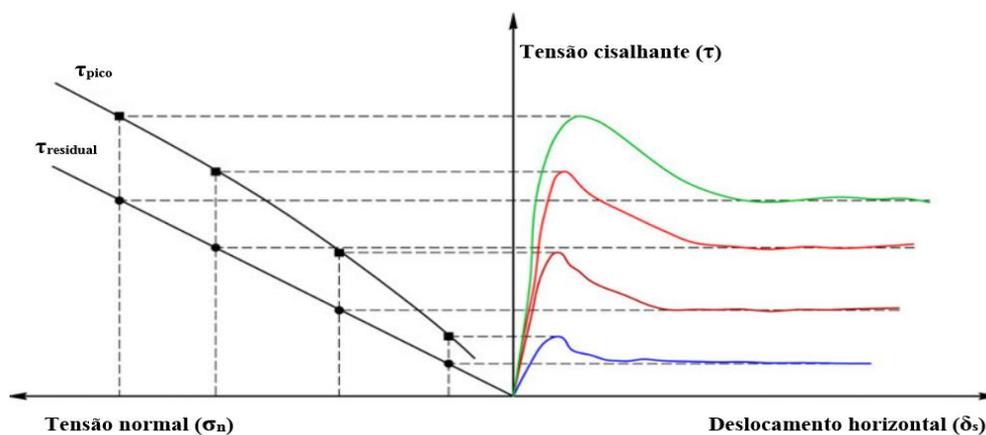


Figura 2.3: Representação das envoltórias de resistência de pico e residual (ISRM. Muralha et al., 2013)

2.4. Comportamento durante o cisalhamento

Na Figura 2.4, é apresentado o comportamento tensão-deslocamento de discontinuidades apresentado por Goodman (1989). Na Figura 2.4.a observa-se as discontinuidades sob tensão normal de compressão, σ_n , sem a aplicação de tensão cisalhante. Desta forma a discontinuidade é comprimida até atingir seu fechamento (v). O comportamento do deslocamento normal devido à tensão normal é altamente não linear e, para altos valores de σ_n , atinge um valor constante representado pelo fechamento máximo, V_{mc} .

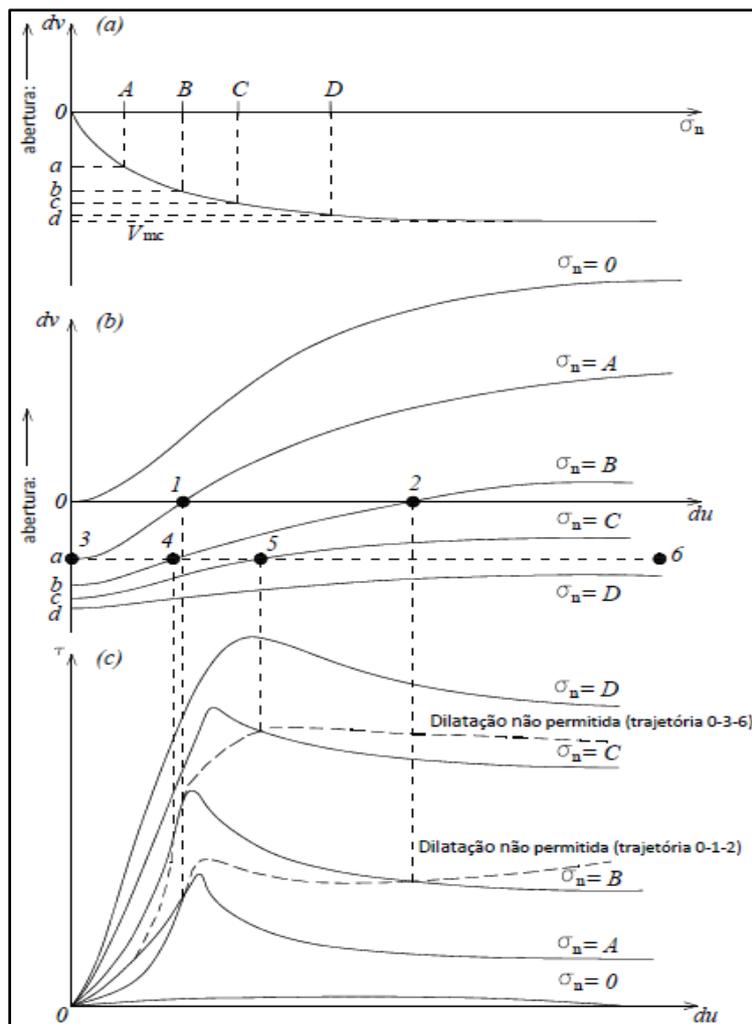


Figura 2.4: Comportamento ao cisalhamento das discontinuidades (modificado - Goodman, 1980)

Nas Figuras 2.4.b e 2.4.c., observa-se o comportamento ao cisalhamento para uma discontinuidade sem preenchimento e rugosa cisalhada sob tensão normal nula respectivamente, a dilatação então irá ocorrer como mostra a curva superior da Figura 2.4.b. Se a resistência ao cisalhamento é função somente do atrito, a tensão de cisalhamento será desprezível, conforme apresenta a Figura 2.4.c.

Para valores sucessivamente superiores de tensão normal ($\sigma_n = A, B, C$ e D), o deslocamento normal inicial será a, b, c e d , conforme mostra a Figura 2.4.a. Com o aumento da tensão normal, o fenômeno de dilatação é progressivamente limitado porque as irregularidades começam a ser rompidas durante o cisalhamento (Goodman, 1989). Os gráficos do comportamento do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal e do deslocamento horizontal versus tensão cisalhante, sob as respectivas tensões normais, são apresentados nas Figuras 2.4.b e 2.4.c respectivamente.

Caso o ensaio seja conduzido com tensão normal inicialmente igual a zero e restrição do deslocamento normal ao plano, ou seja, com restrição à dilatação, a curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal apresentará o comportamento da trajetória indicada por linha tracejada (trajetória 0-1-2, na Figura 2.4c).

Na Figura 2.4.b, observa-se o aumento da tensão normal à medida que o cisalhamento se desenvolve. Na Figura 2.4.c, a trajetória 0-3-6 corresponde a uma descontinuidade que foi comprimida inicialmente até o ponto 3 da Figura 2.4.b, e depois cisalhada sem que se permitisse deslocamentos normais (dilatação). Segundo Brady & Brown (1985), observam-se consideráveis aumentos de resistência quando o cisalhamento ocorre com a dilatação impedida.

2.5. Critérios de resistência de descontinuidades

Apresentam-se a seguir os critérios de resistência ao cisalhamento para descontinuidades de Barton e Bandis, Patton e Mohr-Coulomb.

2.5.1. Critério de Mohr-Coulomb

O modelo sugere que a resistência ao cisalhamento é composta de duas parcelas, a coesão e o ângulo de atrito. A envoltória de resistência é linear, e a Equação que representa o critério de resistência de Mohr-Coulomb é a seguinte:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.1)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento;

c = coesão ou intercepto de coesão;

σ_n = tensão normal ao plano de ruptura;

ϕ = ângulo de atrito interno do material.

De acordo com Franklin & Dusseault (1989), o valor da coesão na Equação de Mohr-Coulomb, quando se utilizam dados de resistência de pico, pode ser muito

maior que a resistência real ao cisalhamento na tensão normal zero, que para descontinuidades de rocha é usualmente igual a zero. Com o critério de Mohr-Coulomb, usualmente se consegue um ótimo ajuste para dados de resistência residual, para os quais o intercepto de coesão aparente é aproximadamente zero. A extrapolação linear de altas para baixas tensões normais é desaconselhável, bem como o uso do termo coesão aparente neste caso.

De acordo com a ISRM (1977), a utilização na Equação de Mohr-Coulomb de um ângulo de atrito de pico, residual ou intermediário, depende do grau de deslocamento cisalhante já ocorrido na descontinuidade.

Franklin & Dusseault (1989), afirmam que o uso do critério linear pode ser estendido pelo uso não de um, mais de uma série de segmentos de reta para os dados, passando de um segmento para o próximo de acordo com o nível de tensão no modelo do maciço rochoso analisado. Entretanto, uma Equação curvilínea é mais simples e mais racional, se esta pode ser ajustada aos dados do problema. De acordo com Barton & Choubey (1977), os termos da Equação de Coulomb, coesão e ϕ , são ainda dependentes da escala.

Newland & Alley (1957) foram os primeiros a indicar que a resistência ao cisalhamento não é uma propriedade intrínseca do material.

2.5.2. Critério de Patton

Segundo Bandis (1990), a dilatação corresponde à sobreposição das rugosidades, com o afastamento das paredes da descontinuidade durante o cisalhamento, e é um importante componente do comportamento da descontinuidade. A dilatação da descontinuidade é um fenômeno dependente da tensão, da escala e do deslocamento tangencial. Dadas estas condições, o valor da dilatação depende da razão entre a resistência das irregularidades e a tensão normal.

Patton (1996), explicou o comportamento de superfícies rugosas com ensaios em descontinuidades com seção transversal dentada, onde se mostrou que a inclinação da envoltória de resistência de pico em tensões normais muito baixas é linear e dada por $(\phi_R + i)$, onde ϕ_R é o ângulo de atrito residual e i o ângulo de inclinação das irregularidades (asperezas) ou ângulo de dilatância de pico. Desta

maneira, de acordo com a relação proposta por Patton, a dilatação da descontinuidade acompanha o deslocamento tangencial da superfície, e a resistência ao cisalhamento pode ser expressa pela Equação 2.2:

$$\tau = \sigma_n \cdot \text{tg}(\phi_R + i) \quad (2.2)$$

Onde:

σ_n = tensão normal;

ϕ_R = ângulo de atrito residual;

i = ângulo de inclinação das irregularidades.

Quando o valor da tensão normal está acima de um valor crítico, o deslizamento na superfície áspera fica inibido, e as irregularidades começam a ser cisalhadas, reduzindo o ângulo de atrito ao seu valor residual. Este processo leva à definição de um critério de resistência ao cisalhamento bilinear, que pode ser obtido pela combinação do modelo de dilatância em termos do ângulo i para tensões normais baixas, e à Equação de Mohr-Coulomb para tensões normais altas, conforme apresentado na Figura 2.5. A inclinação final da envoltória da resistência de pico para altas tensões normais aproxima-se de ϕ_R com i aproximadamente zero.

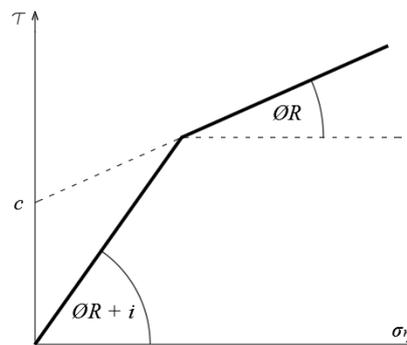


Figura 2.5: Critério bilinear de Patton

Brady & Brown (1985), afirmam que os mesmos mecanismos de deslizamentos nas superfícies inclinadas sob baixas tensões normais e inibição da dilatação com cisalhamento das asperezas sob altas tensões normais são encontrados no comportamento das descontinuidades naturais, e se combinam em diferentes proporções. Deste modo, superfícies de rocha reais produzem envoltórias de resistência ao cisalhamento que são curvas, porque possuem diferentes alturas

de irregularidades e ângulos de dilatância. O valor da tensão normal suficiente para impor o completo cisalhamento das asperezas, com $i = 0$, depende da rugosidade e da resistência das descontinuidades de rochas.

2.5.3. Modelo de Barton e Bandis

Barton em 1973, citado por Barton & Choubey (1977), apresentou uma Equação empírica para descontinuidades de maciços rochosos baseada em três parâmetros índices:

- a) O coeficiente de rugosidade da descontinuidade (JRC);
- b) A resistência à compressão das paredes da descontinuidade (JCS);
- c) O ângulo de atrito residual (ϕ_R).

O principal fator externo que influencia a resistência ao cisalhamento é a magnitude da tensão normal agindo através da descontinuidade. Esta formulação empírica é apresentada na Equação 2.3:

$$\tau = \sigma_n \cdot \text{tg} \left[\text{JRC} \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \phi_R \right] \quad (2.3)$$

Onde:

τ = resistência ao cisalhamento de pico;

σ_n = tensão normal;

JRC = coeficiente de rugosidade da descontinuidade em graus;

JCS = resistência à compressão das paredes da descontinuidade;

ϕ_R = ângulo de atrito residual.

Segundo Brady & Brown (1985), a Equação 2.3 sugere que há três componentes de resistência ao cisalhamento: um componente de atrito básico, dado por ϕ_R , um componente geométrico, controlado pela rugosidade da superfície (JRC), e um componente de ruptura da aspereza, controlada pela razão (JCS/ σ_n).

A Equação pode ainda ser analisada considerando-se a rugosidade mobilizada da descontinuidade (JRC_m) para uma determinada resistência ao cisalhamento. Barton e Bakhtar, em 1983, citados por Bandis (1990), mostram que a rugosidade mobilizada na forma da razão JRC_m/JRC_{pico} pode ser correlacionada com a razão entre os deslocamentos horizontais em um determinado instante e o deslocamento horizontal de pico u/u_p (onde u_p é o deslocamento horizontal de pico). Desse modo, a resistência de atrito em qualquer estágio de deslocamento pode ser dada por:

$$\phi_m = JRC_m \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_R \quad (2.4)$$

A resistência por atrito, caracterizada pelo ângulo de atrito mobilizado (ϕ_m), depende da tensão normal atuante na descontinuidade e varia com o deslocamento horizontal (u). Para uma dada tensão normal e um deslocamento horizontal, o atrito mobilizado dependerá das contribuições relativas da dilatação, da resistência dessas irregularidades, do atrito básico e das condições da rocha matriz adjacente à descontinuidade (Bandis, 1990). O valor de rugosidade mobilizada (JRC_m) é calculado a partir da expressão:

$$JRC_m = A \cdot JRC_p \quad (2.5)$$

O coeficiente JRC_p representa a rugosidade natural ou nominal da descontinuidade e é obtida em ensaios de cisalhamento direto, através dos valores da tensão máxima de cisalhamento, detectada no ensaio e da tensão normal empregada no mesmo. Conhecendo-se o valor da resistência das paredes e do ângulo de atrito residual da descontinuidade, tem-se:

$$JRC_p = \frac{\arctg \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right) - \phi_R}{\log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)} \quad (2.6)$$

O valor do fator A (JRC_m/JRC_p) depende do deslocamento tangencial relativo $B = u/u_p$. Bandis (1990) apresenta relações lineares de diferentes valores de B para o cálculo de A. O ângulo de atrito residual é obtido de ensaios de cisalhamento direto em superfícies de rocha planas e não intemperizadas e pode ser ainda estimado por Tabelas que concentram dados da literatura como a apresentada por Barton & Choubey (1977). O ângulo de atrito residual também pode ser estimado

por meio de resultados obtidos pelo martelo de Schmidt e de valores de ϕ_b obtidos em ensaios tilt test residuais:

$$\phi_R = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \left(\frac{r}{R} \right) \quad (2.7)$$

Onde:

ϕ_b = ângulo de atrito básico estimado em ensaios tilt test residuais em superfícies serradas secas e não intemperizadas;

R = número de reação de Schmidt em superfícies serradas secas e não intemperizadas;

r = número de reação do martelo Schmidt em superfícies úmidas.

Caso as descontinuidades não se encontrem intemperizadas, o parâmetro JCS poderá ser considerado igual à resistência à compressão não confinada da rocha intacta (σ_c). A resistência à compressão pode ser estimada por ensaios de carga puntiforme. Contudo, em geral as paredes das descontinuidades são intemperizadas em alguma extensão e JCS será menor que σ_c . O valor pode então ser determinado usando-se o martelo de Schmidt aplicado diretamente nas paredes expostas da descontinuidade. O valor da reação é convertido então em uma estimativa da resistência à compressão. Ressalta-se, entretanto, que os resultados obtidos com o martelo de Schmidt podem apresentar grandes dispersões quando a rocha é policristalina com grãos de grandes dimensões.

O coeficiente de rugosidade da descontinuidade JRC é estimado por retro-análise de ensaios de cisalhamento que tenham sido executados, por meio da Equação 2.6. O valor de JRC também pode ser estimado por comparação visual da rugosidade com os perfis apresentados por Barton & Choubey (1977). Pode ainda ser obtido pela retro-análise, por meio da Equação 2.6, de ensaios onde blocos de rocha, interceptados pela descontinuidade e removidos da face de escavação da rocha, são cuidadosamente inclinados até que o bloco superior deslize. O valor do $\arctg(\tau/\sigma_n)$, igual ao do mergulho da descontinuidade quando ocorre o deslizamento, juntamente com o valor da tensão normal agindo quando do deslizamento e as estimativas de JCS e ϕ_R , podem então ser substituídos na

Equação 2.6. Esse ensaio tilt test é basicamente o ensaio de cisalhamento sob tensões normais muito baixas.

2.5.3.1. Caracterização da rugosidade

Como foi descrito anteriormente, a rugosidade de uma descontinuidade pode ser caracterizada com o coeficiente JRC, que é um número que pode ser estimado comparando visualmente o perfil de uma descontinuidade com os perfis apresentados na Figura 2.6.

Os perfis foram publicados por Barton & Choubey (1977) e apresentam as medidas de rugosidade que podem ser obtidas no laboratório, e estão expressadas em unidades de JRC. Segundo Barton & Choubey (1977), no caso de amostras de laboratório de pequena escala, a escala da rugosidade da superfície será aproximadamente a mesma que a dos perfis ilustrados. No entanto, no campo, o comprimento da superfície de interesse pode ser de vários metros e o valor do JRC deve ser estimado com uma escala maior.

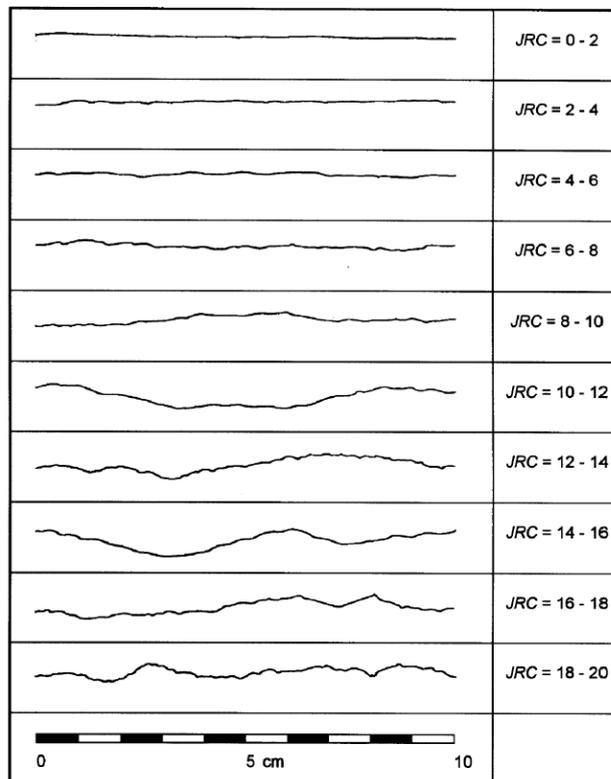


Figura 2.6: Perfis de rugosidade e seu valor JRC (Barton & Choubey, 1977)

Maerz et al. (1990), propuseram o uso do parâmetro R_p (definido pela razão entre o comprimento real do perfil e o comprimento da sua projeção na horizontal) como uma medida de rugosidade. Os autores digitalizaram os perfis de JRC, correlacionando-os com os respectivos valores de R_p , obtendo a Equação 2.8:

$$JRC_{R_p} = 411. (R_p - 1) \quad (2.8)$$

Com estudos posteriores, com amostras de 50 a 300 mm de comprimento, em que o valor de JRC foi obtido em ensaios de cisalhamento direto e correlacionando com seus respectivos valores de R_p , os mesmos autores obtiveram a Equação 2.9:

$$JRC_{R_p} = 401. (R_p - 1) \quad (2.9)$$

Esses resultados são muito próximos e foram medidos de maneiras distintas, o que levou os autores a concluir que existe uma correlação entre os dois parâmetros, e que a Equação 2.8 apresenta a melhor relação entre ambos.

Devido à simplicidade para obter o parâmetro R_p , pode ser considerado para a determinação de JRC (JRC_{R_p}), depois de determinar o valor de R_p de cada amostra estudada, a média de todos os perfis de cada amostra, estimando-se também o ângulo médio de rugosidade, seguindo a metodologia sugerida por Turk & Dearman (1985), usando a Equação 2.10:

$$i_{lab} = \arccos\left(\frac{L_p}{L_R}\right) \quad (2.10)$$

Onde:

L_p = Comprimento da projeção do perfil na horizontal;

L_R = Comprimento real do perfil.

Por outro lado, é possível calcular o ângulo de dilatação de pico (i_{pico}), sendo medido durante os ensaios de cisalhamento direto, considerando-se o incremento vertical (dv) e horizontal (dh), sendo o ângulo de dilatação igual a:

$$\frac{dv}{dh} = tg(i_{pico}) \quad (2.11)$$

2.5.3.2.

Resistência à compressão da parede de uma descontinuidade

A resistência à compressão da parede de uma descontinuidade é um parâmetro fundamental, difícil de quantificar, já que os processos de alteração são mais atuantes nas finas camadas de rocha adjacentes à descontinuidade.

Se a superfície da junta apresenta o mesmo nível de alteração que a matriz rochosa, sua resistência será igual à da rocha, podendo ser estimada a partir de ensaios de carregamento puntiforme ou compressão simples. Quando a superfície da descontinuidade está mais intemperizada do que a rocha adjacente, o valor da resistência poderá ser estimado a partir de ensaios com o martelo Schmidt, tomando cuidados em relação à direção da orientação das medidas.

Barton & Choubey (1977), recomendam que se faça 10 medidas numa amostra representativa, e utilizar como valor de R a média dos cinco maiores resultados.

Na bibliografia existem metodologias para converter as medidas obtidas do esclerômetro Schmidt em termos de Mpa através de curvas de calibração, dessa maneira na Equação 2.12 se apresenta a proposta por Aydin & Basu (2005) e a Equação 2.13, apresenta outra proposta realizada por Dearman & Irfan (1987). Ambas propostas foram estabelecidas com base em estudos feitos em rochas graníticas.

$$UCS = 1,45e^{(0,0706R)} \quad (2.12)$$

$$UCS = 0,00016 \cdot R^{3,47} \quad (2.13)$$

Por outro lado, Barton & Choubey (1977), para obter as medidas de resistência à compressão das paredes da descontinuidade, também recomendam o ábaco proposto por Miller (1995, apud Barton e Choubey, 1977) apresentado na Figura 2.7, que considera o posicionamento do esclerômetro em relação à amostra e a densidade da rocha.

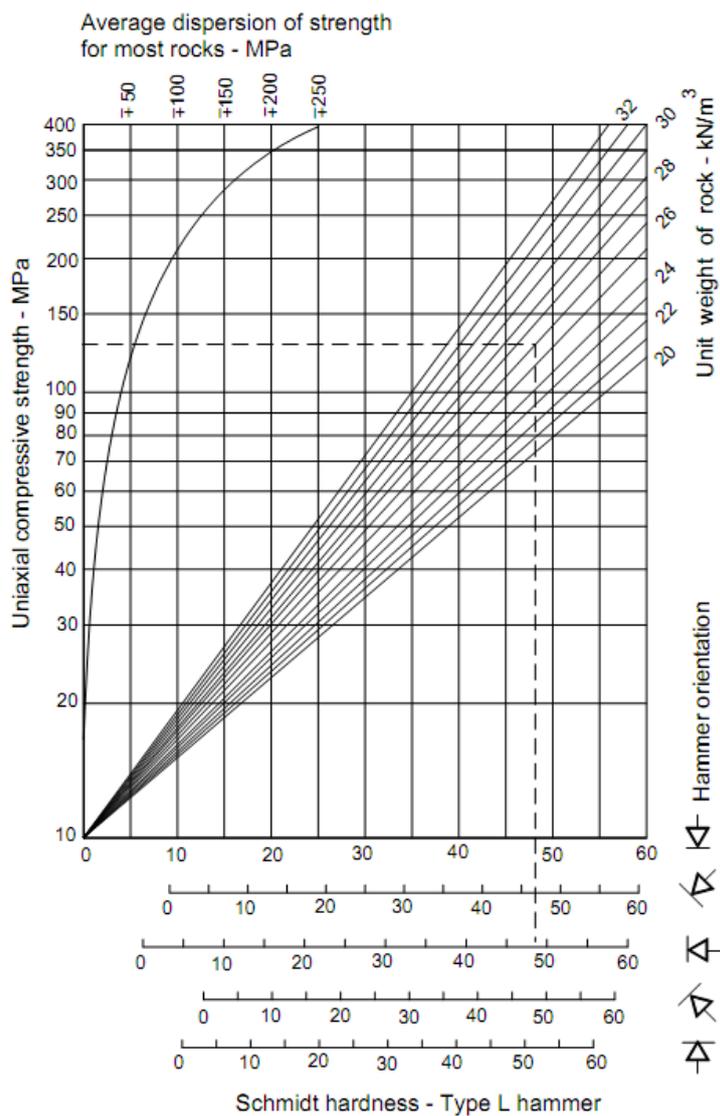


Figura 2.7: Ábaco de Miller (1965, apud Barton e Choubey,1977)

2.6. Procedimento do ensaio de cisalhamento direto

O ensaio é executado mantendo uma força constante normal no plano de cisalhamento da amostra, uma força de cisalhamento externa crescente é aplicada ao longo do plano de cisalhamento designado, para causar o deslocamento de cisalhamento. As forças normais e de cisalhamento aplicadas e os correspondentes deslocamentos normal e de cisalhamento devem ser medidos e registrados (ASTM D5607, 2016). Esses dados são a base para o cálculo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

O procedimento de ensaio realizado nesta dissertação concorda com os procedimentos sugeridos pela norma ISRM (Muralha et al., 2013) e ASTM D5607 (2016), são consideradas também as sugestões apresentadas por Hencher & Richards (1989, 1993 e 2004).

Deve ser aceito que não é possível ensaiar no laboratório amostras que sejam verdadeiramente representativas de uma descontinuidade *in situ*. Por outro lado, é um engano acreditar que um teste *in situ* de talvez 1 m de comprimento seja mais realista e de alguma forma sejam reduzidos os efeitos de escala (Muralha et al., 2013). Tais testes em larga escala são muito caros, conseqüentemente poucos em número, muitas vezes difíceis de controlar e mal condicionados, de modo que são muito mais difíceis de interpretar do que os testes de laboratório devidamente conduzidos (Barla et al, 2011).

O mergulho das descontinuidades geralmente varia em uma escala de milímetros, centímetros, metros e incluem características de rugosidade variável que refletem sua origem geológica. Amostras de dimensões similares da mesma junta muitas vezes têm geometrias bastante diferentes e, como observado anteriormente, uma única amostra irá evidenciar diferentes graus de interligação e dilatação quando cisalhadas em diferentes direções, o que contradiz o conceito de atribuir um único JRC a uma amostra para caracterizar seu componente de rugosidade durante o cisalhamento, exceto para fins de caracterização geral.

A prática comum é ensaiar uma série de amostras com o objetivo de que a combinação de resistências de pico, de alguma forma, represente a resistência *in situ* da descontinuidade. Segundo Hencher & Richards (2014), os resultados muitas vezes apresentam dispersão e não podem ser interpretados de forma significativa, muito menos extrapolados para escala de campo. Portanto, é importante fazer correções para todos os dados dos ensaios basicamente para normalizar o efeito da rugosidade da amostra individual. Ao fazer isso, um ângulo de atrito básico é calculado para uma superfície praticamente plana, mas naturalmente texturizada. O efeito da rugosidade da junta natural (primeira e segunda ordem) pode então ser considerado separadamente e adicionalmente ao avaliar a resistência *in situ*.

Para realizar os ensaios de cisalhamento direto, inicialmente deve se definir as condições de carga normais a serem aplicadas durante o cisalhamento. Após a

configuração inicial e feitas as descrições da amostra, a primeira carga normal pode ser aplicada, não se devendo aplicar a carga de cisalhamento até que o deslocamento normal se estabilize.

Os testes podem ser realizados seguindo procedimentos de um único estágio ou de vários estágios. O teste multiestágio envolve ensaiar a mesma amostra de descontinuidade por meio de uma série de cargas normais diferentes. Essa estratégia de teste permite obter uma informação máxima de cada amostra. A carga normal geralmente aumenta após a resistência ao cisalhamento se manter constante ou caindo sobre alguns milímetros ou mais do deslocamento.

Segundo a ASTM D5607 (2016), duas técnicas são possíveis para realizar o cisalhamento de múltiplos estágios: sem reposicionar a amostra na posição natural entre as cargas normais antes de cada estágio de cisalhamento ou com o reposicionamento da amostra na sua posição inicial entre as cargas normais antes de cada estágio de cisalhamento. Tipicamente, pelo menos três a cinco cargas normais diferentes são necessárias para definir a envoltória de resistência ao cisalhamento. A fim de reduzir o potencial para os efeitos da degradação e desgaste da amostra, cada estágio consecutivo pode ser realizado com uma carga normal mais alta. Restaurar as amostras na sua posição original antes de mudar a carga normal, permite que as superfícies sejam examinadas e fotografadas e que sejam removidos detritos soltos.

Hencher & Richards (2014), afirmam que ensaios de vários estágios também podem ser realizados com a diminuição da carga normal em cada estágio, estágios repetidos com a mesma carga normal ou, talvez, repetindo corridas de ensaios com a mesma carga baixa que os estágios anteriores entre corridas em cargas mais altas para investigar como o dano está ocorrendo e afetando a dilatação. Em todos esses ensaios, é inevitável que os danos causados nas superfícies das descontinuidades nos primeiros estágios afetem os resultados dos estágios posteriores, mas os resultados dos estágios posteriores devem ser analisados e interpretados tendo em conta o dano ocorrido.

Ao planejar uma série de testes multiestágio em diferentes amostras, é uma boa prática iniciar cada teste individual em diferentes níveis de tensão normal, de modo que os estágios (não danificados) possam ser usados isoladamente para

interpretar os parâmetros de força máxima. Nesta dissertação foi adotada a metodologia de ensaio multiestágio, tanto com incremento de cargas normais, como também com redução de cargas normais.

O método sugerido pela ISRM (Muralha et al., 2013) recomenda que o deslocamento do cisalhamento deve ser apenas de 0,1-0,2 mm / min, por outro lado, Hencher (1976) afirma que as taxas de cisalhamento abaixo de alguns milímetros por minuto não afetam os resultados dos ensaios em geral.

Hassani & Scoble (1985) executaram ensaios de cisalhamento em juntas de rochas sedimentares, com taxas de deslocamento horizontal de 0,012 a 0,18 mm/min e não observaram nenhuma influência significativa da taxa de cisalhamento nas propriedades de atrito. Contudo, os resultados indicaram que é importante a manutenção de uma taxa de deslocamento constante durante o ensaio.

Hencher & Richards (2014) propõem um método de correção que faz uso de ângulos de rugosidade incremental em cada ponto de dados de esforço de cisalhamento. Todas as medidas do ensaio devem ser registradas ao mesmo tempo e isso é feito através dos transdutores de deslocamento e das células de carga.

Quando as cargas de cisalhamento e normal são convertidas em tensões de engenharia, são divididas pela área de contato bruta das amostras, que geralmente varia ao longo de cada estágio do ensaio. A área de contato pode ser calculada a partir da seguinte equação (Hencher & Richards 1989):

$$A = \pi ab - \frac{ub\sqrt{4a^2 - u^2}}{2a} - 2absen^{-1}\left(\frac{u}{2a}\right) \quad (2.14)$$

Onde:

A = Área bruta de contato;

$2a$ = comprimento da elipse;

$2b$ = largura da elipse;

u = deslocamento horizontal relativo.

Geralmente, as asperezas que ficam nas amostras depois dos ensaios de cisalhamento sob as tensões de engenharia calculadas também provavelmente

ficarão na escala de campo. Os dados brutos são melhores apresentados com gráficos mostrando a tensão de cisalhamento medida *versus* o deslocamento horizontal e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal.

As descontinuidades rugosas dilatam-se durante o cisalhamento, isso aumenta a força necessária para continuar cisalhando. O ângulo de rugosidade ou dilatância pode ser calculado ao longo dos ensaios considerando os deslocamentos incrementais verticais (dv) e horizontal (dh) com a Equação 2.11, como foi mencionado anteriormente.

No cálculo, leva-se em conta cada ponto de dados de tensão de cisalhamento e calcula-se o ângulo de dilatância que leva a essa medida de força em um incremento de deslocamento horizontal selecionado. Se o incremento for pequeno, a dispersão pode ser boa por causa de erros de leitura e os efeitos da energia de deformação se o incremento for muito grande, muitos detalhes são perdidos. A obtenção do ângulo de atrito básico é alcançada por tentativa e erro.

Uma correção de dados para dilatância deve ser feita. Em um teste de cisalhamento direto, a carga de cisalhamento é medida no plano horizontal e a carga normal medida verticalmente. Quando a amostra está dilatando ou comprimindo, as tensões horizontal e vertical podem ser resolvidas tangencialmente e normalmente ao plano, onde o cisalhamento realmente está ocorrendo, conforme ilustrado na Figura 2.8, usando as Equações 2.15 e 2.16. As equações são para dilatação positiva (movimento ascendente); os sinais devem ser revertidos no caso contrário (compressão da junta).

$$\tau_i = (\tau \cdot \cos i - \sigma \cdot \sin i) \cos i \quad (2.15)$$

$$\sigma_i = (\sigma \cdot \cos i + \tau \cdot \sin i) \cos i \quad (2.16)$$

Onde:

τ_i = tensão de cisalhamento corrigida pela dilatância;

σ_i = tensão normal corrigida pela dilatância;

i = ângulo de dilatância incremental.

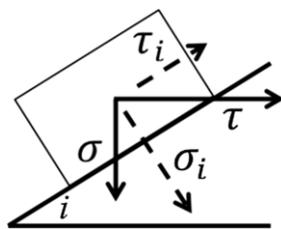


Figura 2.8: Análise de tensões no plano de cisalhamento

Medindo o ângulo de dilatação incremental se consegue que o efeito de dilatação seja corrigido ao longo de todo o deslocamento de cisalhamento de um ensaio. O efeito de tais correções pode ser visto no apêndice I desta dissertação. O conjunto de dados corrigidos pela dilatação fornecem uma indicação confiável do atrito básico disponível para a descontinuidade com efeitos de rugosidade removidos.

Hencher & Richards (2014), apresentam alguns exemplos de ângulos de atrito básicos típicos para juntas naturais (Tabela 2-1) e afirmam que os testes sobre juntas rugosas em rochas de silicato, uma vez corrigidos, geralmente dão uma resistência de atrito básico de aproximadamente 38°- 40°. Esse valor (Equação 2.17) é o mesmo que o valor de atrito de juntas rugosas medidas para uma variedade de tipos de rocha em altos níveis de tensão por Byerlee (1978), citado por Hencher & Richards (2014).

$$\tau = 0,85\sigma \quad (2.17)$$

Tabela 2-1: Ângulos de atrito básicos de juntas naturais (Modificado - Hencher e Richards, 2014)

Rocha	Detalhe	ϕ_b	Referências
Granito	Juntas naturais, com graus de intemperismo II-IV	38° - 40°	Hencher & Richards (1982)
Quartzo monzonito	Clorito revestido (duro, fino)	17° para baixas tensões	Hencher (1981, 2012)
Andesito	-	38° - 40°	Não publicado
Xisto	Malásia	26° - 40°	Não publicado
Calcário	Sudoeste Inglaterra, descontinuidades	40° - 45°	
Arenito	Darleydale, UK	42°	Não publicado

Hencher & Richards (2014), afirmam que quando as discontinuidades têm rugosidade suave e as principais asperezas não entram em contato durante o cisalhamento, os ângulos de atrito básicos, entretanto, podem ser muito menores.

Os valores de ângulos de atrito básicos obtidos em ensaios em juntas geradas artificialmente com serra, são tipicamente 25° - 35° (Hencher e Richards, 2014).

2.7. Efeito de escala

Bandis (1990), afirmou que o comportamento das discontinuidades no cisalhamento direto sob uma tensão normal constante pode variar de um comportamento frágil para um dúctil dependendo do tamanho da discontinuidade (Figura 2.9).

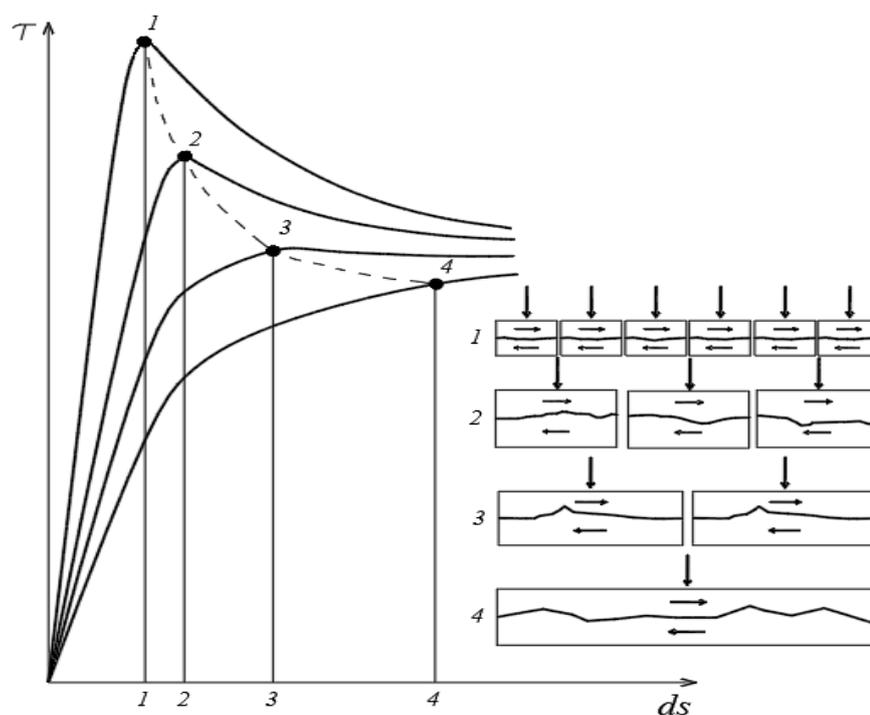


Figura 2.9: Efeito de escala na resistência ao cisalhamento de discontinuidades
(Modificado – Bandis, 1990)

Barton & Choubey (1977) mostraram que o valor de JRC diminui com o aumento do comprimento da discontinuidade e sugeriram que JCS também fosse dependente da escala. O efeito da escala nestes valores foi mais tarde confirmado por Bandis em 1980, citado por Bandis (1990).

O efeito de escala na resistência ao cisalhamento é provavelmente causado pela influência da escala intermediária de rugosidade, não usualmente amostrada em ensaios de laboratório, mas menores que as grandes ondulações. A pequena escala de rugosidade age somente como uma interferência sobre o cisalhamento, e é provavelmente cisalhada em níveis de tensões normais moderados. Por outro lado, as rugosidades em escala intermediária representam a dilatância da descontinuidade, e o cisalhamento só pode ocorrer em grandes níveis de tensão.

A dependência da escala dos valores de JCS e JRC resulta em efeitos de escala nos ângulos de dilatância de pico e inicial, na rigidez ao cisalhamento (K_s) e no ângulo de atrito total (pico). Todos estes parâmetros são ainda afetados pelo nível de tensão normal efetiva. O efeito de escala na rugosidade requer a correção dos valores de JRC obtidos de amostras de pequenas dimensões. Bandis e colaboradores, em 1981, citados por Bandis (1990) sugerem:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02JRC_0} \quad (2.18)$$

Onde os subscritos 0 e n referem-se às escalas de laboratório e campo, respectivamente. Barton e Bandis, em 1982, citados por Barton et al. (1985), apresentam as seguintes correções:

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,03JCS_0} \quad (2.19)$$

$$d_{hpico} = \left(\frac{L_n}{500} \right) \left(\frac{JRC_n}{L_n} \right)^{0,33} \quad (2.20)$$

2.8. Considerações finais

A aplicação de métodos empíricos e aproximações numéricas para estimar as características de resistência das descontinuidades pode levar a resultados imprecisos, já que a grande variabilidade das propriedades físicas e geométricas das juntas, impõe que análises específicas de juntas sejam feitas. É possível determinar essas características em escala de laboratório. Na maior parte de artigos publicados, há concordância sobre a influência do efeito de escala na resistência e nas propriedades geométricas da junta (diminuição da resistência com o aumento da

escala). Uma maneira apropriada de abordar este problema, seria estudá-lo diretamente, em campo com amostras de tamanhos significativos em relação ao maciço, mas os custos desses ensaios têm limitado o uso dessa prática.

Apresentou-se propriedades mecânicas e os aspectos relevantes na resistência ao cisalhamento das discontinuidades. Os conceitos apresentados foram utilizados na interpretação dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados no equipamento desenvolvido com os dois tipos de rochas estudados.

3 Desenvolvimento do Equipamento

3.1. Considerações iniciais

A determinação da resistência ao cisalhamento das discontinuidades da rocha é geralmente realizada usando aparelhos de cisalhamento direto. Embora existam muitas variações no processo de preparação de espécimes, montagem e aplicação de cargas, as determinações da resistência ao cisalhamento são geralmente semelhantes (Boulon, 1995; Blümel and Pötsch, 2003; Jiang et al., 2004; Barla et al., 2010).

No presente trabalho, todas as peças do equipamento de cisalhamento direto são de aço tipo A36. A estrutura do equipamento foi fabricada com perfis laminados planos (ASTM A36; SAE 1020; SAE 1045), perfis W, eletrodos E70XX, porcas e arruelas galvanizadas. As propriedades mecânicas adotadas no desenho e dimensionamento do equipamento estão mencionadas na Tabela 3.1.

Tabela 3-1: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na construção do equipamento

Propriedades mecânicas aço A36	
<i>Módulo de Young E (MPa)</i>	210000
<i>Tensão de escoamento f_y (MPa)</i>	210
<i>Tensão de ruptura f_u (MPa)</i>	400
<i>Coefficiente de Poisson (ν)</i>	0,3

São descritos neste capítulo os procedimentos de concepção, projeto e execução do equipamento de cisalhamento direto.

3.2. Concepção do equipamento de cisalhamento direto

O equipamento de cisalhamento direto construído está situado no Laboratório de Estruturas do departamento de engenharia civil da PUC-Rio, e foi baseado nos conceitos da revisão de literatura apresentados no capítulo 2. O equipamento foi projetado para ensaiar amostras de até 169 cm² de área na zona de cisalhamento, o que neste capítulo é apresentado e discutido detalhadamente. As características do equipamento desenvolvido satisfazem as sugestões estabelecidas nas normas ISRM (Muralha et al., 2013) e ASTM D5607 (2016).

Para facilitar a descrição apresentada neste capítulo, o equipamento de cisalhamento direto foi dividido em cinco partes fundamentais: (1) A estrutura do equipamento, (2) as caixas de cisalhamento direto, (3) o sistema de aplicação da força cisalhante, (4) o sistema de aplicação da força normal e (5) o registro e aquisição de dados.

3.3. Estrutura do equipamento

As Figuras 3.1 - 3.10, que são apresentadas nesta seção mostram o desenho e a construção do equipamento de cisalhamento direto. A estrutura do equipamento está constituída por perfis de aço e é bastante rígida para evitar distorções durante os ensaios de cisalhamento.

A estrutura foi projetada utilizando o critério de Von Mises (critério da energia de distorção máxima) e os perfis foram calculados com cargas superiores às cargas utilizadas nos ensaios de cisalhamento, com cargas máximas de projeto de 20 toneladas para força normal e 10 toneladas para força de cisalhamento, as uniões e conexões dos perfis foram soldadas com eletrodos E70XX. De acordo com o desenho, o fator de segurança da estrutura é de 1,50.

O equipamento permite a aplicação simultânea de forças normal e força cisalhante, pois contém uma viga rígida específica de reação para que o dispositivo de aplicação de força cisalhante possa atuar apropriadamente, e, para a aplicação de força normal, se aproveitou o sistema de pórticos rígidos existente no laboratório. Na Figura 3.1 se apresenta uma vista esquemática do desenho do equipamento.

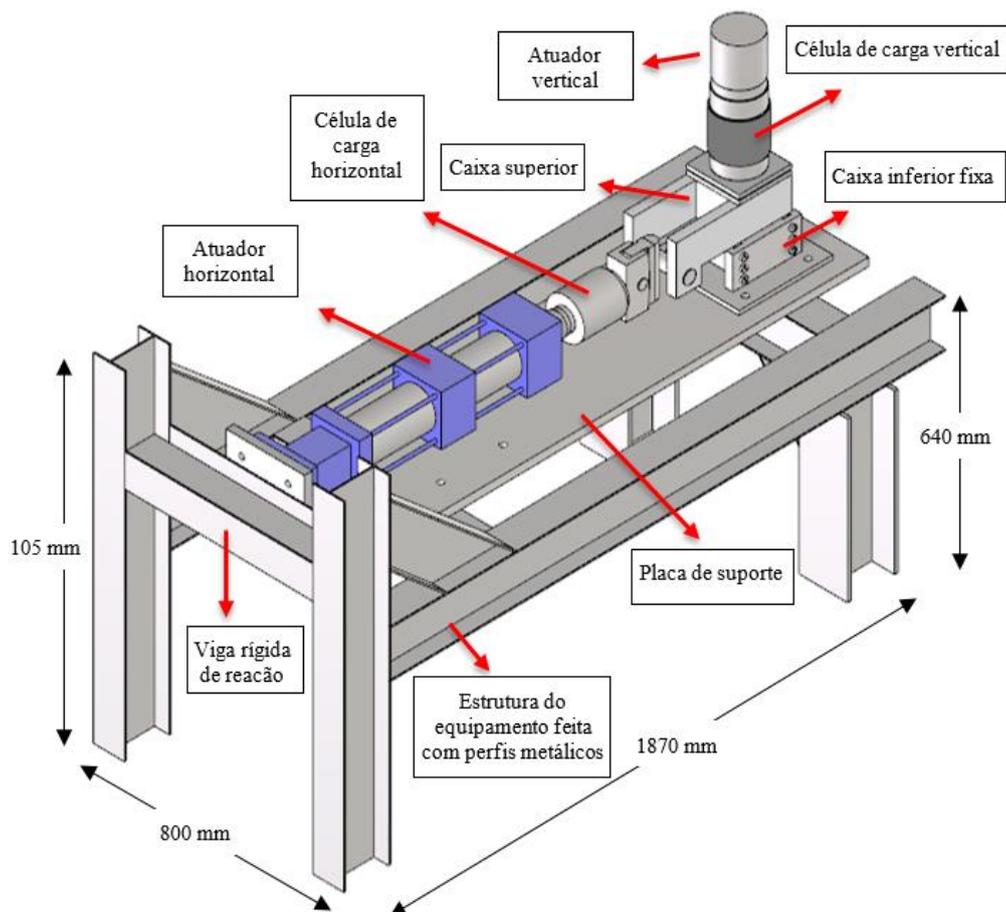


Figura 3.1: Vista esquemática do desenho do equipamento de cisalhamento direto

Uma placa metálica, de 2000 x 1200 x 25,4 mm, foi utilizada como a base do equipamento de cisalhamento. Essa placa foi parafusada à laje do laboratório através de três parafusos de 2 polegadas de diâmetro. Acima da placa metálica foram soldadas quatro placas menores de 300 x 300 x 20 mm, que são os apoios das colunas da estrutura do equipamento. Cada coluna do equipamento, por sua vez, tem uma placa de 300 x 300 x 20 mm soldada na suas bases e foram parafusadas com as placas do mesmo tamanho soldadas na placa maior, assim se conseguiu fixar o equipamento na laje no laboratório. A Figura 3.2 apresenta esquematicamente o descrito anteriormente.

A Figura 3.3 apresenta a estrutura do equipamento, construído com perfis metálicos, e na Tabela 3-2 se apresenta a descrição dos tipos de perfis utilizados na construção do equipamento de cisalhamento direto.

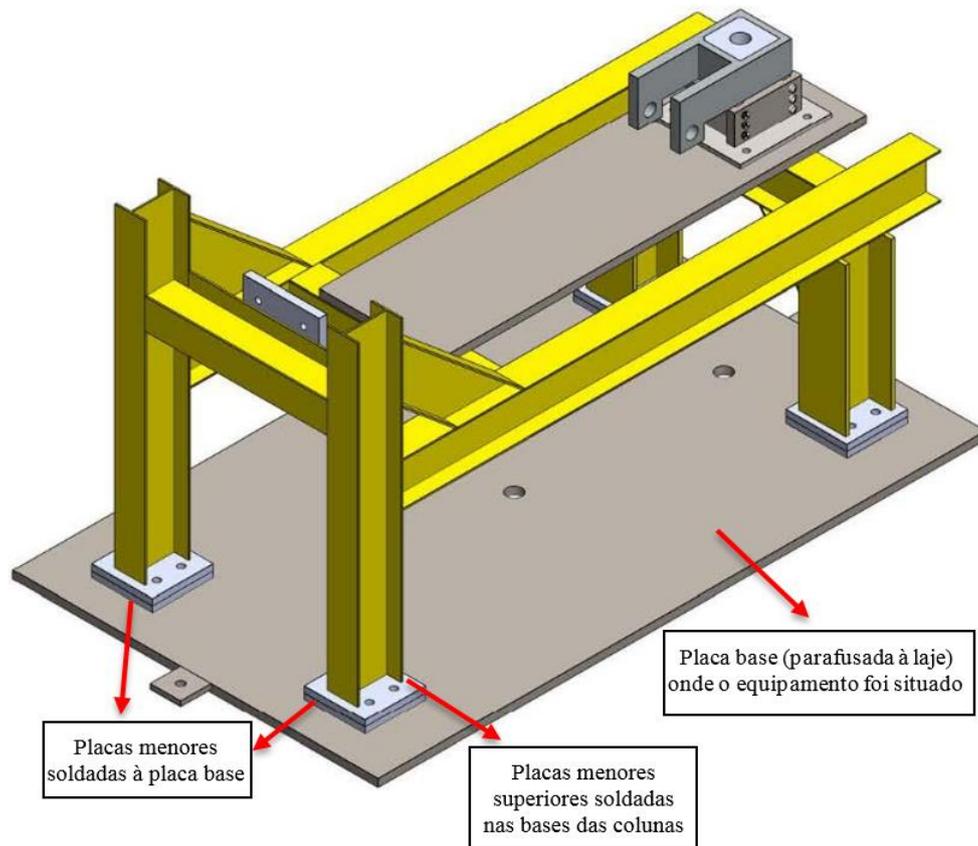


Figura 3.2: Detalhe da base do equipamento de cisalhamento direto

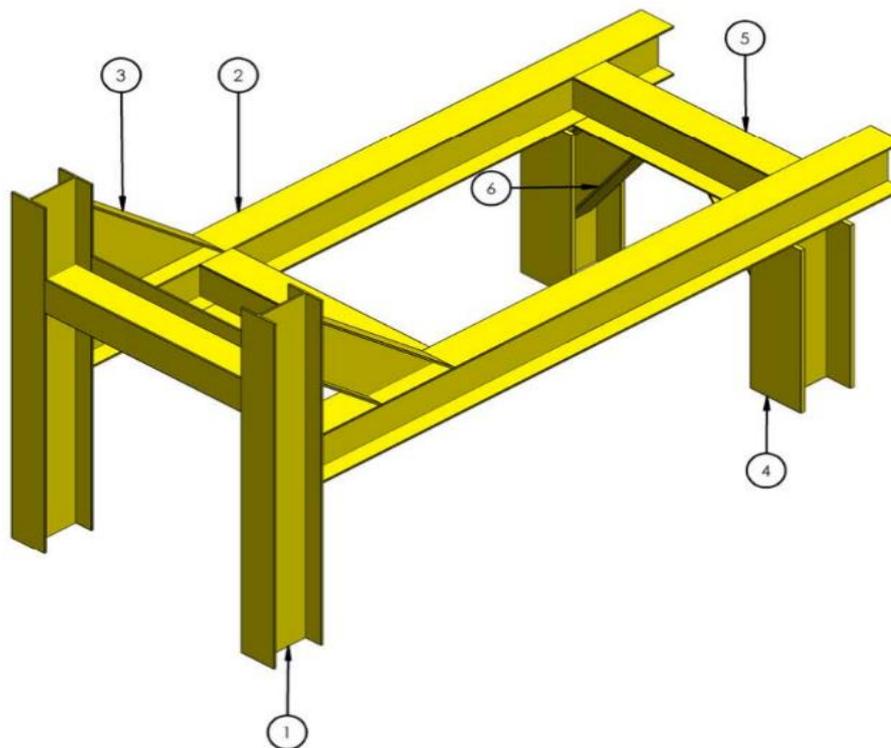


Figura 3.3: Vista da estrutura do equipamento de cisalhamento direto

Tabela 3-2: Detalhe dos perfis utilizados na construção do equipamento de cisalhamento direto

Perfil	Quantidade	Comprimento (mm.)	Tipo de Perfil
1	2	1044,5	W150X13
2	2	1770,61	W150X13
3	2	527,16	W150X13
4	2	491,1	W150X37.1H
5	3	695,7	W150X13
6	2	405,42	W150X37.1H

Na Figura 3.4, se apresenta o desenho da montagem do equipamento, todos os elementos estão numerados e descritos na Tabela 3-3.

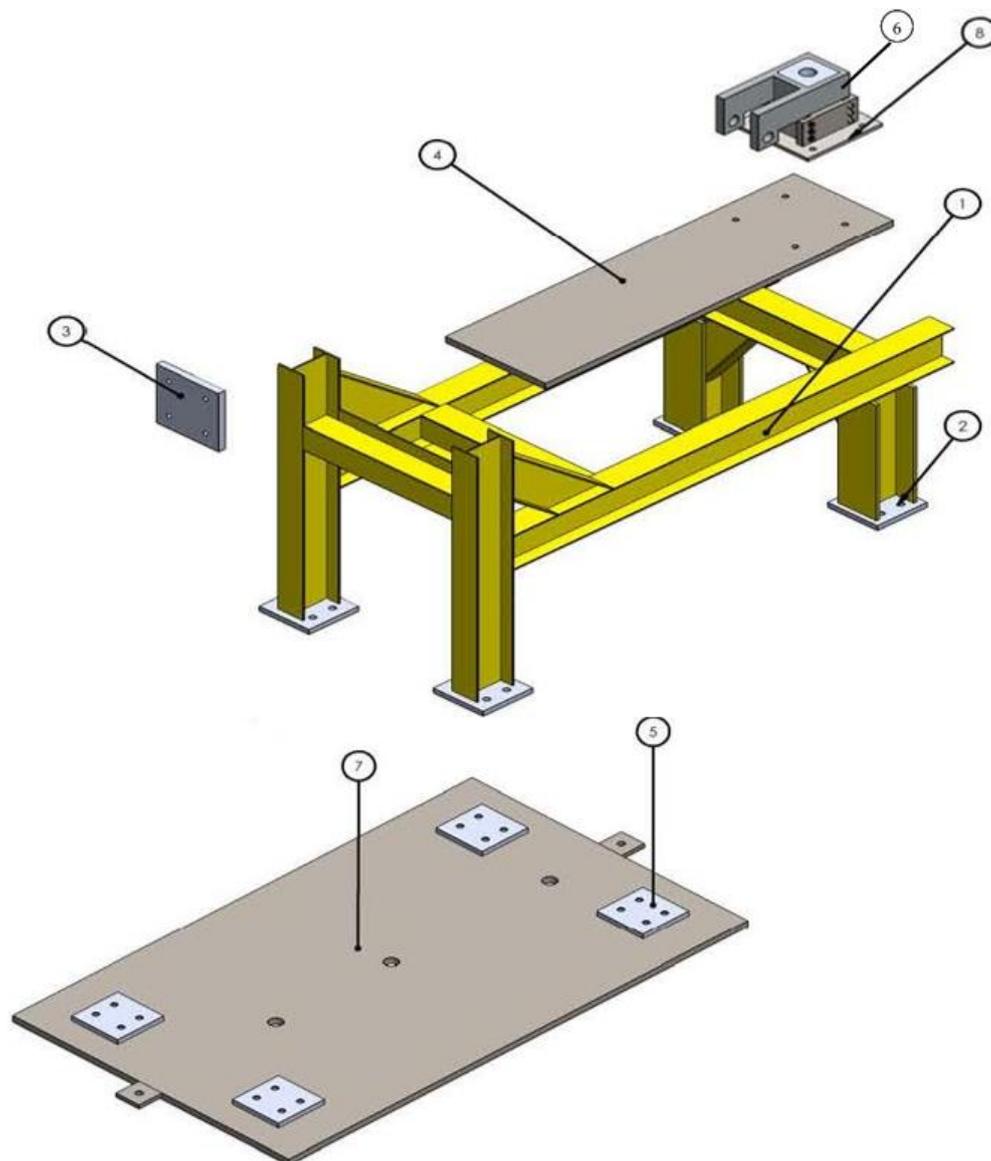


Figura 3.4: Esquema da montagem do equipamento de cisalhamento direto

Tabela 3-3: Peças da estrutura do equipamento de cisalhamento direto

Peça	Quantidade	Descrição
1	1	Estrutura do equipamento (perfis metálicos)
2	4	Placas menores superiores de apoio da estrutura soldadas nas colunas da estrutura
3	1	Placa de fixação do atuador horizontal
4	1	Placa principal de suporte do atuador horizontal e da caixa de cisalhamento
5	4	Placas menores inferiores de apoio da estrutura soldadas na placa base
6	1	Caixa de cisalhamento
7	1	Placa maior da base do equipamento, parafusada à laje
8	1	Placa base da caixa de cisalhamento inferior

Mostra-se as principais vistas do desenho do projeto, nas Figuras 3.5 - 3.8.

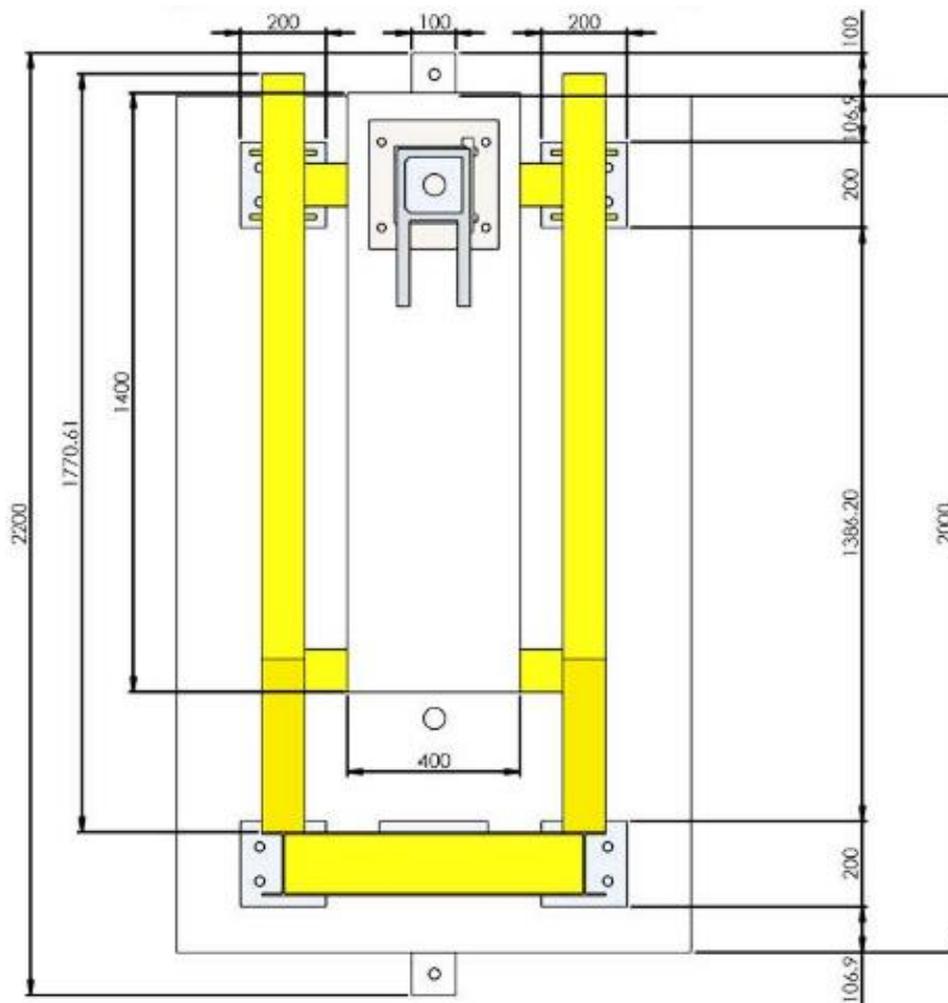


Figura 3.5: Vista esquemática em planta da estrutura do equipamento (medidas em mm)

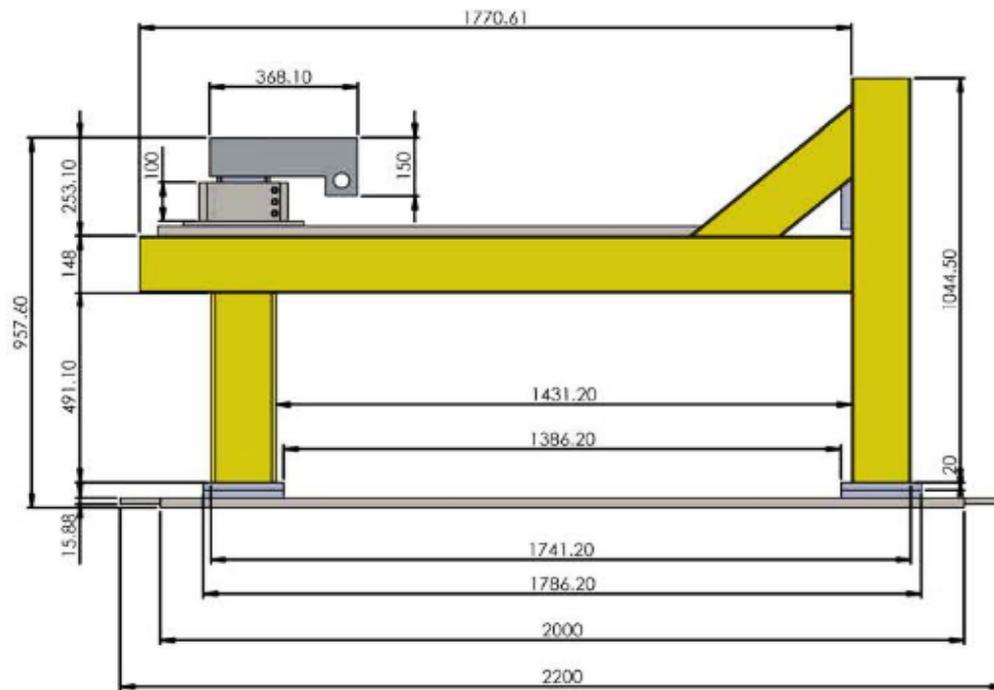


Figura 3.6: Vista esquemática lateral da estrutura do equipamento de cisalhamento direto
(medidas em mm)

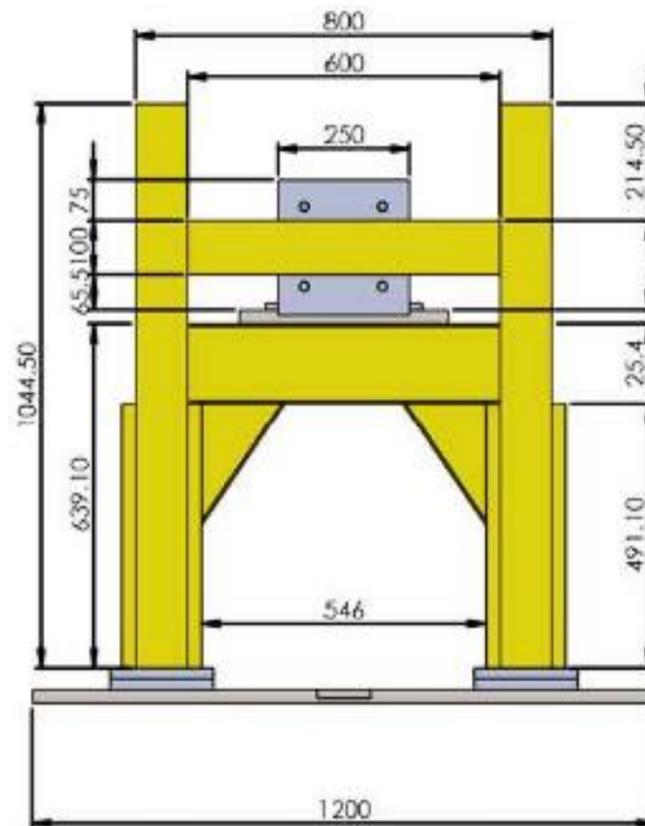


Figura 3.7: Vista esquemática posterior da estrutura do equipamento de cisalhamento direto
(medidas em mm)

A continuação exibe-se nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10, o equipamento de cisalhamento direto construído e em execução de ensaios. A Tabela 3-4 expõe a descrição das peças do equipamento de cisalhamento construído numeradas nas fotos.

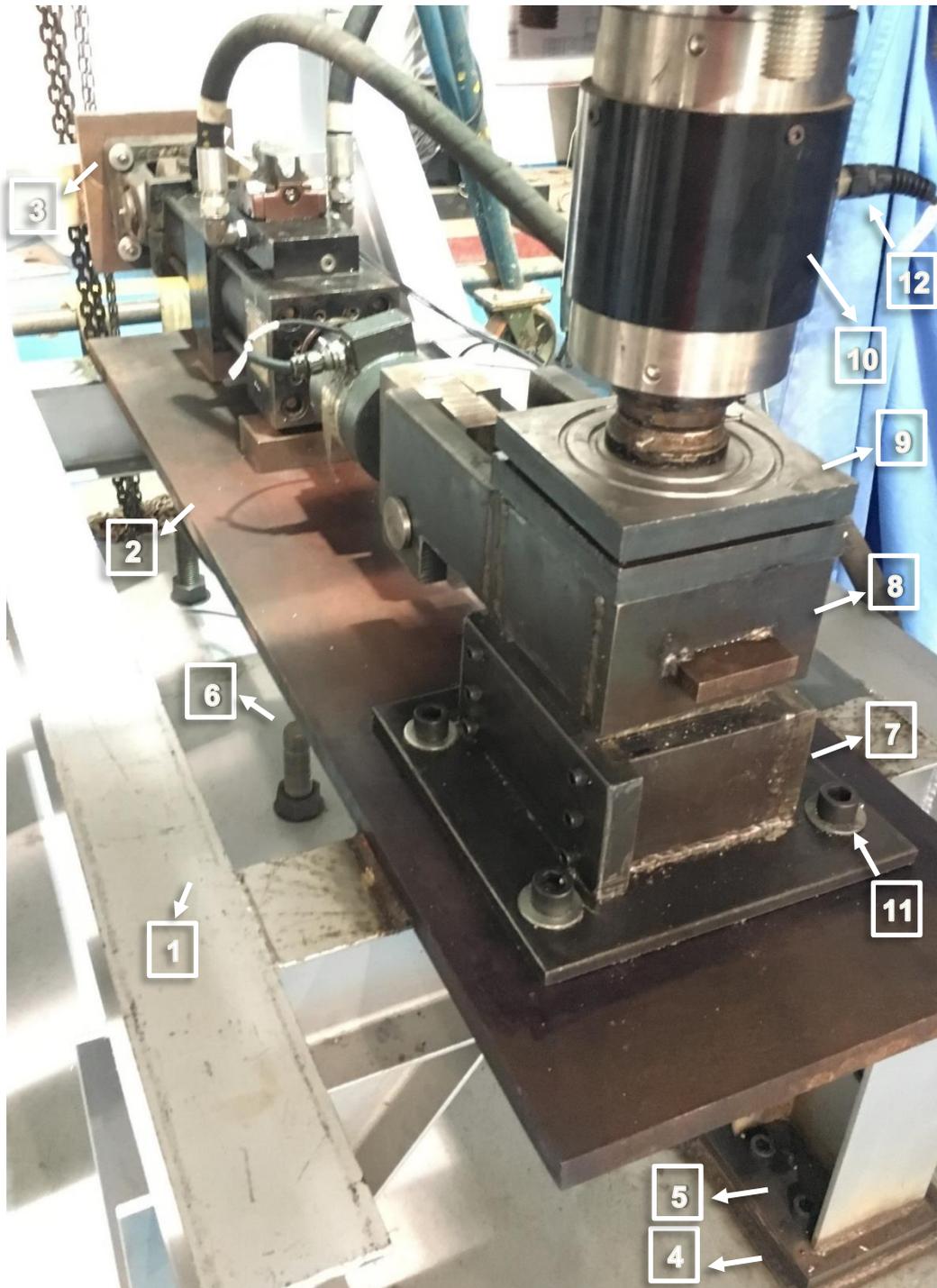


Figura 3.8: Equipamento de cisalhamento direto construído

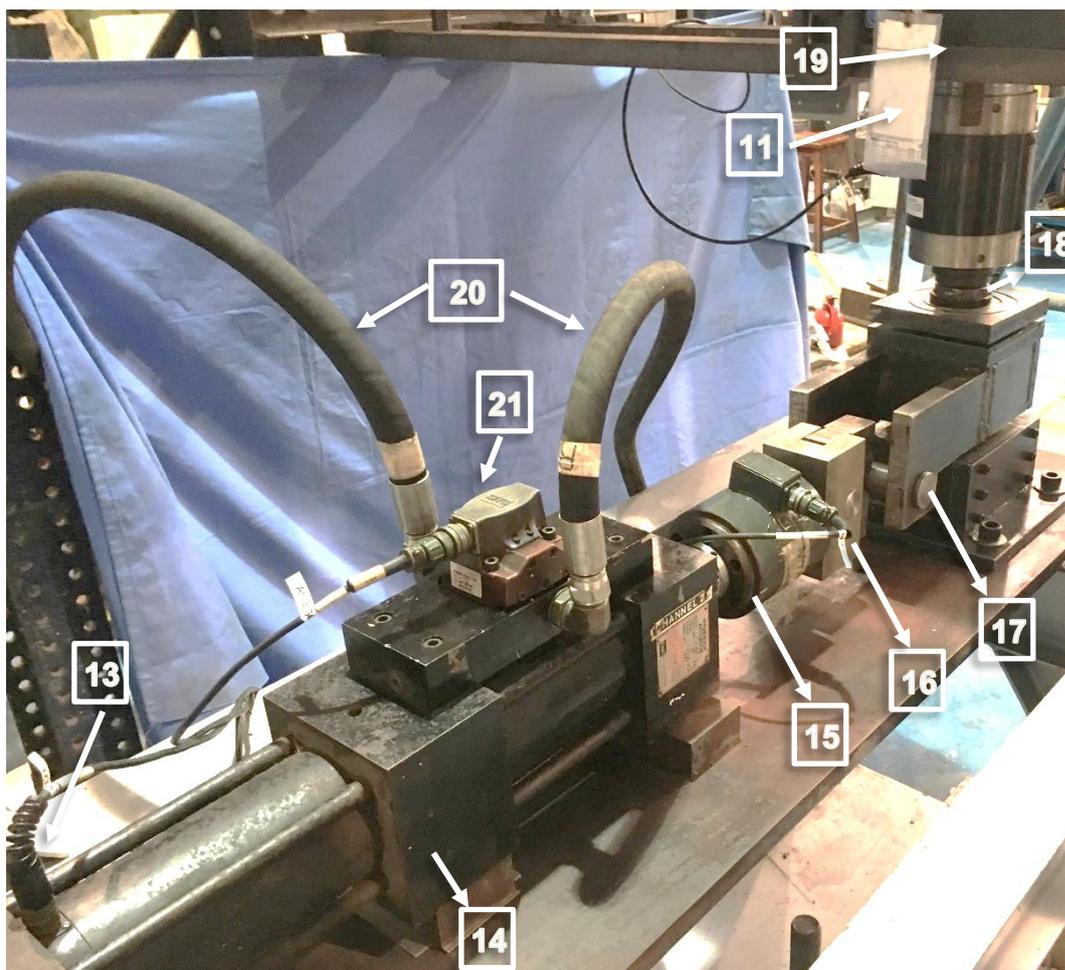


Figura 3.9: Vista posterior do equipamento de cisalhamento

Tabela 3-4: Peças da estrutura do equipamento de cisalhamento direto

Peça	Descrição
1	Estrutura do equipamento (perfis metálicos)
2	Placa principal de suporte do atuador horizontal e da caixa de cisalhamento inferior
3	Placa de fixação do atuador horizontal
4	Placas menores inferiores de apoio da estrutura soldadas na placa base
5	Placas menores superiores de apoio da estrutura soldadas nas colunas da estrutura
6	Placa maior da base do equipamento, parafusada à laje
7	Caixa de cisalhamento inferior
8	Caixa de cisalhamento superior
9	Sistema de redução de atrito
10	Célula de carga do atuador vertical
11	Parafusos para fixar a caixa inferior
12	Conetor do LVDT vertical
13	Conetor do LVDT horizontal
14	Atuador horizontal

Peça	Descrição
15	Célula de carga do atuador horizontal
16	Peça de conexão entre o atuador horizontal e o eixo metálico da caixa de cisalhamento superior
17	Eixo metálico (Rótula horizontal)
18	Rótula vertical
19	Atuador vertical
20	Conexão hidráulica do atuador horizontal (Pressão e Retorno)
21	Servoalvula do atuador horizontal



Figura 3.10: Equipamento de cisalhamento direto em andamento de ensaio

3.4. Caixas de cisalhamento

O equipamento contém duas caixas de cisalhamento apresentadas nas Figuras 3.11 – 3.17, que suportam os corpos de prova. As caixas são suficientemente rígidas, sua rigidez permite que a taxa de deslocamento do cisalhamento prescrito seja mantida constante e permite que o comportamento pós-pico das descontinuidades seja registrado adequadamente.

Foram desenhadas duas caixas de cisalhamento onde ambas metades do corpo de prova são fixadas, sendo elas a caixa superior e a inferior respectivamente. As caixas permitem o cisalhamento relativo e deslocamentos normais das descontinuidades de corpos de prova de até $130 \times 130 \text{ mm}^2$ na superfície de cisalhamento. A Tabela 3.5 fornece uma descrição das peças das caixas de cisalhamento.

Foi projetado um plano de cisalhamento entre as caixas de cisalhamento de 20 mm de espessura (Figura 3.15). Tanto a caixa de cisalhamento superior quanto a inferior têm peças de conexão (rótulas) que permitem a aplicação de forças nos corpos de prova, assim, foi aplicada a força cisalhante na metade do plano de cisalhamento na zona livre de cisalhamento entre as duas caixas, por tanto, a força de cisalhamento resultante foi aplicada no centroide do plano de cisalhamento e foi minimiza a rotação da amostra.

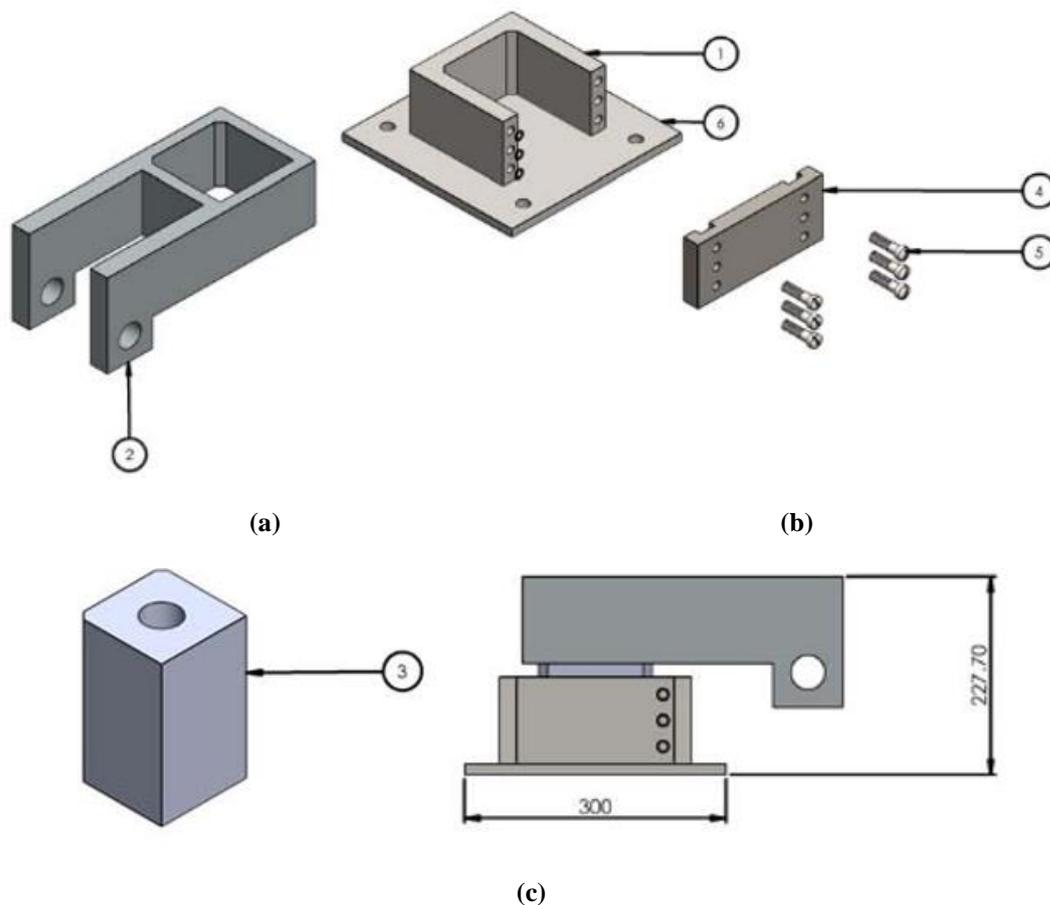


Figura 3.11: a) Desenho da caixa superior de cisalhamento, b) Desenho da caixa inferior de cisalhamento, c) Desenho das caixas superior e inferior de cisalhamento e vista esquemática da argamassa para preencher as amostras

Tabela 3-5: Peças da caixa de cisalhamento direto

Peça	Descrição das caixas de cisalhamento
1	Caixa inferior
2	Caixa superior
3	Exemplo de material de preenchimento (argamassa)
4	Tampa lateral da caixa inferior (parafusada)
5	Parafusos da tampa
6	Placa base da caixa inferior de cisalhamento

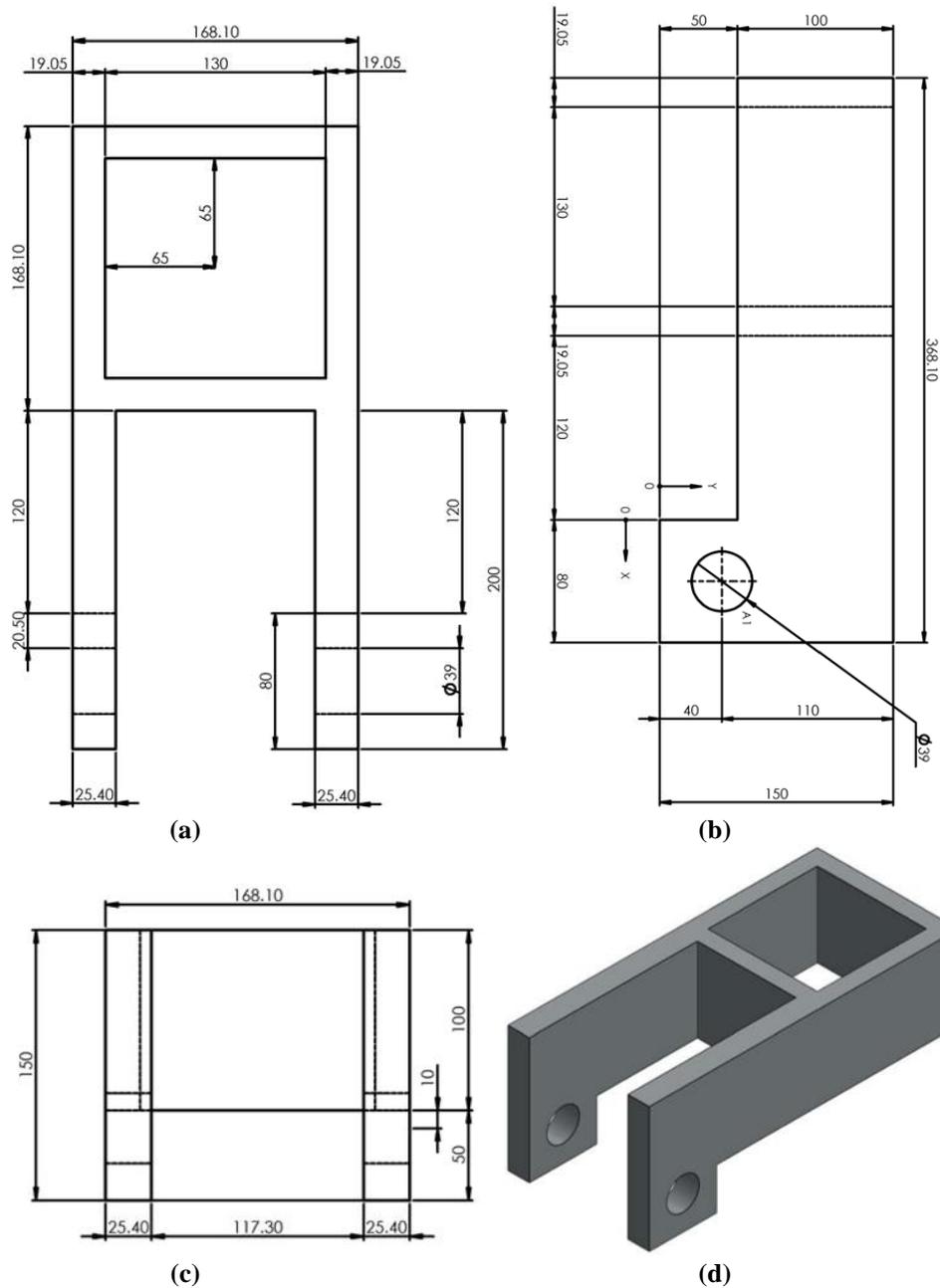


Figura 3.12: Desenho da caixa superior de cisalhamento (medidas em milímetros e sem escala): a) Vista em planta, b) Vista lateral, c) Vista frontal e d) Vista isométrica

Observe-se na Figura 3.12, que a caixa superior de cisalhamento possui um tipo de prolongamento, que permite a instalação de um eixo metálico de 39 mm de diâmetro. O eixo metálico permite a conexão de uma peça conectora metálica entre a caixa de cisalhamento e o atuador horizontal, realizando a mesma função de uma rótula em sentido horizontal. As caixas inferior e superior têm duas faces livres para facilitar a montagem e desmontagem dos corpos de prova.

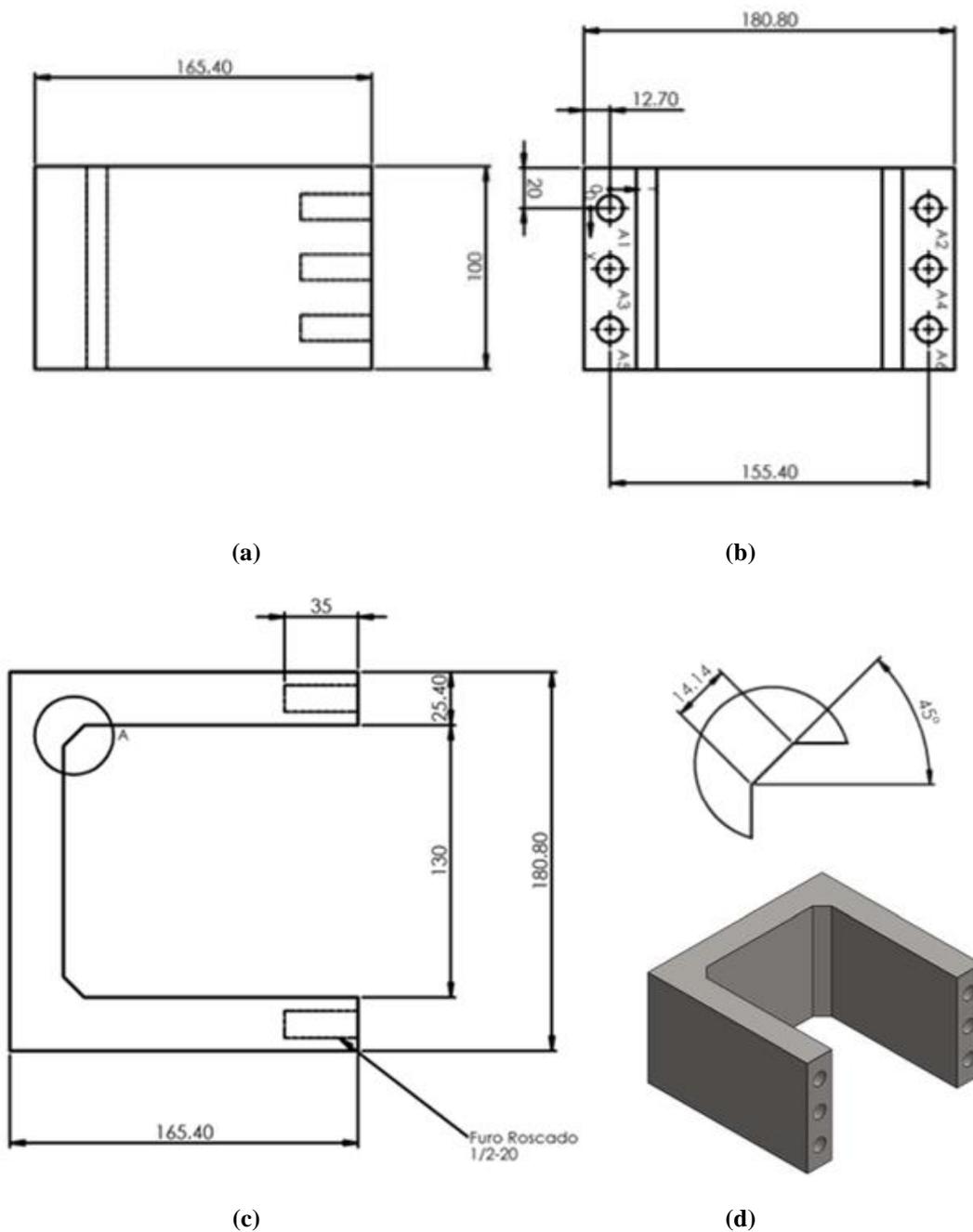


Figura 3.13: Desenho caixa inferior de cisalhamento (medidas em milímetros e sem escala): a) Vista lateral, b) Vista frontal, c) Vista em planta, d) Vista isométrica

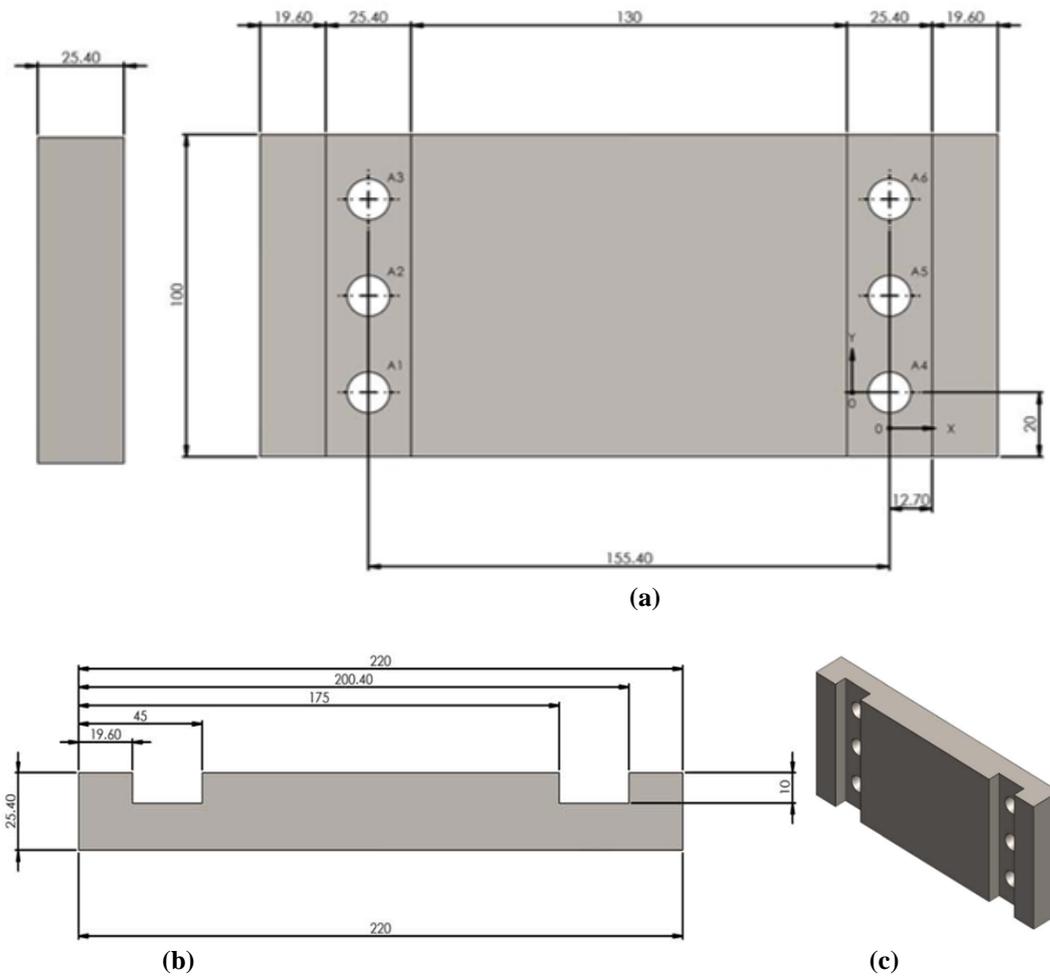


Figura 3.14: Desenho da tampa lateral da caixa inferior de cisalhamento (medidas em milímetros e sem escala): a) Vista frontal e espessura, b) Vista em planta, c) Vista isométrica

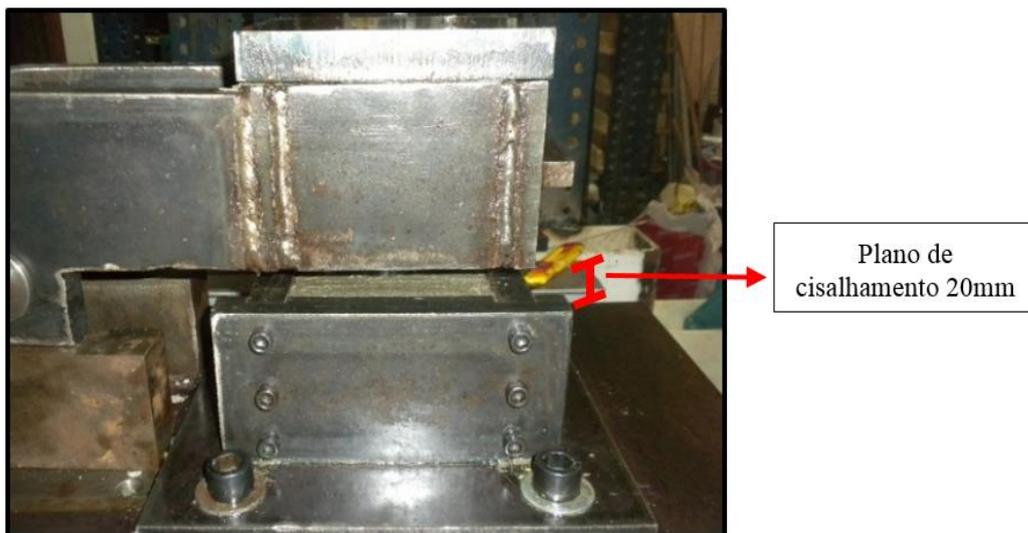


Figura 3.15: Caixas de cisalhamento, no processo de secagem da argamassa

As Figuras 3.13 e 3.14, apresentam detalhes do desenho da caixa inferior de cisalhamento. A caixa inferior de cisalhamento mantém uma posição fixa durante

o ensaio, através de quatro parafusos instalados na placa base dela, sendo parafusada na placa de suporte número 2, da Figura 3.4.

Nas Figuras 3.15, 3.16 e 3.17, se observam fotos das duas caixas de cisalhamento construídas de acordo com os desenhos apresentados anteriormente. Na Figura 3.15, se observa claramente a peça metálica desenhada para transmitir a força de cisalhamento no plano da descontinuidade durante o ensaio de cisalhamento direto. Na Figura 3.16, se apresenta uma vista frontal da caixa de cisalhamento com a rótula de carga normal instalada.

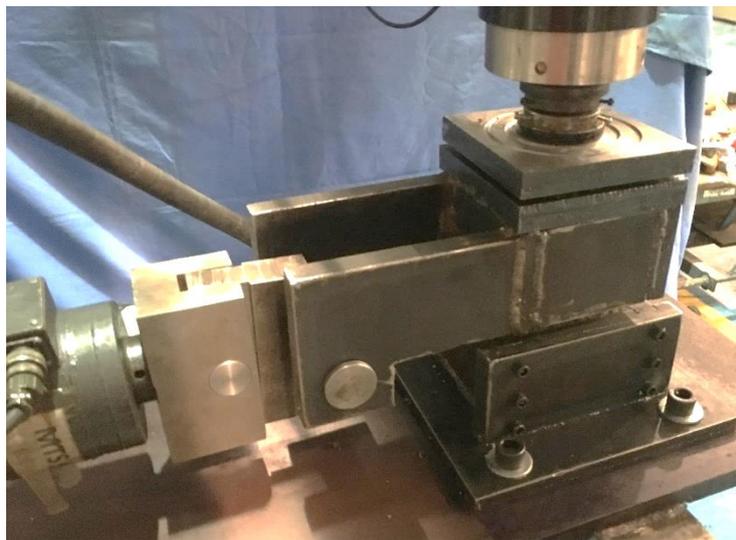


Figura 3.16: Caixas de cisalhamento, durante um teste em andamento

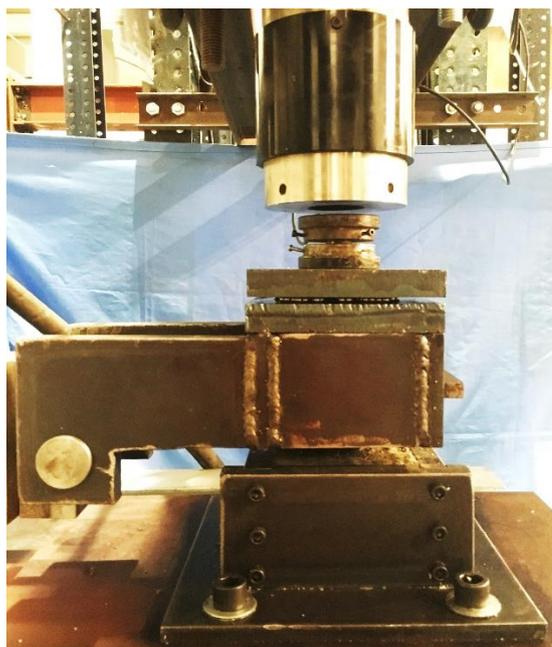


Figura 3.17: Caixas de cisalhamento, pouco antes de um ensaio de cisalhamento

Na Figura 3.18, se observa que as forças que produzem atrito no perímetro do suporte da amostra foram minimizadas através de um par de placas com esferas metálicas lubrificadas entre elas, para minimizar o atrito entre o sistema de aplicação da força normal e o quadro de reação durante o deslocamento da caixa superior, e a caixa inferior permaneceu fixa durante os ensaios de cisalhamento. Isso foi possível porque a caixa inferior foi parafusada à placa base do atuador horizontal da estrutura do equipamento de cisalhamento direto.

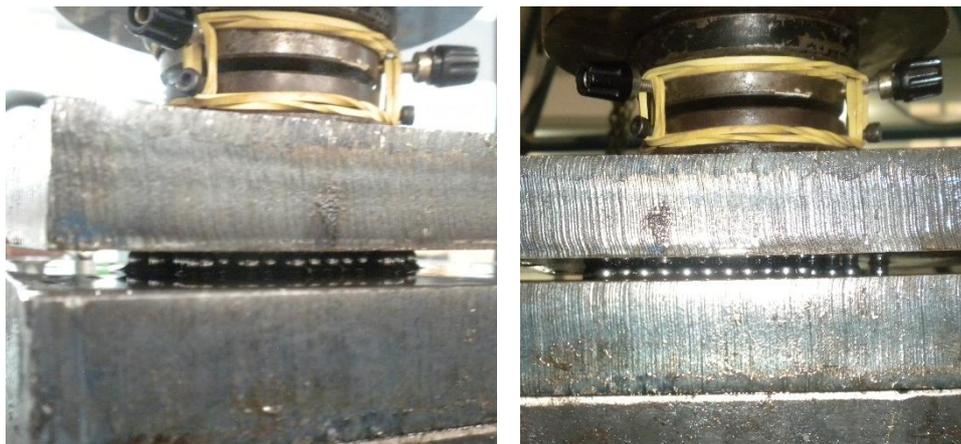


Figura 3.18: Sistema de redução de atrito

3.5. Sistema de aplicação da força cisalhante

O equipamento foi montado com um atuador hidráulico servo-controlado MTS, a sua capacidade de carga máxima é de 10 toneladas para a aplicação da carga cisalhante. A carga de cisalhamento foi aplicada através da célula de carga horizontal com capacidade de carga de até 10 toneladas, com peças de conexão projetadas para garantir que a carga de cisalhamento seja uniformemente distribuída sobre o plano de descontinuidade a ser testada com a força resultante atuando paralelamente ao plano de cisalhamento através do centroide.

O carregamento foi do tipo estático (rampa) no modo de controle de carga e deslocamento, e a taxa estática (rampa) é de 0,01 mm/min a 10 mm/min no modo de controle de deslocamento. Este tipo de transmissão de força dá liberdade de movimento lateral à caixa superior, simulando uma situação de deslizamento à qual as descontinuidades podem estar sujeitas nos problemas de estabilidade de taludes.

3.6. Sistema de aplicação da força normal

O equipamento foi montado com um atuador hidráulico servo-controlado com controle fechado fabricado pela empresa MTS Systems Corporation. O atuador proporciona a facilidade de manter a carga constante, independentemente de qualquer deformação que ocorra na amostra. O carregamento foi do tipo estático (rampa) no modo de controle de carga e a taxa estática foi de 0,01 mm/min a 10 mm/min no modo de controle de deslocamento. O atuador de força normal e a peça de conexão (rótula) foram projetados para garantir que a carga normal aplicada seja uniformemente distribuída no plano de ensaio com a força resultante perpendicular ao plano de cisalhamento através do centroide, e também para permitir a dilatação dos corpos de prova durante os ensaios. A carga normal foi aplicada através da célula de carga normal com capacidade máxima de carga de até 50 ton.

Segundo a ISRM (Muralha et al., 2013), a carga normal do equipamento deve ser mantida constante durante testes de cisalhamento, aplicando uma tolerância especificada $\pm 2\%$, a qual foi aplicado no equipamento desenvolvido.

3.7. Registro e aquisição de dados

Os dispositivos utilizados para medir as cargas normais e de cisalhamento aplicadas à amostra foram células de carga acopladas aos atuadores hidráulicos servo-controlados. Esses transdutores de força exibem baixa deflexão e um alto grau de rigidez, apresentando também um alto grau de concentricidade e paralelismo de componentes para dar maior precisão durante a configuração do teste. As forças normais e de cisalhamento no equipamento desenvolvido foram medidas com uma precisão de $\pm 0,5\%$ da capacidade de carga total. O transdutor de força da carga normal corresponde ao modelo 661.23F-01, concebido para medir forças de compressão com uma capacidade máxima de 50 toneladas. O transdutor de força da carga cisalhante corresponde ao modelo 661.218-03, concebido para medir forças de compressão com uma capacidade máxima de 10 toneladas.

Os deslocamentos normal e de cisalhamento foram medidos através de LVDTs (transdutores de deslocamento de variação linear) localizados dentro dos

atuadores: conforme a haste do pistão do atuador se move durante a operação, a tensão de saída do LVDT indica quanto a haste do pistão se moveu em relação ao ponto de referência zero. Dessa maneira foi possível obter as medidas de cargas e deslocamentos durante todo o ensaio. Dois LVDTs foram usados para este propósito, um LVDT foi montado verticalmente no centro da amostra para medir o deslocamento normal e outro LVDT é montado em paralelo com o plano de cisalhamento para medir o deslocamento de cisalhamento. As sensibilidades desses dispositivos são de 0,001 mm para deslocamento normal e deslocamento de cisalhamento.

A aquisição de dados foi feita através de um controlador MTS - FlexTest 60 mostrado na Figura 3.19, com sinal de processamento de 32 bits. O controlador possui 8 canais de controle e tem capacidade para receber até 6 estações de teste, possui uma taxa de atualização do sistema entre 4096 Hz - 2048 Hz, utilizando 3-8 canais de controle. O controlador converte os sinais mecânicos e elétricos em dados digitais. O sinal de saída foi conectado a um computador via cabo. Medições quase contínuas foram realizadas com uma taxa de amostragem de 0,15 mm / min. O software MTS TestSuite fornecido pela MTS Systems Corporation foi usado para registro de dados, o programa tem a facilidade de coletar dados e executar os gráficos necessários.

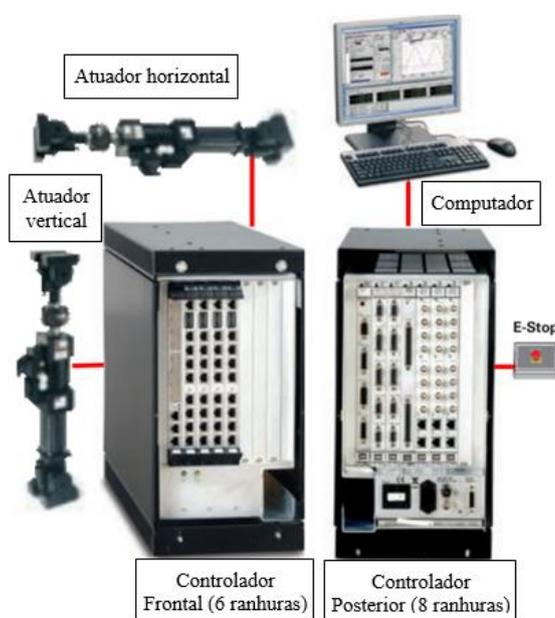


Figura 3.19: Vista esquemática do sistema de registro e aquisição de dados

4

Programa experimental

4.1.

Considerações iniciais

O programa experimental estabelecido tem como objetivo principal validar o equipamento de cisalhamento direto desenvolvido. Neste capítulo são apresentados os resultados dos trabalhos desenvolvidos durante a elaboração e pesquisa da dissertação de mestrado, bem como as técnicas e procedimentos utilizados nas medidas de parâmetros obtidos em laboratório. Como foi abordado anteriormente os fatores principais que controlam a resistência ao cisalhamento de juntas são a rugosidade da superfície das paredes, o seu estado de alteração e o nível de tensão normal a que estão submetidas.

4.2.

Materiais

Neste trabalho, foram abordados dois tipos de gnaisses, o Microclina gnaisses facoidal e o Plagioclásio biotita hornblenda gnaisses. Segundo Marques et. al. (2010), os gnaisses estão entre as rochas mais comuns encontradas na área metropolitana da cidade do Rio de Janeiro e grandes setores do sul do Brasil.

4.2.1.

Localização

As amostras estudadas correspondem aos testemunhos do túnel do Joá (Figura 4.1), sendo elas gnáissicas de composição granodiorítica, com microclina, plagioclásio, biotita, quartzo, hornblenda e eventual granada.

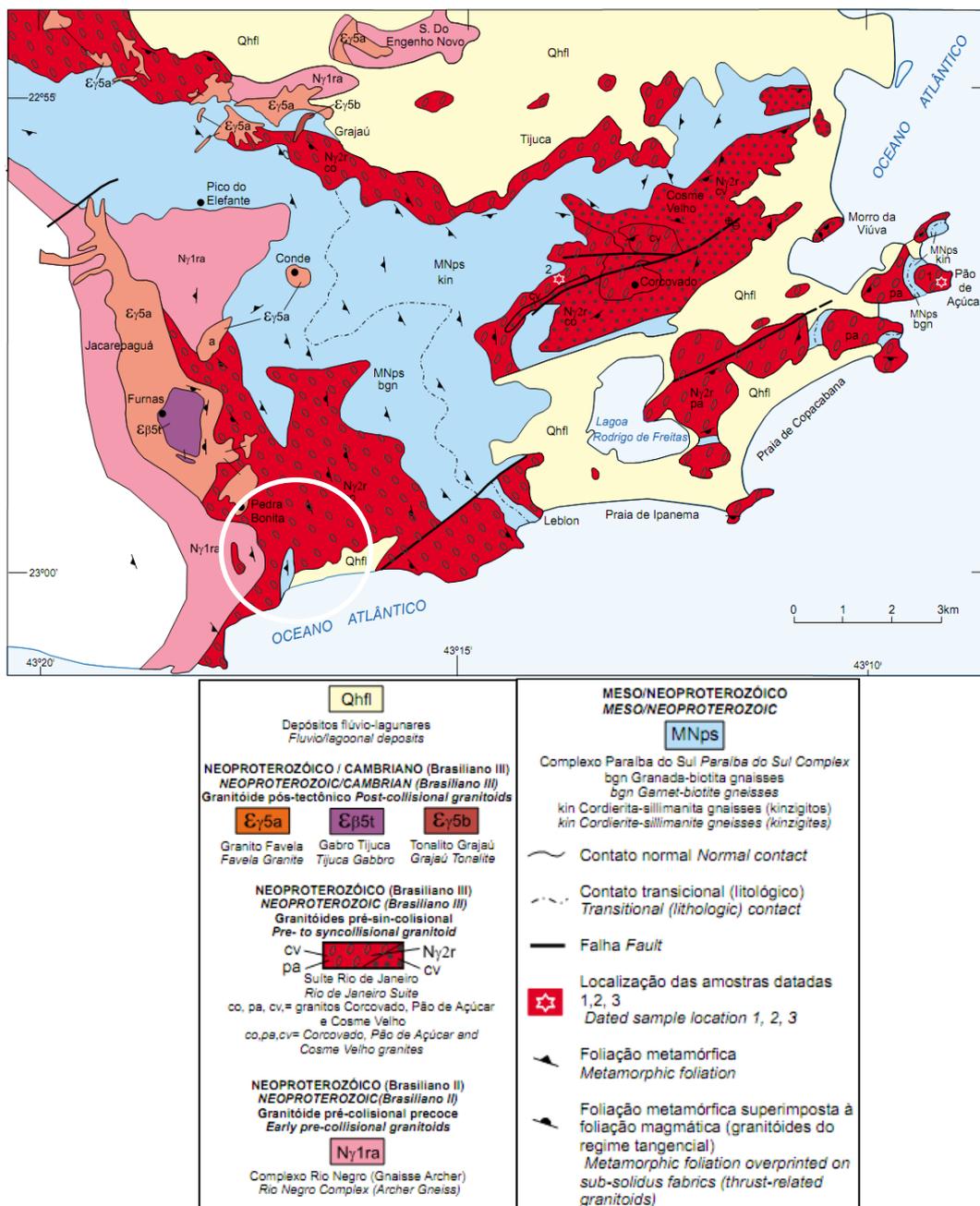


Figura 4.1: Mapa Geológico simplificado da Região Sul do Rio de Janeiro (Da Silva, 2001). Legenda: Círculo branco indica aproximadamente a localização do túnel do Joá, com Biotita Gnaíse, Gnaíse facoidal, etc.

4.2.2. Caracterização de amostras

As rochas foram classificadas como moderadamente alteradas segundo a Tabela 4-1 de graus de alteração de rochas proposta pelo IPT (1984).

Tabela 4-1: Graus de alteração (IPT, 1984 apud Castro, 2016)

Denominação	Característica da rocha
<i>Sã ou praticamente sã</i>	Apresenta minerais primários sem vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas insipientes. Neste caso a rocha é ligeiramente descolorida.
<i>Moderadamente alterada</i>	Apresenta minerais moderadamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
<i>Muito alterada</i>	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis
<i>Extremadamente alterada</i>	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

Esses tipos de rochas foram detalhados em estudos de caracterização realizados por Sampaio (2017). No trabalho de Sampaio (2017), as amostras foram enviadas para o laboratório de laminação do Instituto de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IGEO/UFRJ) para confecção das lâminas petrográficas. Em seguida, as amostras foram analisadas macroscopicamente, com utilização de lupa 10/20x, e microscopicamente, através de microscópio ótico com luz polarizada da marca Olympus, modelo CX31, com câmera (SC-30) acoplada para geração de imagens diretamente do microscópio no laboratório de Geotecnia da PUC-RJ.

De acordo com os resultados da caracterização microscópica, a maioria dos litotipos se apresentam como rochas medianamente alteradas, sem ocorrência de minerais preenchendo planos de fraturas ou ocorrência de minerais oxidados ou alguns resquícios que pudessem associar de maneira objetiva uma alteração de caráter intempérico. Portanto toda transformação mineralógica foi caracterizada como alteração hidrotermal, caracterizada pela atividade de fluidos superaquecidos que atuam na rocha através de brechas, fraturas e foliações, sendo assim depende da permeabilidade do maciço (Sampaio, 2017). Os processos de alteração hidrotermal identificados estão apresentados a seguir: Clorotização, Sericitização, Saussuritização, Muscovitização, Caulinização, Epidotização, Oxidação, Carbonatização e Serpentinização.

Sampaio (2017), descreveu da seguinte maneira a caracterização macroscópica dos litotipos e seu grau de alteração:

Amostra Microclina Gnaiss facoidal: Trata-se de uma rocha inequigranular, fina a grossa, porfírica. Os grãos de k-feldspato (microclina) possuem granulação grossa e apresentam certa orientação. A rocha apresenta bandamento gnáissico bem marcado, intercalação de bandas félsicas (hololeucocrática) milimétrica a centimétrica, e bandas máficas (mesocráticas) milimétricas. A rocha tem textura nematoblástica nas bandas félsicas e textura lepidoblástica nas máficas (Figura 4.2).

A composição mineralógica é dada por: k-feldspato, quartzo, biotita, plagioclásio e granada. O k-feldspato apresenta cor bege, com hábito tabular a prismático, grãos idioblásticos de granulação grossa. O quartzo é um mineral incolor, transparente, de brilho vítreo, com hábito granular, grãos xenoblásticos de granulação fina. A biotita é um mineral do grupo das micas, tem cor preta, hábito planar (micáceo), granulação fina e textura lepidoblástica. O plagioclásio tem cor cinza, hábito tabular, grãos hipidioblásticos e granulação fina. A granada possui hábito cúbico de cor vermelha.



Figura 4.2: Amostras de rocha tipo microclina gnaiss facoidal

Plagioclásio biotita hornblenda gnaiss (facoidal): A rocha apresenta textura granolepidoblástica, é equigranular de granulação fina, cor cinza. Apresenta bandamento gnáissico bem marcado, intercalação de bandas milimétricas félsicas (hololeucocrática) e máficas (mesocrática). Também é possível observar textura migmatítica.

A composição mineralógica é dada por: hornblenda, biotita, plagioclásio, microclina e quartzo.

A banda mesocrática é formada por hornblenda, mineral do grupo dos anfibólios, de cor preta. A biotita, mineral do grupo das micas, tem cor preta, hábito planar (micáceo), com textura lepidoblástica.

A banda hololeucocrática apresenta textura nematoblástica composta de grãos de feldspatos de cor cinza claro, hábito tabular, hipidioblásticos e granulação fina. O quartzo é um mineral incolor a cinza claro, com hábito granular e grãos xenoblásticos.

Na Figura 4.3, se apresenta uma amostra de Plagioclásio biotita hornblenda gnaiss estudada nesta dissertação.



Figura 4.3: Amostra de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss (Sampaio, 2017)

Para realizar os ensaios de cisalhamento direto, além de ter algumas amostras com descontinuidades naturais, outras descontinuidades artificiais foram criadas com o ensaio de carga pontual (“Point load test”) diametral, como se observa na Figura 4.4 e descrito na Tabela 4-2. Foram ensaiadas quatro amostras de diâmetro Nx (54mm) e 5 amostras de diâmetro Hx (76mm) de microclina gnaiss facoidal, as amostras Nx apresentaram juntas artificiais e as amostras Hx apresentaram juntas

artificiais (1Hx e 5Hx) e juntas naturais (2Hx, 3Hx e 4Hx). Por outro lado, cinco amostras de diâmetro Nx (54mm) de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss, foram testadas, todas apresentavam juntas artificiais.

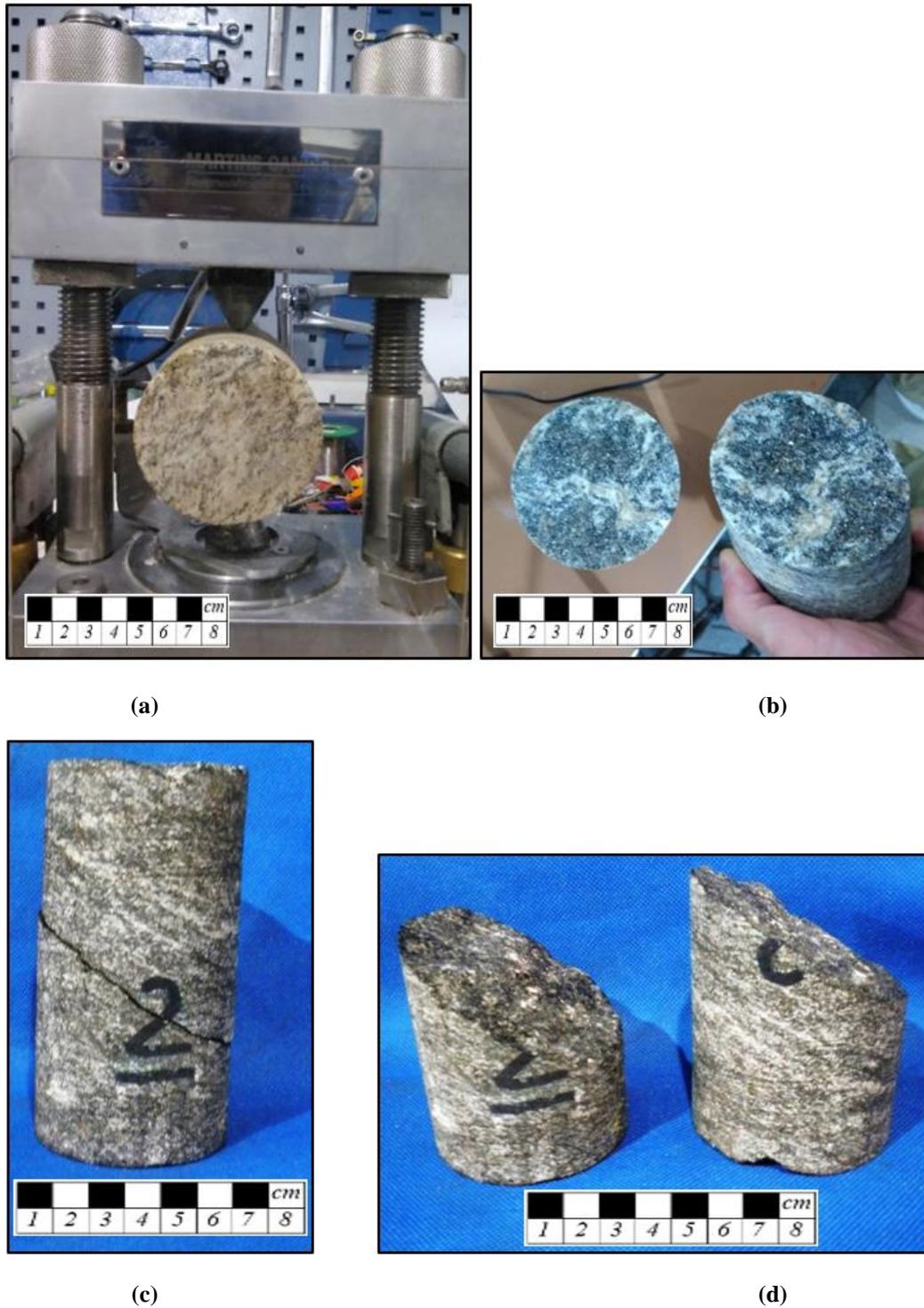


Figura 4.4: Processo de obtenção de amostras artificiais, através do ensaio de carga pontual: a) Equipamento do ensaio, b) Junta artificial gerada de microclina gnaiss Hx, c) Amostra de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss Nx, d) Junta artificial gerada de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.

Tabela 4-2: Tipo de descontinuidade das amostras estudadas

Amostra	Descontinuidade	
<i>Microclina Gnaiss Facoidal</i>	1 Nx	Artificial
	2 Nx	Artificial
	3 Nx	Artificial
	4 Nx	Artificial
	1 Hx	Artificial
	2 Hx	Natural
	3 Hx	Natural
	4 Hx	Natural
<i>Plagioclásio biotita hornblenda gnaiss</i>	5 Hx	Artificial
	1 Nx	Artificial
	2 Nx	Artificial
	3 Nx	Artificial
	4 Nx	Artificial
5 Nx	Artificial	

4.3. Caracterização da rugosidade

As Figuras 4.5 e 4.6, mostram o processo de caracterização da rugosidade no laboratório das amostras, e estão expressadas em unidades de JRC (Barton & Choubey, 1977). Os perfis de rugosidades das amostras foram obtidos e traçados utilizando um perfilógrafo modelador manual.

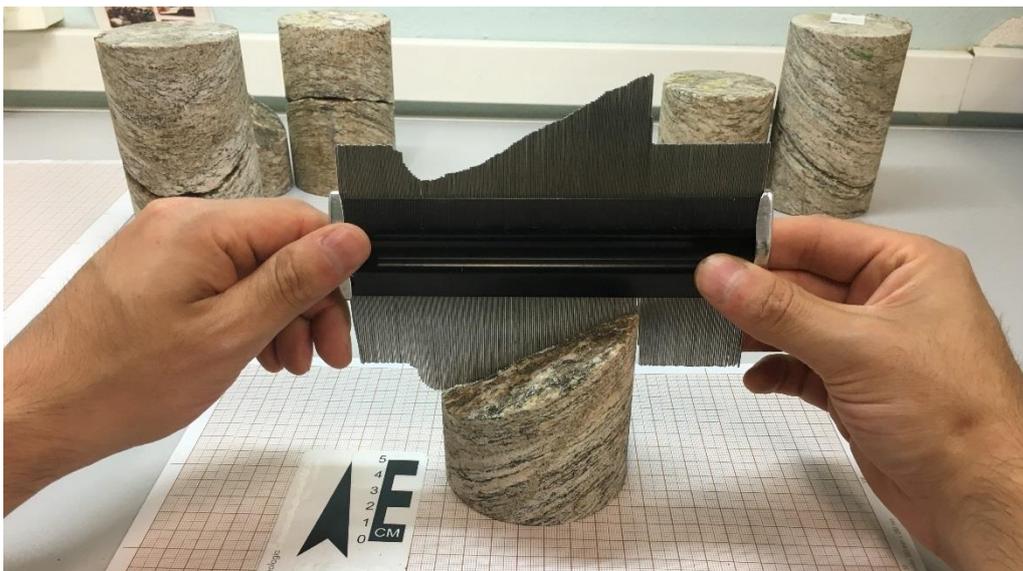


Figura 4.5: Obtenção de perfis de rugosidade das amostras das rochas tipo microclima gnaiss facoidal

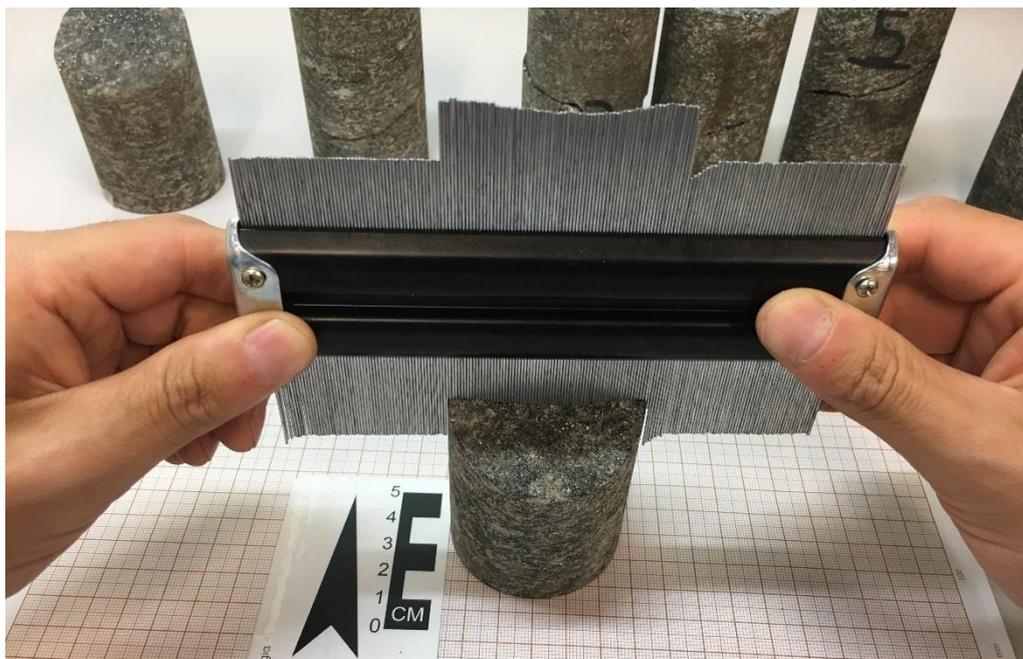


Figura 4.6: Obtenção de perfis de rugosidade das amostras das rochas tipo plagioclásio biotita hornblenda gnaisse

Como foi indicado anteriormente, os valores de JRC para cada amostra foram estimados a partir dos perfis de Barton & Choubey (JRC_{perfis}) e também correlacionados segundo a metodologia de Maerz et. al (1990) obtendo-se os valores de (JRC_{RP}), os resultados das medidas de rugosidade realizadas são apresentados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Valores do ângulo médio de inclinação das asperezas (i_{lab}) e valores de JRC a partir do parâmetro R_p (JRC_{RP}) e por comparação com os perfis de Barton & Choubey (JRC_{perfis})

Amostra		JRC_{RP}	JRC_{perfis}	$i_{\text{lab}} (^\circ)$	$i_{\text{pico}} (^\circ)$
<i>Microclina Gnaisse Facoidal</i>	1 Nx	12.94	9	14.19	20.77
	2 Nx	10.66	8	12.91	13.32
	3 Nx	7.69	6	11.00	10.20
	4 Nx	9.51	8	12.21	15.68
	1 Hx	10.28	8	12.68	14.98
	2 Hx	14.28	12	14.89	21.41
	3 Hx	11.90	11	13.62	22.23
	4 Hx	16.22	12	15.84	24.82
<i>Plagioclásio biotita hornblenda gnaisse</i>	5 Hx	8.11	9	11.29	14.77
	1 Nx	9.21	8	12.02	16,02
	2 Nx	14.23	10	14.87	28.23
	3 Nx	11.26	10	13.26	21.04
	4 Nx	10.58	7	12.86	12.25
	5 Nx	8.91	6	11.82	11,85

Segundo os valores obtidos na Tabela 4-3, se observa que os valores obtidos de JCR_{perfis} e JCR_{RP} para as amostras 2Hx, 3Hx e 4Hx são maiores do que os valores de JCR_{perfis} e JCR_{RP} para as amostras de diâmetros Nx, contrariamente ao exposto por Barton & Choubey (1977), que afirmam que o valor de JRC diminui com o aumento do comprimento da descontinuidade. Esse efeito pode ter sido causado devido a que as amostras 2Hx, 3Hx e 4Hx apresentam descontinuidades naturais, onde as rugosidades eram maiores e mais pronunciadas do que as rugosidades de amostras com juntas artificiais lisas.

4.4.

Determinação da resistência na superfície da descontinuidade

As medidas de resistência foram obtidas com o esclerômetro Schmidt tipo L, com as amostras apoiadas numa base de aço e o esclerômetro na posição vertical e aproximadamente perpendicular à foliação, sendo realizadas dez medidas por cada amostra. Foi feita a conversão das medidas de R em termos de MPa através de curvas de calibração propostas por Aydin & Basu (2005) e por Dearman & Irfan (1987). Sob outra perspectiva, foi utilizado o ábaco de Miller (1965, apud Barton & Choubey, 1977) sugerido por Barton & Choubey e apresentado na Figura 2.7, para obter as medidas de resistência à compressão da descontinuidade.

Tabela 4-4: Medidas esclerométricas das amostras ensaiadas

Amostra	R (superfície seca)	σ_c (MPa) Ábaco de Miller (1965)	σ_c (MPa) Aydin & Basu (2005)	σ_c (MPa) Dearman & Irfan (1987)	
<i>Microclina Gnaïsse Facoidal</i>	1 Nx	45.1	108	70	88
	2 Nx	44.4	108	69	83
	3 Nx	38.7	74	60	52
	4 Nx	37.3	72	58	45
	1 Hx	34.6	62	54	35
	2 Hx	33.8	61	52	32
	3 Hx	36.4	66	56	42
	4 Hx	34.6	62	54	35
	5 Hx	42.2	106	65	70
<i>Plagioclásio biotita hornblenda gnaïsse</i>	1 Nx	42.6	104	66	72
	2 Nx	46.3	129	72	96
	3 Nx	47.7	130	74	107
	4 Nx	38.7	76	60	52
	5 Nx	40.7	97	63	62

Todos os resultados são apresentados e comparados na Tabela 4-4. Os resultados representam a média de todas as leituras em cada amostra.

A resistência média à compressão simples da parede, medida com o carregamento na direção perpendicular, é apresentada na Tabela 4-5. Adotou-se uma meia dos resultados obtidos pelo método de Aydin & Basu (2005), já que os resultados das resistências do ábaco de Miller (1965), e da proposta de Dearman & Irfan (1987), apresentam uma dispersão maior nos resultados.

Tabela 4-5: Resistência média à compressão simples das amostras

Amostra	σ_c (MPa)
<i>Microclina gnaisse Facoidal</i>	60
<i>Plagioclásio biotita hornblenda gnaisse</i>	67

4.5. Procedimento do ensaio

O procedimento de ensaio realizado nesta dissertação concorda com os procedimentos sugeridos pela norma ISRM (Muralha et al., 2013) e ASTM D5607 (2016), considera também as sugestões apresentadas por Hencher & Richards (1989, 1993 e 2004).

Deve ser aceito que não é possível ensaiar no laboratório amostras que sejam verdadeiramente representativas de uma descontinuidade *in situ*. Por outro lado, é um engano acreditar que um teste *in situ* de talvez 1 m de comprimento seja mais realista e de alguma forma sejam reduzidos os efeitos de escala (Muralha et al., 2013). Tais testes em larga escala são muito caros, conseqüentemente poucos em número, muitas vezes difíceis de controlar e mal condicionados, de modo que são muito mais difíceis de interpretar do que os testes de laboratório devidamente conduzidos (Barla et al, 2011).

O mergulho das descontinuidades geralmente varia em uma escala de milímetros, centímetros, metros e incluem características de rugosidade variável. Amostras de dimensões similares da mesma junta muitas vezes têm geometrias bastante diferentes e, como observado anteriormente, uma única amostra irá evidenciar diferentes graus de interligação e dilatância quando cisalhadas em

diferentes direções, o que contradiz o conceito de atribuir um único JRC a uma amostra para caracterizar seu componente de rugosidade durante o cisalhamento, exceto para fins de caracterização geral.

A prática comum é ensaiar uma série de amostras com o objetivo de que a combinação de resistências de pico, de alguma forma, represente a resistência *in situ* da descontinuidade. Segundo Hencher & Richards (2014), os resultados muitas vezes apresentam dispersão e não podem ser interpretados de forma significativa, muito menos extrapolados para escala de campo. Portanto, é importante fazer correções para todos os dados de teste essencialmente para normalizar o efeito da rugosidade da amostra individual. Ao fazer isso, um ângulo de atrito básico pode ser calculado para uma superfície essencialmente plana, mas texturizada. O efeito da rugosidade da junta natural (primeira e segunda ordem) pode então ser considerado separadamente e adicionalmente ao avaliar a resistência *in situ*.

4.5.1. Amostragem

A ISRM (Muralha et al., 2013), no que se refere à amostragem, transporte e armazenamento de amostras, sugere que o plano de teste deve ser selecionado, e o mergulho, direção do mergulho e outras características geológicas relevantes devem ser registradas. Se possível, a orientação absoluta da amostra em relação ao plano de ensaio deve ser marcada na amostra, para que, no laboratório, a direção de cisalhamento corresponda à direção de deslocamento representativa e de interesse. As amostras que são extraídas, devidamente identificadas, orientadas, protegidas e transportadas ao laboratório podem ser moldadas nas caixas de cisalhamento. No presente trabalho o processo de amostragem não foi feito, já que as amostras foram fornecidas e se realizou o processo de preparação e montagem diretamente.

4.5.2. Preparação das amostras

As caixas de cisalhamento do equipamento podem abranger amostras com área de seção transversal retangulares, elípticas ou circulares, ou com alguma outra

forma, de modo que as áreas de seção transversal possam ser determinadas. As amostras ensaiadas neste trabalho apresentam áreas de seção transversal elípticas.

A altura da amostra deve ser maior do que a espessura da zona de cisalhamento (ensaio), e suficiente para ser fixada nas caixas de cisalhamento, com altura livre da amostra na zona de cisalhamento de 10 mm. As caixas de cisalhamento foram desenhadas para uma espessura de 20 mm no plano de cisalhamento e têm uma altura de 100 mm respectivamente (Figura 4.7).

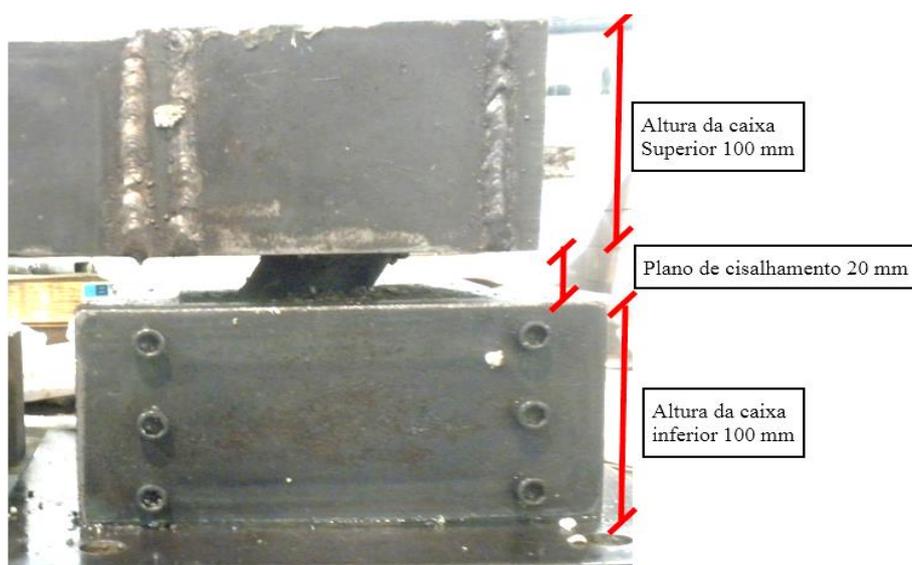


Figura 4.7: Espessura da zona de cisalhamento e a altura das caixas de cisalhamento

Segundo as normas e sugestões adotadas, o comprimento do plano de ensaio (medido ao longo da direção do cisalhamento) deve ser pelo menos 10 vezes a altura máxima de aspereza, a largura do plano de ensaio não deve mudar significativamente ao longo do comprimento de cisalhamento, e a largura mínima deve ser superior a 75% da largura máxima.

A metade da amostra que permanece fixa durante os ensaios de cisalhamento deve ter um comprimento maior do que a metade móvel, de modo que a junta seja sempre suportada e a área nominal em contato permaneça constante.

4.5.3. Montagem das amostras

Para ensaiar uma amostra de descontinuidade, cada metade da amostra deve ser fixada em cada metade das caixas de cisalhamento. Quando as amostras tiverem

uma altura maior do que a altura da caixa de cisalhamento (100 mm), deverão ser cortadas do lado oposto à descontinuidade para adequar à altura da caixa. Para levar a cabo os ensaios, além de haver algumas amostras com descontinuidades naturais, foi necessário gerar outras descontinuidades nas amostras (Figura 4.8). O resumo foi apresentado na Tabela 4-2.

Neste projeto, as amostras foram fixadas nas caixas de cisalhamento com argamassa com traço 3:1 e foi aplicado um aditivo sika 3, para obter uma secagem mais rápida da argamassa. Com isso foi possível garantir um ajuste apertado, e a montagem permitiu que o plano da descontinuidade fosse alinhado com o plano de cisalhamento.



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)



(g)

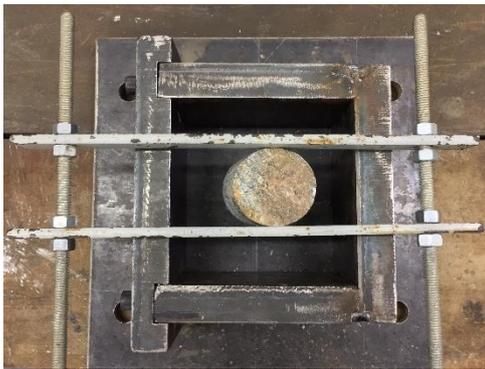
(h)

Figura 4.8: Tipos de amostras: a), b), c) e d) Amostras Hx de microclina gnaissé facoidal com juntas naturais, e) e f) Amostras Nx de plagioclásio biotita hornblenda gnaissé com juntas artificiais, g) e h) Amostra Hx de microclina gnaissé com juntas artificial.

As amostras foram montadas diretamente dentro da caixa inferior de cisalhamento do equipamento, posicionando a metade inferior da amostra centralmente na metade inferior da caixa de cisalhamento. Para isso, fabricou-se um grampo (Figura 4.9). Na hora de usar o grampo, deve-se certificar de que o horizonte de cisalhamento a ser ensaiado esteja fixo (grampo), paralelo ao plano de cisalhamento e orientado corretamente em relação à direção do cisalhamento.



a)



b)



c)

Figura 4.9: O grampo fabricado: a) O grampo segurando a amostra, b) A amostra posicionada na caixa inferior de cisalhamento, antes de colocar a argamassa e c) Depois de colocar argamassa

É importante verificar que a posição da amostra seja mantida durante o vazamento e cura da argamassa. Antes de colocar a argamassa deve se colocar um aditivo desmoldante de argamassa nas paredes das caixas de cisalhamento e também colocar um arame na parte inferior da amostra que será fixada na caixa inferior de cisalhamento, para depois amarrar a parte superior da amostra com a parte inferior (Figura 4.10).

Deve-se verificar que uma zona de 10 mm ao redor dos lados do plano de cisalhamento permaneça livre do material de encapsulação. Após a argamassa ser colocada na caixa inferior, não mexer o grampo de fixação da amostra até que a argamassa esteja curada e seca.

Logo que a argamassa esteja seca (aproximadamente 12 horas), é possível tirar o grampo, e a parte inferior da amostra ficará fixa na caixa inferior de cisalhamento. Depois é colocada uma placa espaçadora de isopor de espessura 20

mm acima da caixa inferior de cisalhamento, de modo que o plano de cisalhamento envolva a metade inferior fixada da amostra e abranja a espessura da zona do ensaio.

Em seguida, deve-se colocar a metade superior da amostra de ensaio acima da metade inferior fixada na caixa de cisalhamento inferior, conectar as duas metades da amostra, e realizar um ajuste do arame. Também se coloca uma fita ao redor da superfície de cisalhamento para proteger a junta da umidade da argamassa, logo, se posiciona a caixa superior de cisalhamento acima da placa de isopor sem perturbar a posição da metade superior da amostra e se coloca a argamassa, sem perturbar a montagem até que a argamassa cure (aproximadamente 12 horas).



Figura 4.10: Arame para amarrar as duas partes da amostra

Assim que a argamassa estiver seca, a placa espaçadora de isopor pode ser removida, corta-se o arame e a fita. Logo, colocar a tampa superior da caixa superior de cisalhamento, lubrificar a superfície da placa aplicando óleo redutor de atrito e colocar as esferas metálicas redutoras de atrito. Após deste procedimento, coloca-se uma placa metálica sobre as esferas e se situa a rótula vertical para a posterior aplicação de carga normal (Figura 4.11).

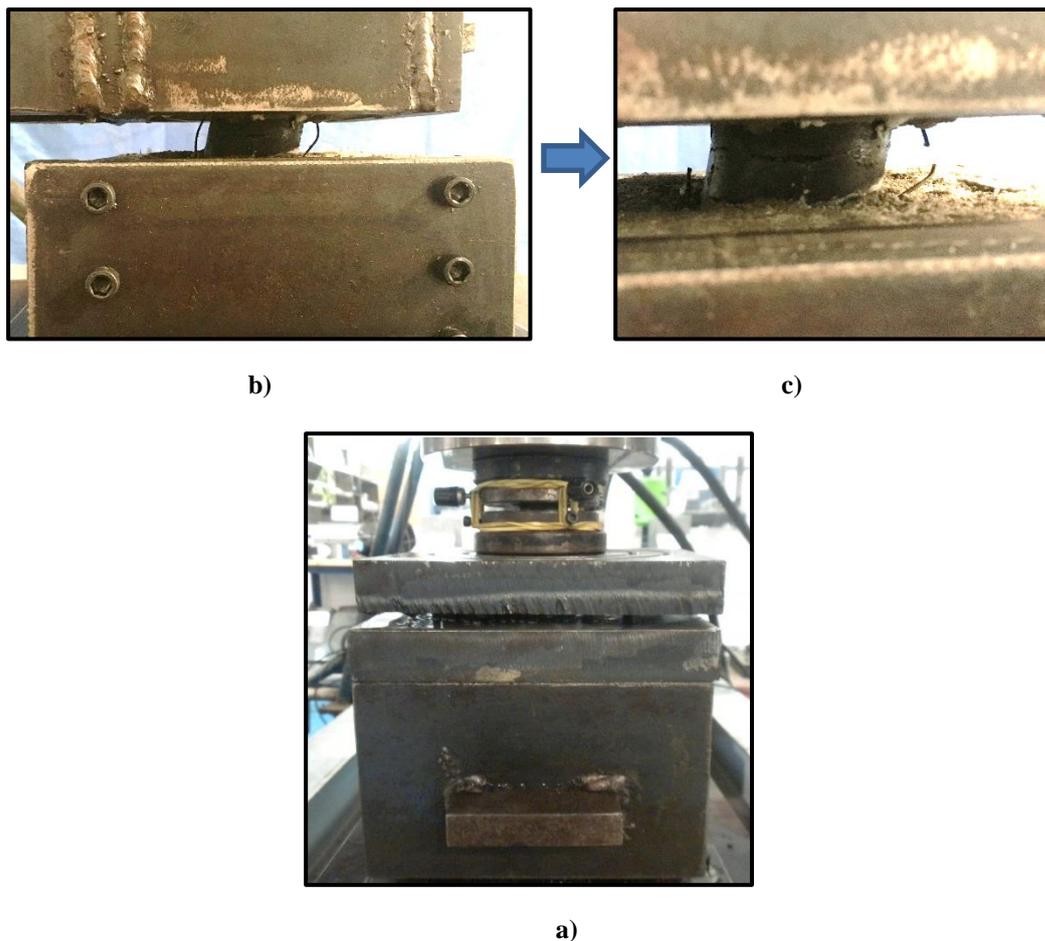


Figura 4.11: Montagem das amostras: a) Placa de isopor removida, b) Arame e fita cortados e c) Colocação do sistema de redução de atrito

Após a montagem, o plano médio das superfícies superior e inferior deve coincidir e deve ser paralelo ao plano de cisalhamento. Qualquer desvio angular entre o plano médio e o plano de cisalhamento, medido na direção do corte, deve ser medido e relatado, e esse desvio angular também deve ser considerado na determinação da resistência ao cisalhamento.

4.5.4. Metodologia de ensaio

Antes de qualquer conjunto de ensaios, as condições de carga normais a serem aplicadas durante o cisalhamento devem ser definidas, de acordo com as tensões normais que se espera que atuem nas discontinuidades no projeto em consideração (por exemplo, taludes, fundações de barragens, escavação subterrânea ou túnel). Nos ensaios foram consideradas cargas elevadas a fim de avaliar o comportamento do equipamento num cenário mais desfavorável, essas cargas estão descritas na

Tabela 4-6. Após a configuração inicial e feitas as descrições da amostra, a primeira carga normal foi aplicada, e esperou-se até que o deslocamento normal se estabilizasse para depois aplicar a carga de cisalhamento.

Tabela 4-6: Descrição das tensões normais aplicadas nos ensaios realizados em MPa.

Amostra		Tensão normal (σ_n) MPa Estágio 1	Tensão normal (σ_n) MPa Estágio 2	Tensão normal (σ_n) MPa Estágio 3	Tensão normal (σ_n) MPa Estágio 4	Tensão normal (σ_n) MPa Estágio 5
<i>Microclina Gnaïsse Facoidal</i>	1 Nx	10	8	6	4	2
	2 Nx	10	8	6	4	2
	3 Nx	2	3,7	5,6	7,4	9,3
	4 Nx	10	8	6	4	2
	1 Hx	10	8	6	4	2
	2 Hx	8	6	4	2	1
	3 Hx	10	8	6	4	2
	4 Hx	8,3	7,2	5,8	4,1	2,2
	5 Hx	10	8	6	4	2
<i>Plagioclásio biotita hornblenda gnaïsse</i>	1 Nx	2	4	6	8	-
	2 Nx	10	8	6	4	2
	3 Nx	8	6	4	2	-
	4 Nx	2,4	4,8	6,7	-	-
	5 Nx	2,2	4,3	6,45	-	-

O teste multiestágio envolve ensaiar a mesma amostra de descontinuidade por meio de uma série de cargas normais diferentes. Essa estratégia de teste permite obter uma informação máxima de cada amostra. Dessa maneira, nesta dissertação foi adotada a metodologia de ensaios multiestágio com reposição das amostras, que consiste em restaurar as amostras na sua posição original antes de mudar a carga normal. Isto permitiu que as superfícies sejam examinadas e que sejam removidos detritos soltos.

Foram realizados ensaios de vários estágios com aumento de cargas normais e também com redução de cargas normais. Em todos esses ensaios, se evidenciou que os danos causados nos primeiros estágios afetaram os resultados dos estágios posteriores, a análise e interpretação dos resultados é apresentado no capítulo 5 do presente trabalho. Tentou-se realizar cinco estágios para cada amostra, mas em algumas amostras não foi possível realizar esse número de ensaios, devido aos danos nas amostras gerados pelos estágios anteriores e o deterioro da superfície de cisalhamento.

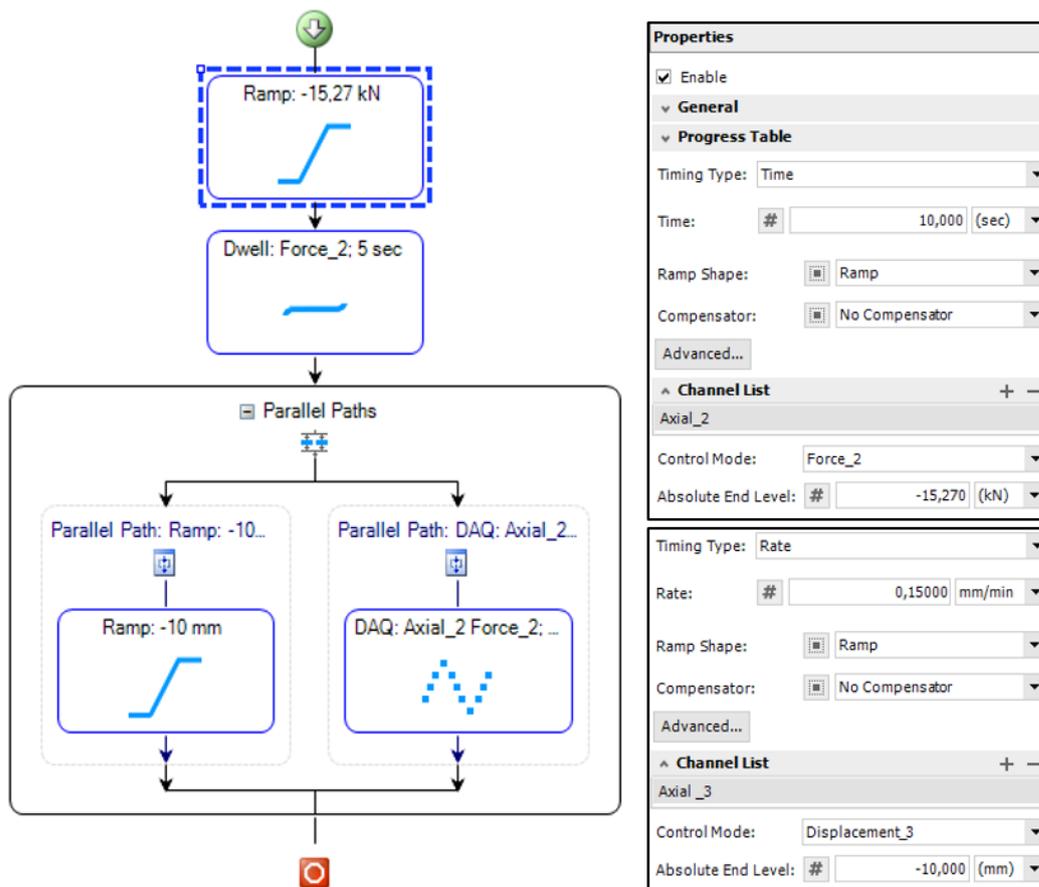


Figura 4.12: Programação da metodologia do ensaio

A metodologia do ensaio foi programada no software “TestSuite™” fornecido pela MTS Systems Corporation. A Figura 4.12, apresenta a programação do ensaio onde foi definido o carregamento do tipo estático (rampa) no modo de controle de carga para o atuador vertical que transmite a força normal. No caso do atuador horizontal que transmite a força cisalhante, o modo de controle foi de deslocamento com uma taxa de deslocamento do tipo estática (rampa) igual a 0,15 mm/min. A programação realizada permite a utilização simultânea dos dois atuadores no ensaio de cisalhamento direto. Durante os ensaios realizados, a reposição dos corpos de prova na posição inicial foi manual, e a carga normal era aumentada ou diminuída para o seguinte estágio diretamente na sequência da programação. Na Figura 4.13, se apresenta o plano de cisalhamento da metade inferior da amostra 1Hx de microclina gnaisse facoidal, antes e depois dos estágios dos ensaios de cisalhamento direto realizados com a metodologia descrita.

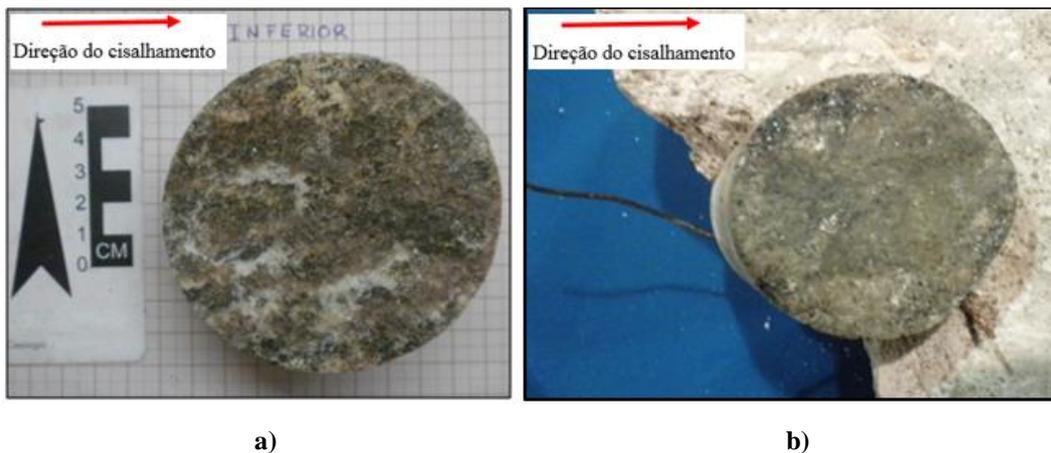


Figura 4.13: Vista em planta da amostra 1Hx de microclina gnaiss facoidal: a) Antes do ensaio de cisalhamento, e b) Depois do ensaio de cisalhamento

4.5.5. Dados do ensaio

Para poder analisar os resultados de forma adequada, os deslocamentos horizontais e verticais, além das cargas normais e cisalhantes foram registrados ao mesmo tempo durante todo o teste com frequência, utilizando os transdutores de deslocamento e as células de carga. Todos esses dados foram contidos pelo software e recuperados no formato de planilhas de Excel (.xlsx) e no formato de texto (.txt). Posteriormente, os dados foram analisados e obtidos os resultados. Foi aplicado o método de correção proposto por Hencher & Richards (2014), que faz uso de ângulos de rugosidade incremental em cada ponto de dados de esforço de cisalhamento para obter o ângulo de atrito básico.

Os dados obtidos são apresentados com gráficos mostrando a tensão de cisalhamento medida *versus* o deslocamento horizontal e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal. Esses dados estão no formato de apresentação final sugeridos pela ISRM e ASTM D5607 (2016).

5 Apresentação e análise dos resultados

5.1. Resistência ao cisalhamento

A análise dos gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante ($\delta_h \times \tau$), tensão normal *versus* tensão cisalhante ($\sigma \times \tau$) e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical ($\delta_h \times \delta_v$), apresentados no Apêndice I deste trabalho e obtidos nos ensaios de cisalhamento direto no equipamento desenvolvido, foi estudado e discutido por Cordova Rodriguez & Vargas Jr. (2018).

As figuras 5.1, 5.2 e 5.3, apresentam os gráficos dos resultados de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante ($\delta_h \times \tau$) e correspondem às amostras 4Nx de microclina gnaissae facoidal, 5Hx de microclina gnaissae facoidal e 1Nx de plagioclásio hornblenda gnaissae, respectivamente.

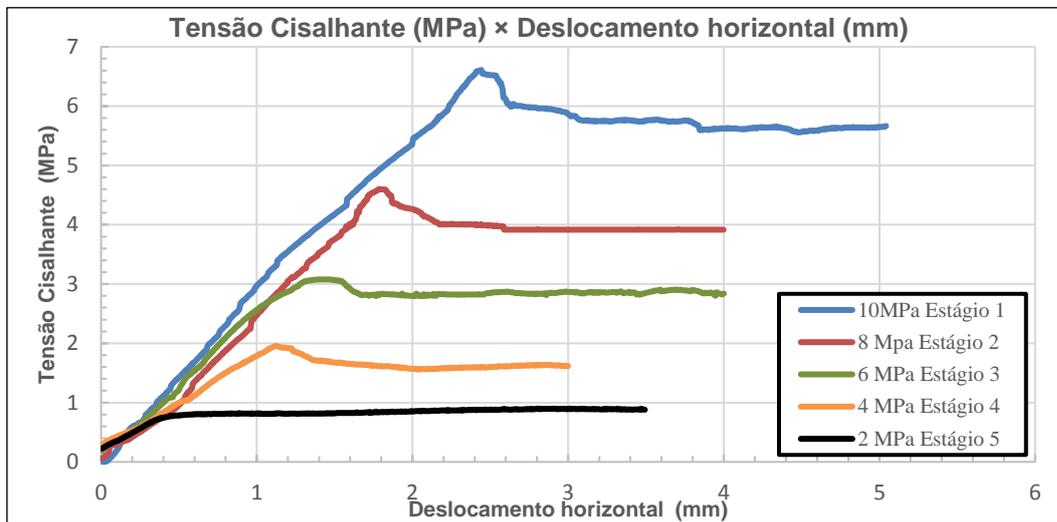


Figura 5.1: Comportamento ao cisalhamento da amostra 4Nx de microclina gnaissae facoidal

Os parâmetros de resistência obtidos para a amostra 4Nx (Figura 5.1) foram: o ângulo de atrito pico $\phi_p = 35,16^\circ$ e o ângulo de atrito básico $\phi_b = 25,76^\circ$.

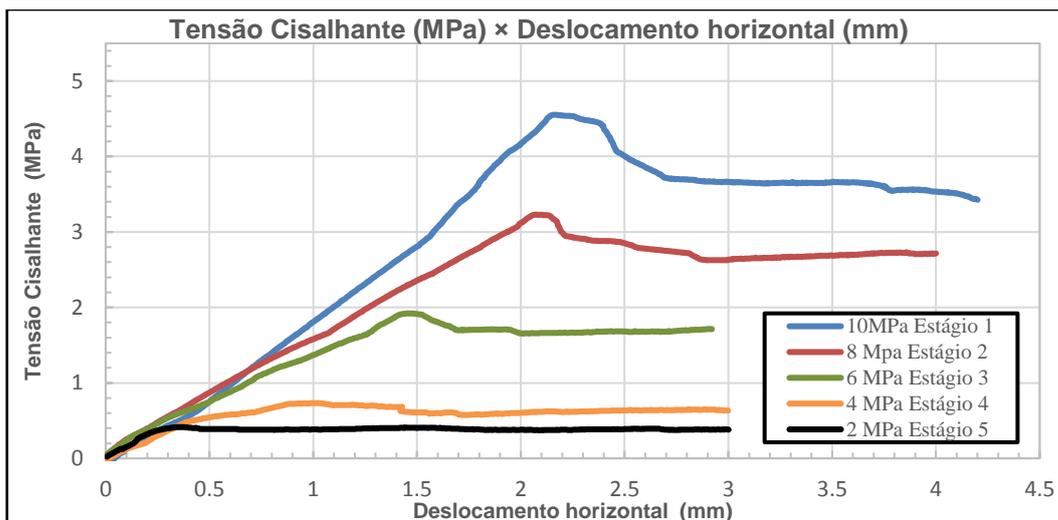


Figura 5.2: Comportamento ao cisalhamento da amostra 5Hx de microclina gnaiss facoidal

Os parâmetros de resistência obtidos para a amostra 5Hx (Figura 5.2) foram: o ângulo de atrito pico $\phi_p = 31,17^\circ$; um intercepto de coesão $c = -0,37$ Mpa e o ângulo de atrito básico $\phi_b = 26,69^\circ$.

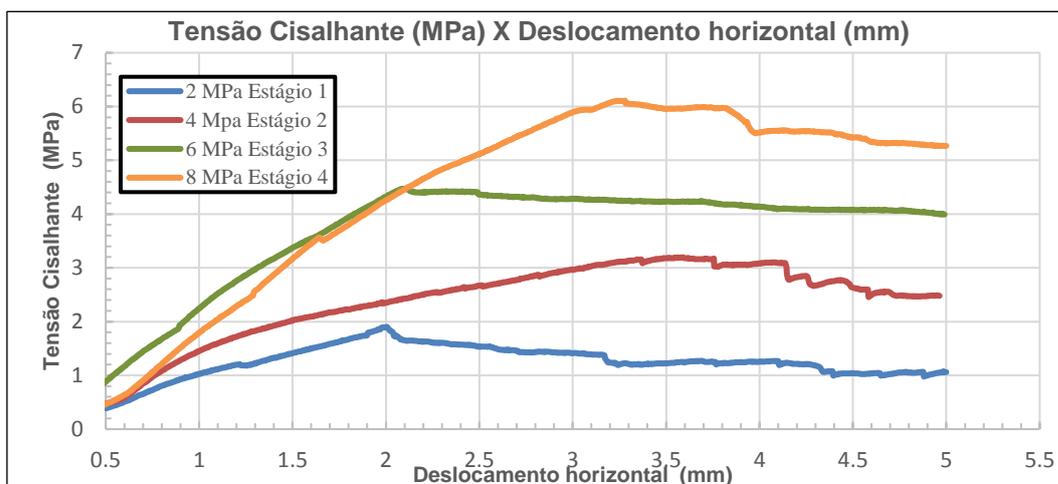


Figura 5.3: Comportamento ao cisalhamento da amostra 1Nx de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss

Os parâmetros de resistência obtidos para a amostra 1Nx (Figura 5.3) foram: o ângulo de atrito pico $\phi_p = 34,79^\circ$; um intercepto de coesão $c = 0,45$ Mpa e o ângulo de atrito básico $\phi_b = 28,52^\circ$.

De maneira geral, as amostras ensaiadas de microclina gnaiss facoidal e de plagioclásio biotita hornblenda biotita gnaiss apresentaram um comportamento frágil nos primeiros estágios de carregamento, observando-se que a medida que os estágios posteriores foram realizados, o comportamento das rochas mudou para um

comportamento dúctil. Evidenciando, que esse tipo comportamento está relacionado com a metodologia de ensaios multiestágio, tanto com o aumento e com a redução de cargas normais durante os estágios de ensaios. A continuação é realizada uma análise do comportamento das amostras ensaiadas.

Foi observado que as amostras de seção transversal menor do tipo de rocha microclina gnaiss facoidal 1Nx e 2Nx apresentam um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), nos primeiros três estágios onde os níveis de tensões normais são maiores (10, 8 e 6 MPa). Contudo, nos últimos dois estágios feitos o nível de tensões normais foi diminuído (4 e 2 MPa) e o comportamento foi dúctil.

A amostra 3Nx do tipo de rocha microclina gnaiss facoidal apresenta um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), em todos os estágios realizados, sendo praticado um ensaio multiestágio com incremento de níveis de tensão (2 - 3,7 - 5,6 - 7,4 e 9,3 MPa).

A amostra 4Nx do tipo de rocha microclina gnaiss facoidal apresenta um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), nos dois primeiros estágios (10 e 8 Mpa) onde os níveis de tensão normal são maiores. Nos últimos três estágios feitos o nível de tensões normais foi diminuído (6, 4 e 2 MPa) e o comportamento foi dúctil, sendo praticado um ensaio multiestágio com diminuição de níveis de tensão.

A amostra 1Hx do tipo de rocha microclina gnaiss facoidal apresenta um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), nos primeiros três estágios realizados, sendo praticado um ensaio multiestágio com diminuição de níveis de tensões (10 - 8 - 6 - 4 e 2 MPa). Nos últimos dois estágios o comportamento foi dúctil.

Os resultados da amostra 2Hx de seção transversal maior do tipo de rocha microclina gnaiss facoidal apresentam um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), nos primeiros dois estágios onde os níveis de tensões normais são maiores (8 e 6 MPa). Nos últimos três estágios feitos o nível de tensões normais foi diminuído (4, 2 e 1 MPa) e o comportamento foi dúctil.

As amostras 3Hx e 5Hx do tipo de rocha microclina gnaiss facoidal apresentam um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), nos primeiros dois estágios realizados, sendo praticados ensaios multiestágio com diminuição de

níveis de tensão (10 - 8- 6 - 4 e 2 MPa). Nos últimos três estágios, o comportamento foi dúctil.

Os resultados da amostra 4Hx de seção transversal maior do tipo de rocha microclina gnaiss facoidal apresentam um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), nos primeiros dois estágios onde os níveis de tensões normais são maiores (8,3 e 7,2 MPa). Nos últimos três estágios feitos o nível de tensões normais foi diminuído (5,8 – 4,1 e 2,2 MPa) e o comportamento se tornou dúctil.

Todas as amostras do tipo de rocha microclina gnaiss facoidal (9 amostras) apresentavam boas condições de encaixe, mas, à medida que os ensaios foram realizados (multiestágio), os seus comportamentos nas curvas ($\delta_h x \tau$) mudaram devido à diminuição das asperezas.

Os resultados da amostra 1Nx do tipo de rocha plagioclásio biotita hornblenda gnaiss apresentam um comportamento frágil na curva ($\delta_h x \tau$), no primeiro estágio onde o nível de tensão normal é menor (2 MPa). Nos últimos quatro estágios realizados os níveis de tensões normais foram incrementados (4, 6 e 8 MPa) e o comportamento foi dúctil.

Os resultados da amostra 2Nx do tipo de rocha plagioclásio biotita hornblenda gnaiss apresentam um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), no primeiro e segundo estágio (10 e 8 MPa) onde os níveis de tensões normais são maiores. Nos últimos três estágios realizados os níveis de tensões normais foram reduzidos (4, 2 e 1 MPa) e o comportamento foi dúctil.

Os resultados da amostra 3Nx do tipo de rocha plagioclásio biotita hornblenda gnaiss apresentam um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), no primeiro e segundo estágio (8 e 6 MPa) onde os níveis de tensões normais são maiores. Nos últimos dois estágios realizados os níveis de tensões normais foram reduzidos (4 e 2 MPa) e o comportamento se tornou dúctil.

Os resultados da amostra 4Nx do tipo de rocha plagioclásio biotita hornblenda gnaiss apresentam um comportamento frágil nas curvas ($\delta_h x \tau$), no primeiro e segundo estágio (2,4 e 4,8 MPa) onde os níveis de tensões normais são menores. No último estágio realizado o nível de tensão normal foi aumentado (6,7 MPa) e o comportamento foi relativamente dúctil.

Todas as amostras do tipo de rocha plagioclásio biotita hornblenda gnaiss (5 amostras) as discontinuidades apresentavam boas condições de encaixe entre as duas metades das amostras, mas à medida que os ensaios foram realizados (multiestágio) os seus comportamentos nas curvas ($\delta_h \times \tau$) mudaram devido à diminuição das asperezas.

As curvas ($\sigma \times \tau$) dos corpos de prova mostram um comportamento, por vezes, linear que não se ajusta aos modelos de Patton (1966) ou Barton & Choubey (1977).

Possivelmente, os níveis de tensão normal em que foram conduzidos os ensaios foram elevados de tal forma a romper as asperezas que controlam a resistência da junta.

Os resultados de todos os gráficos plotados num mesmo gráfico ($\sigma \times \tau$) de todas as amostras de microclina gnaiss facoidal foram representados na Figura 5.4, e revelam uma dispersão nos resultados, sendo maior para as amostras de menor dimensão (Nx) do que para as de maior dimensão (Hx), evidenciando a variação da rugosidade. A envoltória de resistência de pico das amostras (Hx) se apresenta através da Equação 5.1, e os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos são: ângulo de atrito pico $\phi_p = 32,15^\circ$ e um intercepto de coesão $c = 0,08$ Mpa.

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg}(32,15) + 0,08 \quad (5.1)$$

Da mesma forma, os parâmetros de resistência obtidos para amostras menores (Nx) são: ângulo de atrito pico $\phi_p = 30,77^\circ$ e um intercepto de coesão $c = 0,03$ Mpa, conforme a Equação 5.2:

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg}(30,77) + 0,03 \quad (5.2)$$

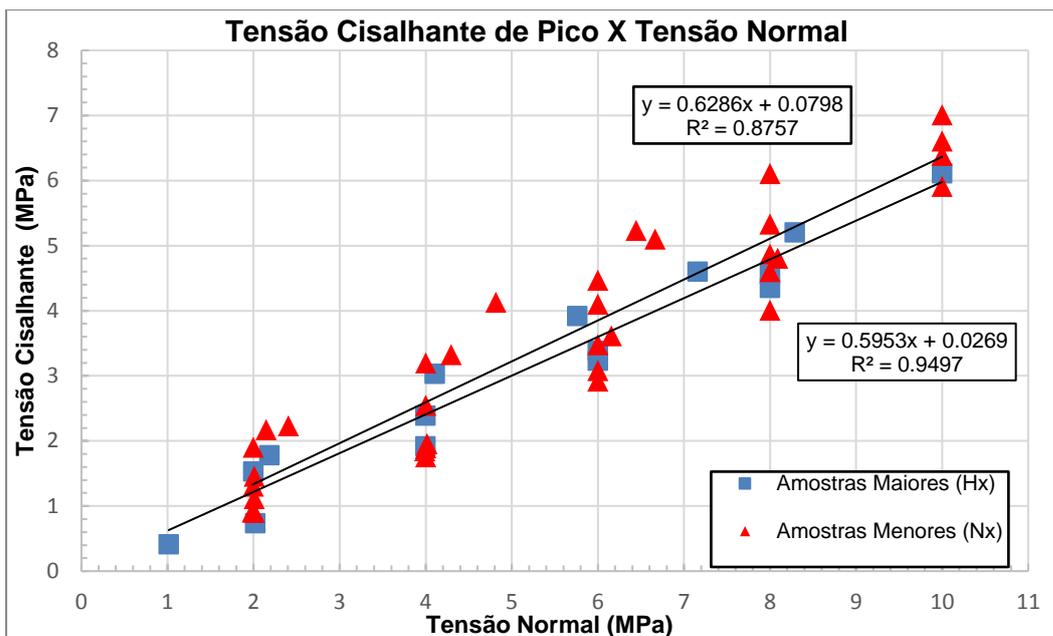


Figura 5.4: Envoltória de tensão cisalhante pico versus tensão normal, resultados de todos os ensaios de microclina gnaisse facoidal

Na Figura 5.5, pode se observar que a dispersão dos resultados diminuiu quando o efeito da rugosidade na resistência de pico foi descontado, utilizando-se as equações mencionadas no capítulo 2 desta dissertação e especificamente as Equações 2.15 e 2.16, como sugerido por Hencher & Richards (1982, 1989, 2014) e Papaliangas et al. (1994), obtendo a envoltória de resistência ao atrito básico (Equação 5.3), onde o ângulo de atrito básico é $27,84^\circ$.

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}(27,84) \quad (5.3)$$

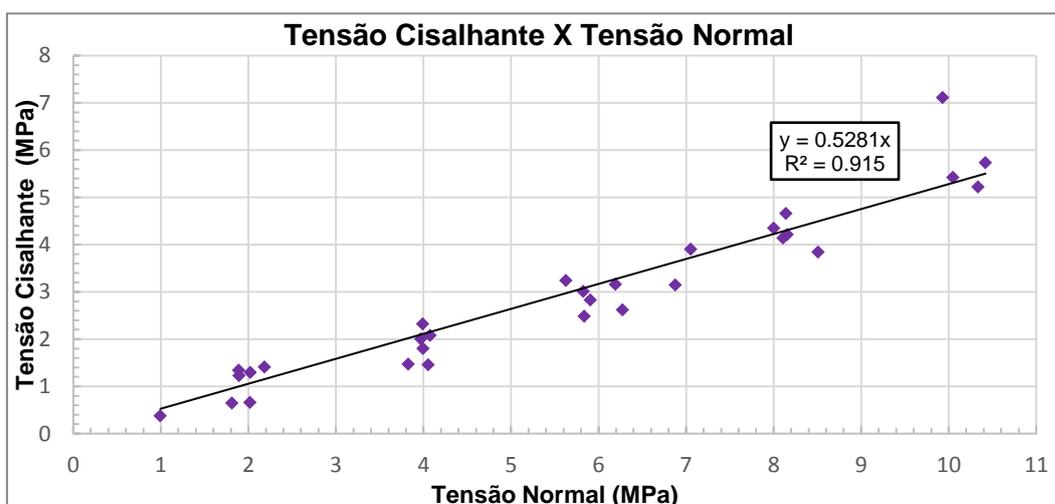


Figura 5.5: Envoltória de resistência ao atrito básico, dados de todos os ensaios com amostras de microclina gnaisse facoidal

No caso das amostras de plagioclásio hornblenda gnaiss, não foi possível realizar um estudo do efeito de escala como foi feito para as amostras de microclina gnaiss facoidal, já que todas as amostras ensaiadas tinham uma área similar no plano de cisalhamento (N_x), e apresentavam tamanhos similares. A continuação, na Figura 5.6, mostra os resultados de todos os gráficos plotados num mesmo gráfico ($\sigma \times \tau$) de todas as amostras de plagioclásio hornblenda gnaiss. A envoltória de resistência de pico se mostra na Equação 5.4, onde o ângulo de atrito pico obtido for aproximadamente $32,44^\circ$ e um intercepto de coesão $c = 0,433$ Mpa.

$$\tau = \sigma. \operatorname{tg}(32,44) + 0,433 \quad (5.4)$$

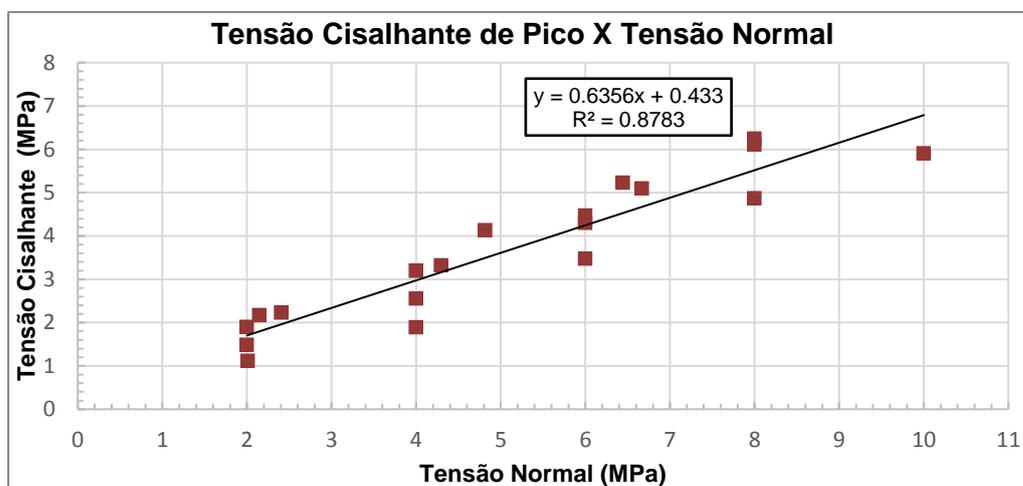


Figura 5.6: Envoltória de tensão cisalhante pico versus tensão normal, resultados de todos os ensaios de plagioclásio hornblenda gnaiss

Na Figura 5.7, pode-se observar que a dispersão dos resultados diminuiu, quando o efeito da rugosidade na resistência de pico é descontado, obtendo a envoltória de resistência ao atrito básico (Equação 5.5) onde o ângulo de atrito básico é aproximadamente $27,78^\circ$.

$$\tau = \sigma. \operatorname{tg}(27,78) \quad (5.5)$$

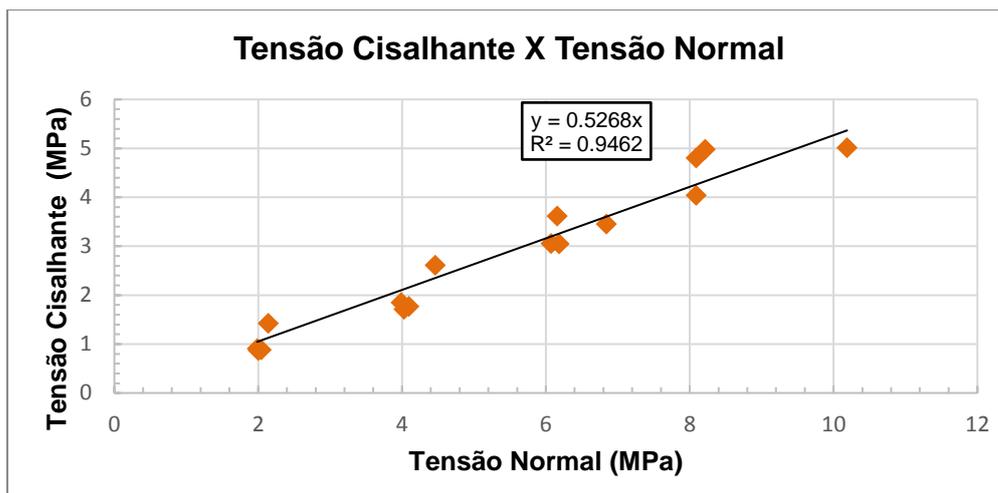


Figura 5.7: Envoltória de resistência ao atrito básico dos ensaios de cisalhamento direto de plagioclásio hornblenda gnaiss

Nas análises das curvas $(\delta_h \times \delta_v)$, se observou que os corpos de prova ensaiados apresentam comportamento dilatante.

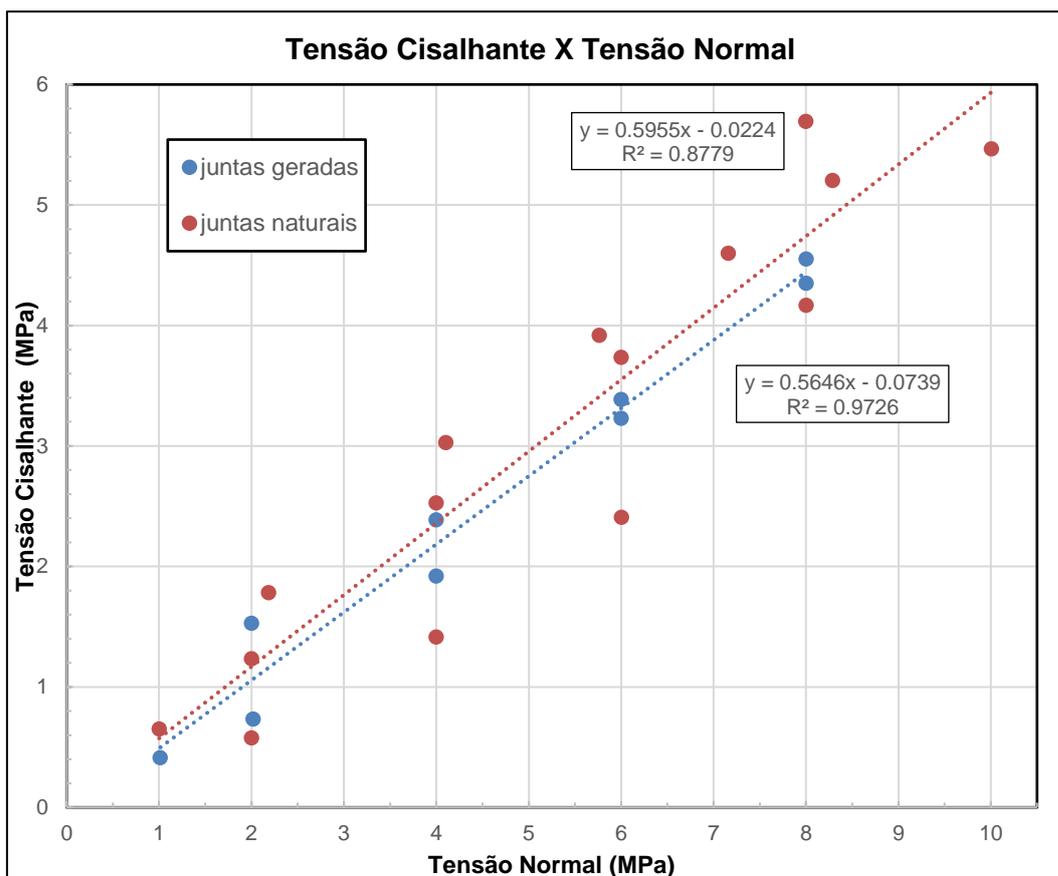


Figura 5.8: Comparação da dispersão de dados entre amostras com juntas naturais e juntas serradas

Na Figura 5.8, é apresentado um gráfico ($\sigma \times \tau$) com resultados das amostras maiores de microclina gnaisse facoidal (1Hx, 2Hx, 3Hx, 4Hx e 5Hx) para fazer uma comparação da dispersão de dados, entre amostras com juntas naturais e amostras com juntas artificiais (geradas), lembrando que as amostras 2Hx, 3Hx e 4Hx contém juntas naturais. Pode-se observar que as amostras com juntas naturais apresentam uma maior dispersão de resultados nos ensaios de cisalhamento direto. Tal efeito pode ser pelos padrões de rugosidade natural das amostras.

Na Tabela 5-1, apresenta-se uma comparação de resultados de parâmetros de resistência ao cisalhamento direto obtidos nesta pesquisa, com os resultados do estudo realizado por Brandão da Silva (1995) com juntas de alívio em leptinito do município de Rio de Janeiro, e com dados da bibliografia propostos por Hencher & Richards (1982, 2014). As amostras estudadas por Brandão da Silva (1995), foram ensaiadas num equipamento de características similares ao desenvolvido nesta dissertação, onde a caixa de cisalhamento inferior era fixa e a superior móvel, e as amostras ensaiadas tinham um rango de áreas no plano de cisalhamento de 46 cm² até 200 cm².

Tabela 5-1: Comparação dos resultados obtidos com outros dados

Amostra	Ângulo de atrito de pico (°)	Coesão (MPa)	Ângulo de atrito básico (°)
<i>Leptinito (Brandão da Silva, 1995)</i>	38	0,05	33,78
<i>Juntas artificiais geradas com serra (Hencher & Richards, 2014)</i>	-	-	25 - 35
<i>Granito. Juntas naturais, com graus de intemperismo II-IV ((Hencher & Richards, 1982)</i>	-	-	38° - 40°
<i>Microclina gnaisse facoidal (Cordova Rodriguez, 2018)</i>	32,15	0,08	27,84
<i>Plagioclásio biotita hornblenda gnaisse (Cordova Rodriguez, 2018)</i>	32,44	0,43	27,78

Segundo Barton & Choubey (1977), a retroanálise dos resultados de cisalhamento direto ou *tilt tests* (JRC_{TT}) são maneiras de caracterizar a rugosidade de uma junta, e os autores afirmam que é possível determinar o ângulo de atrito básico da rocha através desta metodologia. Para isso, foram preparadas amostras com superfícies retificadas e livres de irregularidades (Figura 5.9).

Ensaaiaram-se 5 amostras de microclina gnaisse facoidal e 5 amostras de plagioclásio biotita hornblenda gnaisse, cada uma das 10 amostras foram cortadas e tiveram suas superfícies retificadas. Uma vez preparadas as amostras, elas foram ensaiadas num dispositivo adequado para a realização dos ensaios no laboratório de Física do departamento de Física da PUC-Rio.

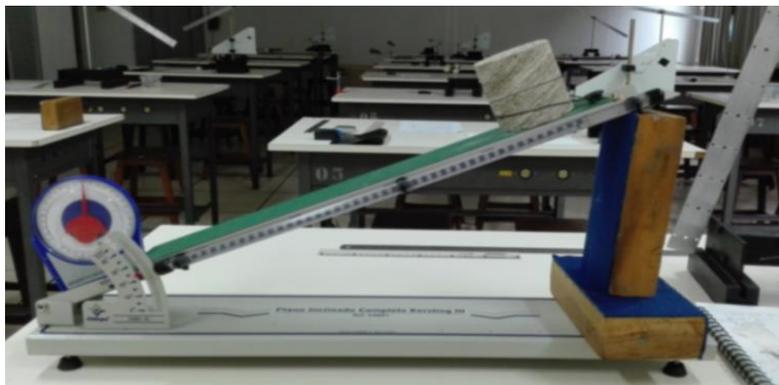


Figura 5.9: Tilt test para a obtenção de ângulo de atrito básico.

Foram realizados 30 ensaios para cada tipo de rocha, para se obter uma média do ângulo, e também para que o escorregamento das amostras fosse realizado em direções diferentes, devido à heterogeneidade na superfície das discontinuidades, mesmo quando retificadas. O dispositivo utilizado tinha acoplado um medidor de ângulos que foi utilizado para obter diretamente os resultados, também se verificaram por trigonometria os ângulos de atrito básico obtidos. Na Tabela 5-2, são apresentados os resultados dos ângulos de atrito básicos através de *tilt tests*.

Tabela 5-2: Resultados de ângulos de atrito básicos das amostras

<i>Microclina gnaisse Facoidal</i>		<i>Plagioclásio biotita hornblenda gnaisse</i>	
Amostra 1	$\phi_b = 24,87 \pm 1,32^\circ$	Amostra 1	$\phi_b = 25,32 \pm 1,04^\circ$
Amostra 2	$\phi_b = 24,14 \pm 1,86^\circ$	Amostra 2	$\phi_b = 25,65 \pm 0,98^\circ$
Amostra 3	$\phi_b = 24,82 \pm 2,62^\circ$	Amostra 3	$\phi_b = 24,98 \pm 1,21^\circ$
Amostra 4	$\phi_b = 24,42 \pm 1,15^\circ$	Amostra 4	$\phi_b = 25,07 \pm 0,94^\circ$
Amostra 5	$\phi_b = 24,35 \pm 1,17^\circ$	Amostra 5	$\phi_b = 25,84 \pm 0,90^\circ$
Média	$\phi_b = 24,52^\circ$	Média	$\phi_b = 25,49$

Por outro lado, Barton & Choubey (1977) sugerem que, para realizar o retroanálise de *tilt test* de amostras de discontinuidades, pode-se adequar as amostras que já foram ensaiadas ao cisalhamento direto, com a sua superfície

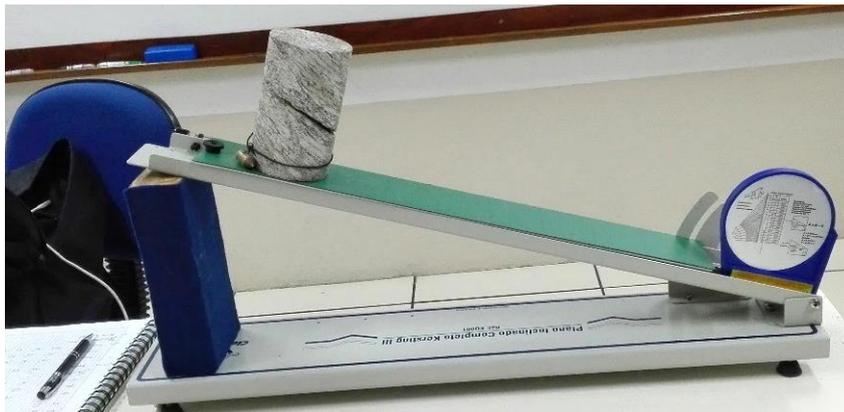
parcialmente danificada. No presente trabalho se efetuaram os *tilt test* antes de realizar os ensaios de cisalhamento direto. Foi decidido assim pelo fato de ter ensaiado ao cisalhamento direto as amostras com tensões normais relativamente altas, e devido a possibilidade de que as amostras ficassem muito perturbadas depois do cisalhamento direto. Os ensaios *tilt test* (Figura 5.10) foram realizados e os resultados são apresentados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3: Resultados de JRC e valores do ângulo de atrito pico (ϕ_p)

Amostra		JRC _{Rp}	JRC _{TT}	JRC _{perfis}	ϕ_p (°)
<i>Microclina Gnaiss Facoidal</i>	1 Nx	12.94	1,48	9	31,23
	2 Nx	10.66	1,76	8	34,31
	3 Nx	7.69	1,99	6	29,61
	4 Nx	9.51	1,73	8	30,76
	1 Hx	10.28	1,70	8	29,09
	2 Hx	14.28	1,97	11	33,86
	3 Hx	11.90	0,91	12	32,04
	4 Hx	16.22	1,63	10	28,98
	5 Hx	8.11	1,18	9	28,36
<i>Plagioclásio biotita hornblenda gnaiss</i>	1 Nx	9.21	1,90	8	34,79
	2 Nx	14.23	1,57	10	30,34
	3 Nx	11.26	1,95	10	36,57
	4 Nx	10.58	2,70	7	34,14
	5 Nx	8.91	2,17	6	35,44



a)



b)

Figura 5.10: *Tilt test* (ângulo de atrito pico): a) amostra 2Nx plagioclásio hornblenda gnaisse, b) amostra 2Hx microclina gnaisse facoidal

Foi observada uma concordância entre os resultados de medidas da rugosidade com o perfilógrafo (JRC_{Rp}) e com a estimativa visual.

Foi feita uma comparação dos resultados obtidos utilizando o método de Barton & Choubey com os valores de JRC_{Rp} e JRC_{TT} apresentados na Tabela 5.3, comparados com os resultados experimentais dos ensaios de cisalhamento direto nas descontinuidades das amostras.

Os resultados obtidos com cada critério são representados e comparados de forma gráfica, é apresentado um gráfico por cada amostra, onde se agruparam os resultados dos critérios a e são apresentados nas Figuras 5.11 - 5.24.

Os resultados obtidos pelo critério de Barton & Choubey (1977), com o valor de JRC_{TT} , se ajustam razoavelmente bem aos resultados experimentais obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto.

Os resultados obtidos pelo critério de Barton & Choubey (1977), calculados com o JRC_{Rp} , se aproximam razoavelmente aos resultados experimentais obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto, mas utilizando os valores de JRC_{TT} as aproximações são melhores.

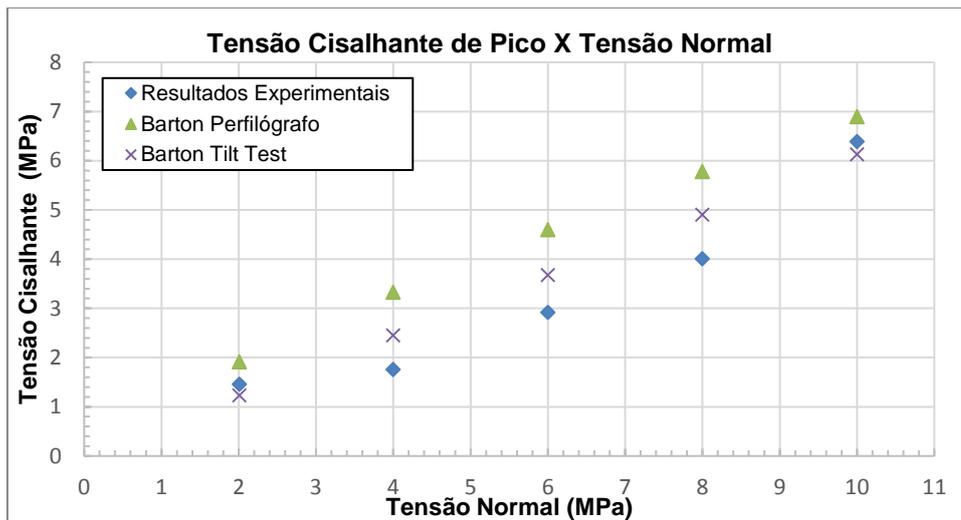


Figura 5.11: Resultados da amostra 1Nx Microclina gnaisse facoidal

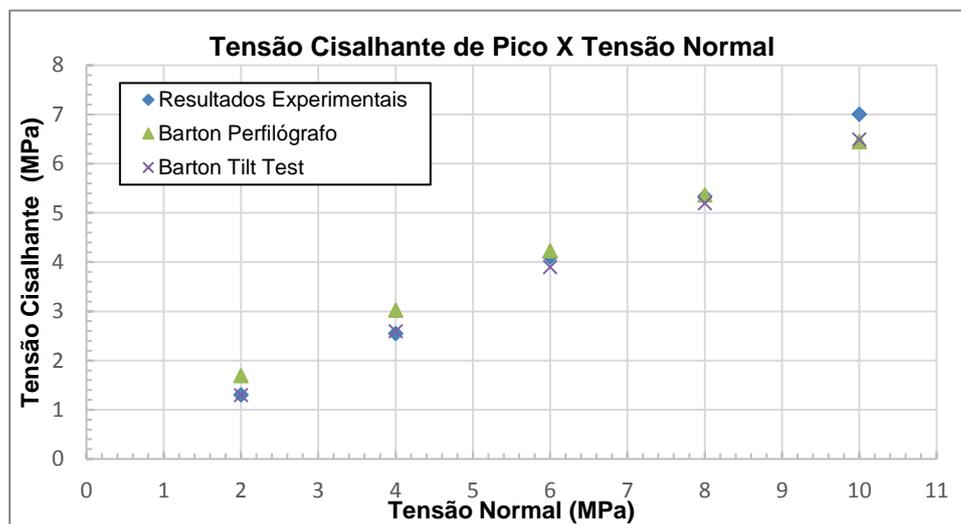


Figura 5.12: Resultados da amostra 2Nx Microclina gnaisse facoidal

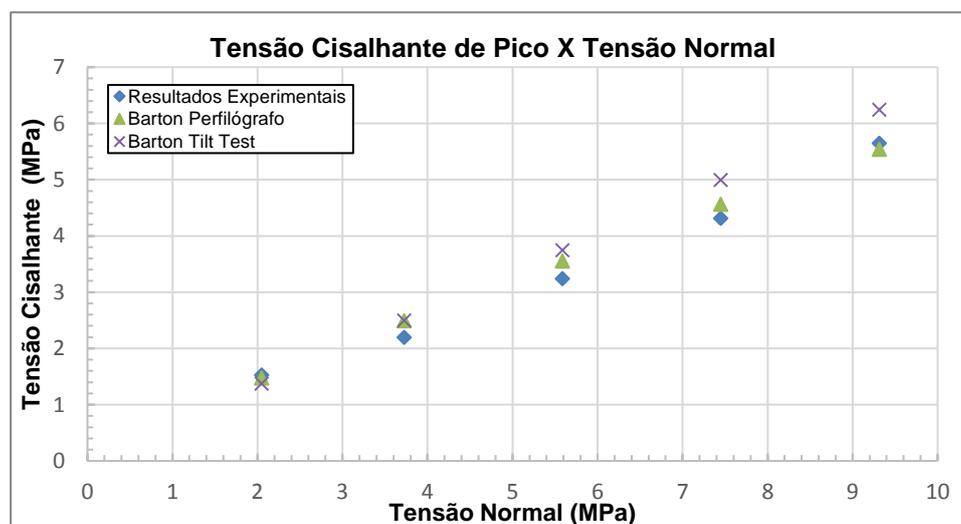


Figura 5.13: Resultados da amostra 3Nx Microclina gnaisse facoidal

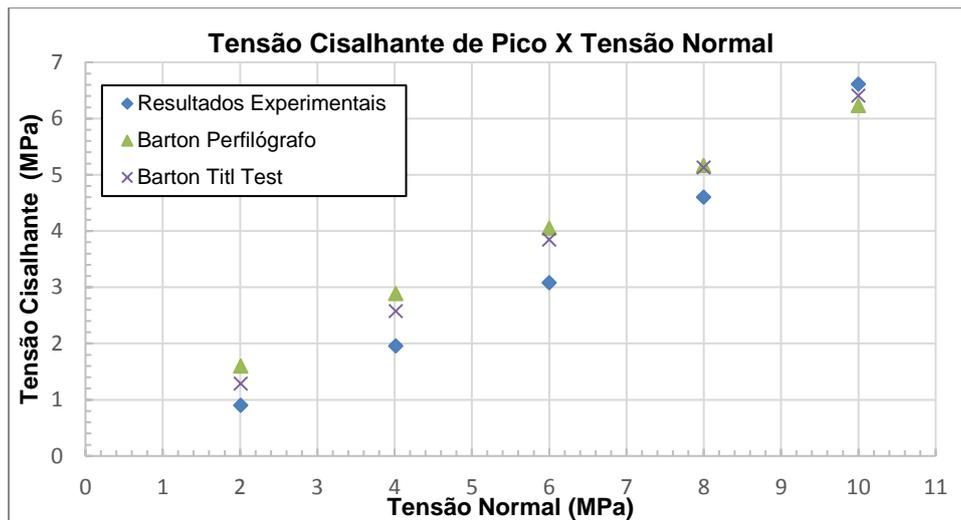


Figura 5.14: Resultados da amostra 4Nx Microclina gnaissé facoidal

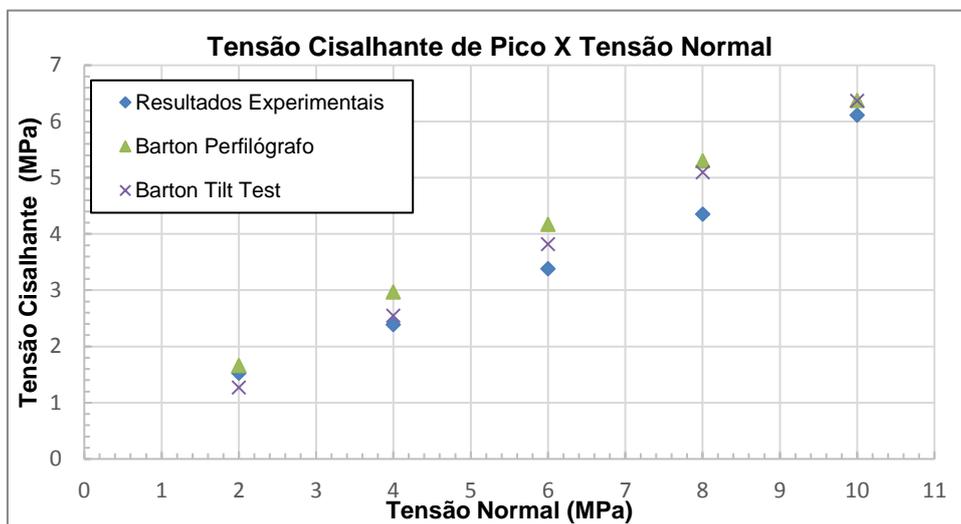


Figura 5.15: Resultados da amostra 1Hx Microclina gnaissé facoidal

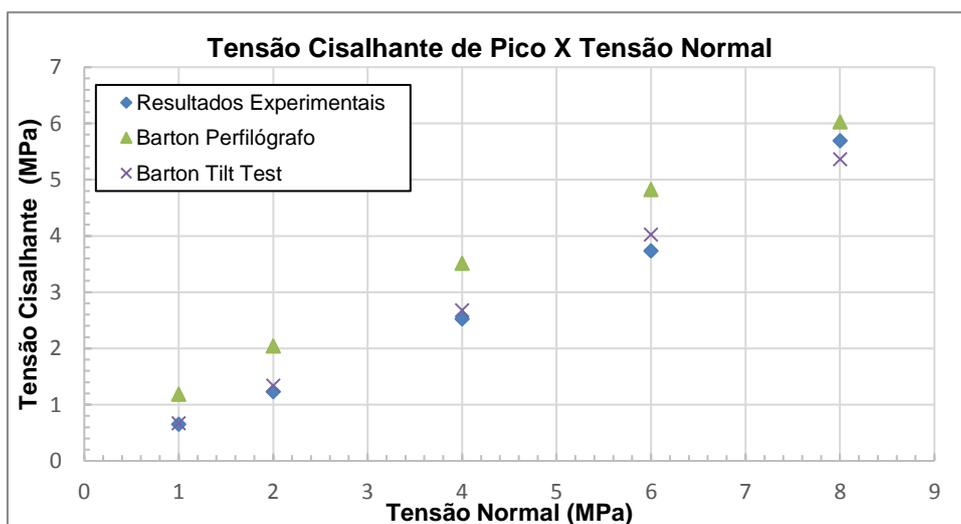


Figura 5.16: Resultados da amostra 2Hx Microclina gnaissé facoidal

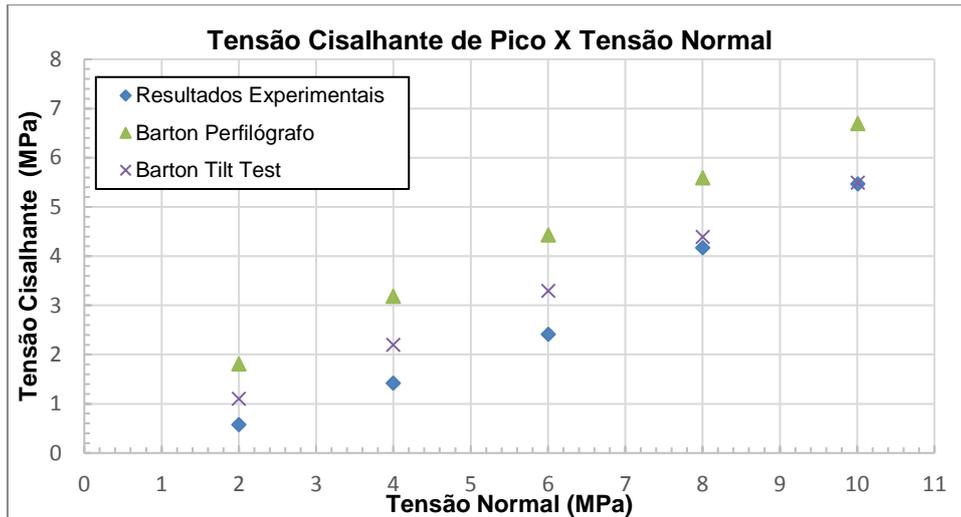


Figura 5.17: Resultados da amostra 3Hx Microclina gnaissé facoidal

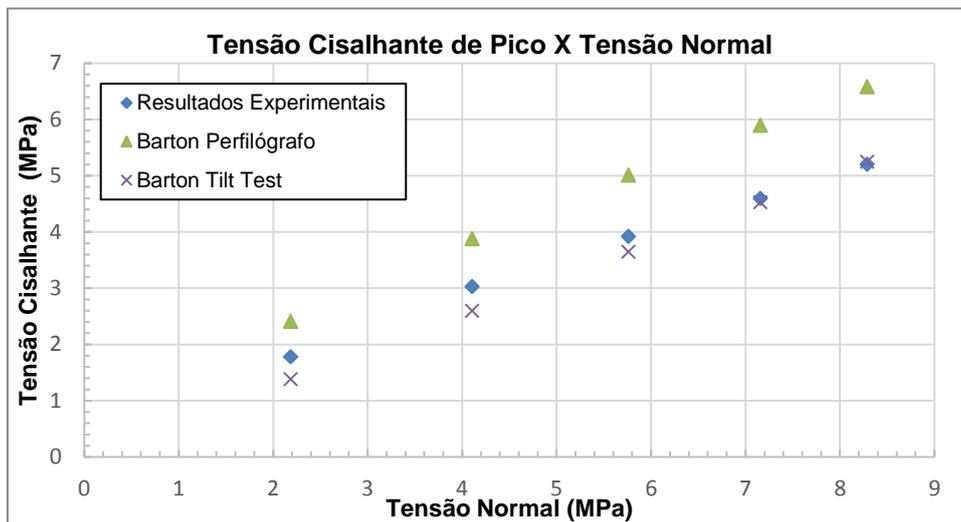


Figura 5.18: Resultados da amostra 4Hx Microclina gnaissé facoidal

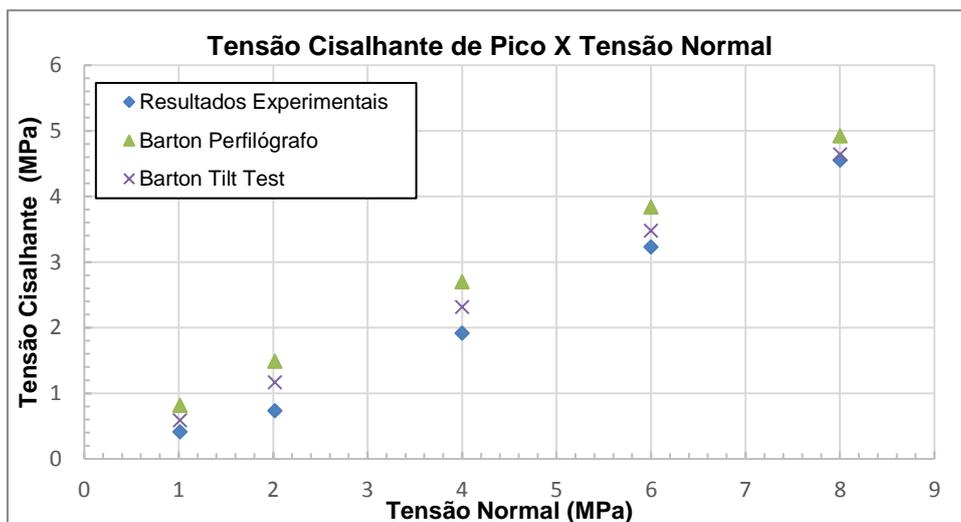


Figura 5.19: Resultados da amostra 5Hx Microclina gnaissé facoidal

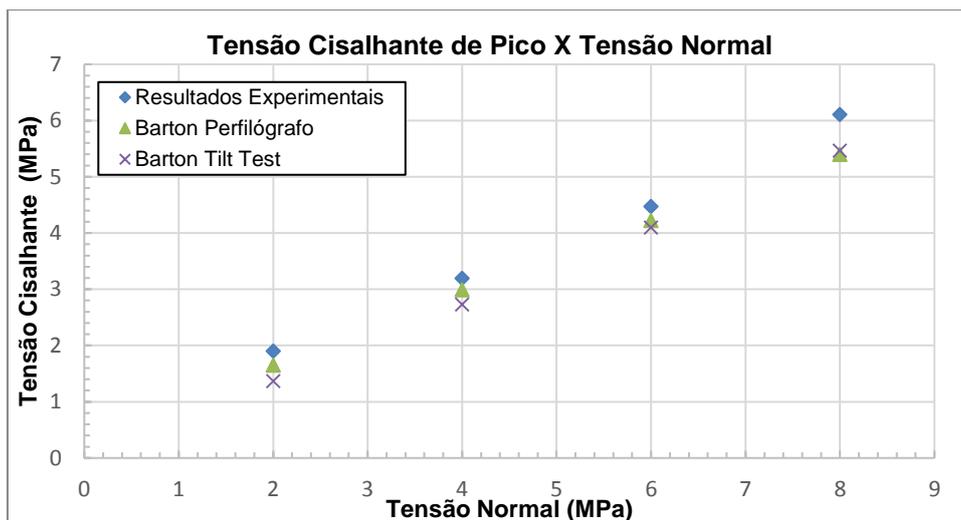


Figura 5.20: Resultados da amostra 1Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaiss

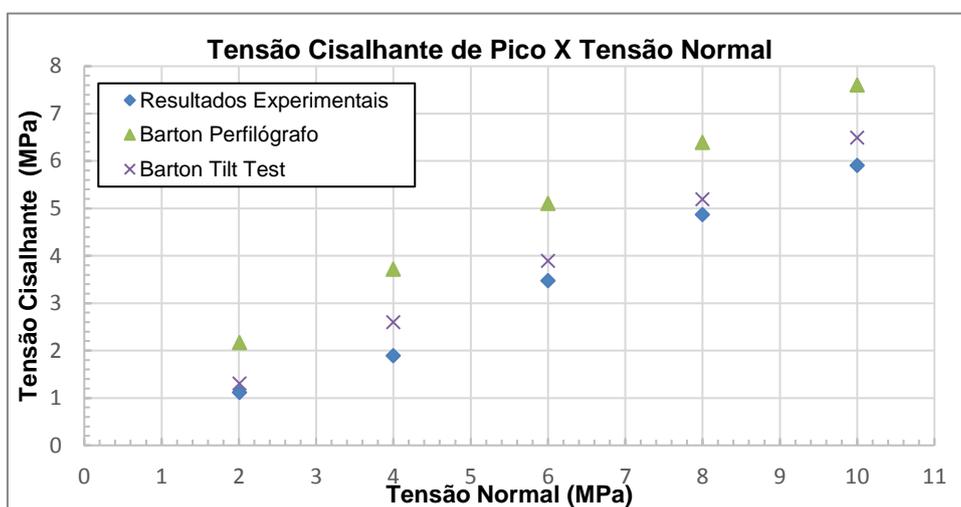


Figura 5.21: Resultados da amostra 2Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaiss

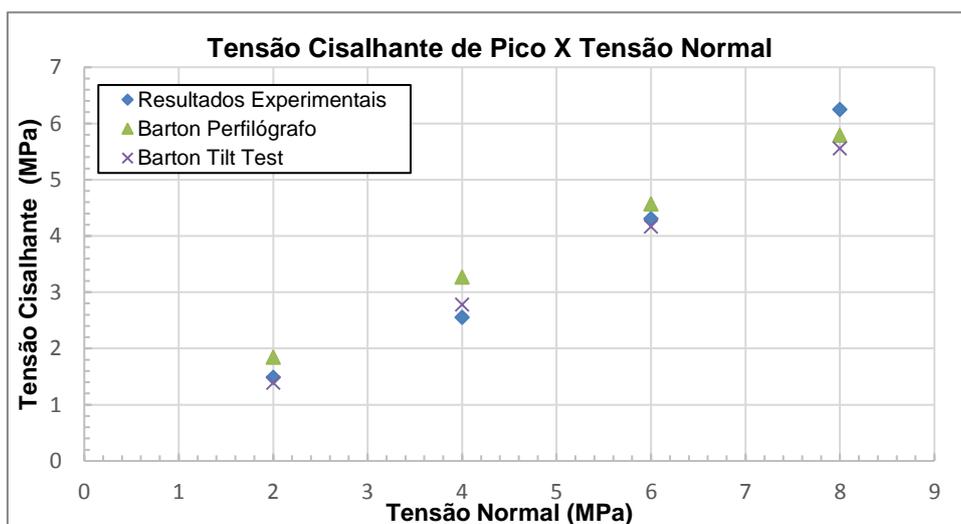


Figura 5.22: Resultados da amostra 3Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaiss

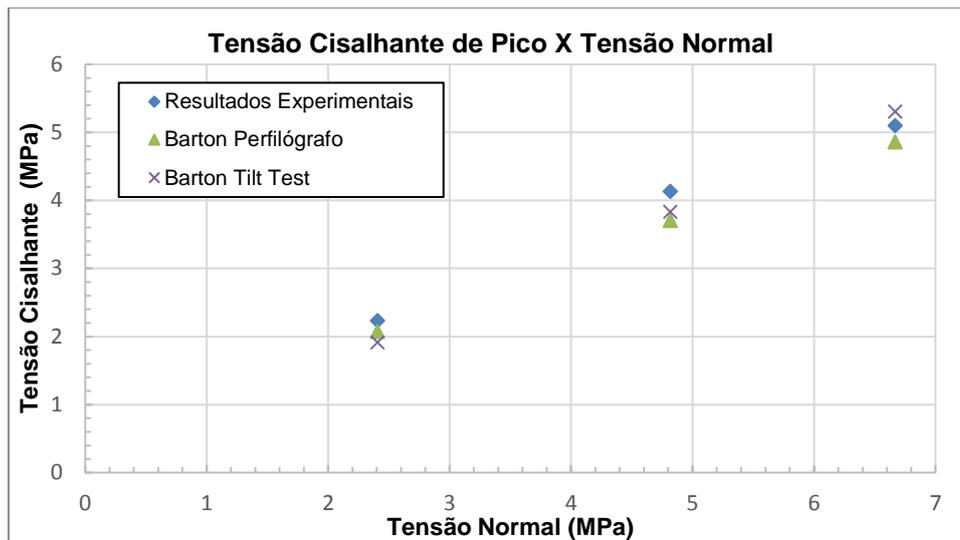


Figura 5.23: Resultados da amostra 4Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaiss

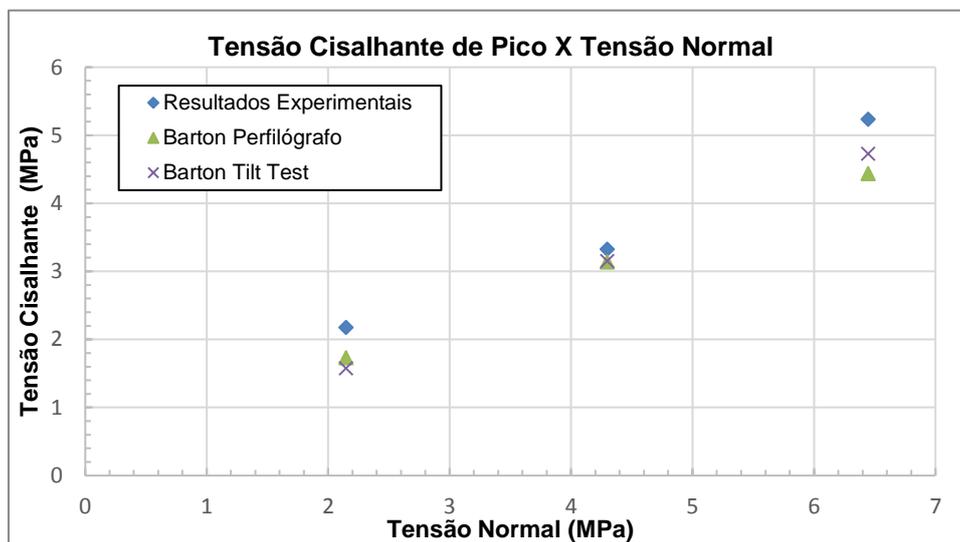


Figura 5.24: Resultados da amostra 5Nx de Plagioclásio Biotita Hornblenda gnaiss

6 Conclusões e sugestões

6.1. Conclusões

O equipamento de cisalhamento direto convencional foi projetado, desenhado e desenvolvido satisfatoriamente, possibilitando a realização de ensaios de cisalhamento direto em descontinuidades de rochas a fim de se obter a resistência ao cisalhamento das descontinuidades.

Com os resultados obtidos e apresentados nesta pesquisa, conclui-se que o equipamento está validado para ser utilizado no estudo da resistência ao cisalhamento direto em descontinuidades de rochas.

Os parâmetros de resistência obtidos para as amostras maiores (Hx) de microclina gnaisse facoidal são: ângulo de atrito pico $\phi_p = 32,15^\circ$, com um intercepto de coesão $c = 0,08$ (MPa), e um ângulo de atrito básico $\phi_b = 27,84^\circ$.

Os parâmetros de resistência obtidos para as amostras menores (Nx) de microclina gnaisse facoidal são: ângulo de atrito pico $\phi_p = 30,77^\circ$, com um intercepto de coesão $c = 0,03$ (MPa).

Os parâmetros de resistência obtidos para as amostras de plagioclásio biotita hornblenda gnaisse são: ângulo de atrito pico $\phi_p = 32,44^\circ$, com um intercepto de coesão $c = 0,43$ (MPa), e um ângulo de atrito básico $\phi_b = 27,78^\circ$.

A envoltória de resistência ao atrito básico das amostras de microclina gnaisse facoidal ajustou-se bem aos resultados dos ensaios de cisalhamento direto com um coeficiente de correlação de 0,915.

A envoltória de resistência ao atrito básico das amostras de plagioclásio hornblenda gnaisse ajustou-se bem aos resultados dos ensaios de cisalhamento direto com um coeficiente de correlação de 0,9462.

O ângulo de atrito de rugosidade nas amostras ensaiadas variou de -1° a 7° para as amostras de microclina gnaisse facoidal, e variou de -3° a 9° para as amostras de plagioclásio hornblenda gnaisse.

Os gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante das amostras, mostraram que o comportamento delas foi frágil nos primeiros estágios dos ensaios multiestágio realizados: na medida que os níveis de carga foram aumentados ou diminuídos nos estágios posteriores, o comportamento se tornou dúctil.

Se observou que as amostras de tamanhos menores revelam uma dispersão maior nos resultados dos gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante, e dispersão menor quando se ensaiaram as amostras de dimensões maiores (Hx), evidenciando o efeito de escala.

Pode-se concluir que quando se desconta o efeito da rugosidade das juntas para obter a resistência ao atrito básico a dispersão dos resultados é reduzida nos gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante, evidenciando a influência da rugosidade na obtenção da resistência ao cisalhamento de juntas.

De acordo como os resultados apresentados no Apêndice I, afirma-se que as amostras menores de microclina gnaisse facoidal ensaiadas apresentaram ângulos de atrito maiores do que os obtidos para amostras maiores do mesmo tipo de rocha.

O fato de realizar ensaios de cisalhamento direto em discontinuidades de rochas em laboratório que tentem representar situações de campo não se trata apenas de obter os parâmetros de resistência, mas também de ver como a rocha se comporta, para que os julgamentos sobre a situação real sejam os mais apropriados, levando em conta que a determinação da resistência ao cisalhamento envolve muitas variáveis.

6.2. Sugestões

De acordo com a experiência obtida neste trabalho, e depois de ter avaliado e interagido com o equipamento desenvolvido, é possível, portanto, realizar as seguintes sugestões e recomendações:

Continuar este tipo de pesquisa, realizando outros ensaios em diferentes tipos de rochas com distintos níveis de alteração.

Realizar ensaios de cisalhamento direto em outros materiais, por exemplo, elementos de interação entre o contato concreto-rocha.

Se sugere, utilizar um escâner 3D para caracterizar as rugosidades das descontinuidades, sendo possível escolher faixas de valores de JRC de uma maneira mais exata do que obter esses valores utilizando um perfilógrafo tipo modelador manual.

Se recomenda, aumentar o número de LVDTs por conta da influência da rugosidade.

Implementar um sistema de alinhamento entre a caixa inferior e superior de cisalhamento, já que o alinhamento manual e visual é demorado.

Aumentar o número de caixas de cisalhamento para poder preparar várias amostras, levando em conta que o tempo de secagem da argamassa é de aproximadamente 12 horas, mesmo com aditivo de curado rápido.

Construir novas caixas de cisalhamento maiores, para poder ensaiar amostras de maior dimensão, já que a dispersão dos resultados tende a diminuir com o aumento do tamanho das amostras.

O grampo de fixação de amostras funciona bem, mas pode ser melhorado, para posicionar as amostras inferiores de uma forma mais eficiente.

A placa de isopor para dar o espaçamento livre de cisalhamento entre as duas caixas (inferior e superior) pode ser substituída por placas de outro material, por exemplo, plástico ou acrílico, já que o processo de dimensionamento das placas de isopor para cada amostra não é o ótimo.

Depois de terminar um ensaio de cisalhamento, se recomenda tirar a argamassa com os corpos de prova fixados nas caixas de cisalhamento, já que, a argamassa ganha resistência com o tempo e se torna mais difícil liberar as caixas de cisalhamento.

Se sugere que os ensaios sejam realizados pelo menos por dois técnicos de laboratório para coordenar atividades e ter facilidade nos trabalhos pesados, como a montagem das caixas de cisalhamento.

Modificar o equipamento para que também seja possível estudar a resistência ao cisalhamento de juntas preenchidas.

O ensaio é realizado mediante a aplicação de carga normal. Seria interessante a realização de ensaios com a aplicação de tensão normal, ou seja, criar uma alternativa para condições de contorno diferentes.

A estrutura do equipamento pode ser acoplada para simular outras situações da engenharia civil que precisem da aplicação de carga normal e cisalhante simultaneamente, por exemplo, algum estudo de uniões de vigas e colunas, mísula estrutural, etc.

Referências bibliográficas

ALEJANO, L.R.; JAVIER, G.; MURALHA, J. **Comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment.**, Rock Mechanics, Rock Engineering, n.45, p. 1023-1035, 2012.

ASTM D5607. **Standard test method for performing laboratory direct test of rock specimens under constant normal force**, American Society for Testing Materials International, West Conshohocken, p.30, 2016.

AYDIN, A. **ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version**, R. Ulusay (ed.), The ISRM Suggested methods for rock characterization, Testing and Monitoring, p.25-32, 2009.

AYDIN, A.; BASU, A. **The Schmidt hammer in rock material characterization**, Engineering Geology, n. 81, p.1-14, 2005.

AZEVEDO, I. C.; MARQUES, E. A. **Introdução à Mecânica das Rochas**. 1. ed. Minas Gerais: Editora UFV, p.361, 2002.

BRADY, B., H., G.; BROWN, E., T. **Rock mechanics**, New York, Kluwer,

BANDIS, S.C. **Experimental studies of scale effects on shear strength, and deformation of rock joints**, Phd tesis, University of Leeds, 385p., 1980.

BANDIS, S.C.; LUMSDEN, A.C.; BARTON, N.R. **Scale effects on the shear behavior of rock joints**, Int. Rock mechanics Mining science geomechanics, Abstract. 18, p. 1-21, 1981.

BANDIS, S., C. **Mechanical properties of rock joints**. International Symposium on rock joints, Barton e Stephansson (eds.), Loen, Norway, v.1, p. 125-139, 1990.

BARTON, N.; CHOUBEY, V. **The shear strength of rock joints in theory and practice**, Rock Mechanics, 10, p. 1-54, 1977.

BARLA, G.; ROBOTTI, F.; VAI, L. **Revesting large size direct shear testing of rock mass foundations**, Pina C., Porterla E., Gomes J., (eds), 6th International conference on dam engineering, Lisbon, Portugal. LNEC, Lisbon, p.10, 2011.

BLEJWAS, T. E.; HANSEN, F.D. **Scale effects in the shear behavior of joints in Welded Tuff**. Rock joints. Barton & Stephansson (eds), p. 185-189. Rotterdam, Balkema, 1990.

BRADY, B.H.G; BROWN, E.T. **Rock Mechanics of Underground Mining**. George Allen & Unwin, London, UK, p.571, 1985.

BRANDÃO DA SILVA, L. **A resistência ao cisalhamento de juntas de alívio em leptinito do município do Rio de Janeiro**, Pós Graduação Engenharia Civil. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado:, p. 13-148, 1995.

CASTRO, J.S.M. **A influência da alteração hidrotermal na estabilidade de escavações subterrâneas no Rio de Janeiro**, Pós Graduação Engenharia Civil. Rio de Janeiro, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado:, p. 105, 2016.

CELESTINO, T. B.; GOODMAN, R. E. **Path dependency of rough joints in bidirectional shearing**, International congress of rock mechanics, IV, v. 1 p.91-98, 1979.

CHRYSSANTHAKIS, P., BARTON, N. **Characterization of a rock joint replica at 1m scale**, Rock joints. Barton & Stephansson (eds.), p. 27-33, Rotterdam, Balkema, 1990.

DA SILVA, L.C. **Geologia do Estado do Rio de Janeiro**, Ministério de minas e energia, Governo do Estado do Rio de Janeiro, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Brasília, p.94, 2001.

FRANKLIN, J.A.; DUSSEAULT, M.B. **Rock Engineering**. McGraw-Hill, New York, p.597, 1989.

GOODMAN, R. E. **Introduction to rock mechanics**. New York, Willey, 562 p., 1989.

HARRISON, J. P., GOODFELLOW, R. J. F. **Effect of scale on roughness anisotropy and magnitude**. Scale effects in rock masses, Pinto da Cunha (ed.), Rotterdam, Balkema, p.111-117, 1993.

HENCHER S. R. **A simple sliding apparatus for the measurement of rock friction**, Géotechnique 26, n.4, p.641-644, 1976.

HENCHER S. R. **Discussion of comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment by Alejano, Gonzalez and Muralha**, Rock mechanics, Rock Engineering, n.45, p. 1137-1139, 2012.

HENCHER S. R.; RICHARDS, L.R. **The basic frictional resistance of sheeting joints in Hong Kong granite**, Hong Kong Engineer. Hong Kong, p. 21-25, 1982.

HENCHER S. R.; RICHARDS, L.R. **Laboratory direct shear testing of rock discontinuities**, Ground Engineering, n. 22(2), p.24-31, 1989.

HENCHER S. R.; RICHARDS, L.R. **Assessing the shear strength of rock discontinuities at laboratory and field scales**, Rock mechanics, Rock Engineering, n. 48., p. 883 - 905, 2014.

HENCHER S. R.; TOY J.P.; LUMSDEN, A.C. **Scale dependent shear strength of rock joints**, Proceedings of the 2nd international workshop on scale effects in rock masses, Lisboa, p. 233-41, 1993.

HOEK, E.; BRAY, J. **Rock slope engineering**. 2nd. Ed. London, The Inst. Mining & Metallurgy, p. 402, 1977.

HUANG, T.H.; DOONG, Y.S. **Anisotropic shear strength of rock joints**. Rock joints. Rock joints. Barton & Stephansson (eds). p. 211-218. Rotterdam, Balkema, 1990.

HUANG, T.H.; DOONG, Y.S.; SHENG, J. **Measurement of rock joint roughness and its directional shear strength**, Mechanics of rock jointed and faulted rock, Rossmanith (ed.), p. 337-343. Rotterdam, Balkema, 1990.

HUDSON, J.A.; HARRISON, J.P. **Engineering rock mechanics**, Pergamon, Oxford, p. 444, 1997.

IAKOVLEV, D. **Comparison of Barton-Bandis and Mohr-Coulomb models for**

use in discontinuity shear stability analysis, Dissertação de mestrado , Aalto University, p. 1-59, 2015.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS (IRSM). **Suggested Methods for quantitative description of discontinuities in rock masses**, Rock Mechanics Mining Science Geomechanical, 15, p. 319-368. 1978.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS (IRSM). **Suggested Methods for determining shear strength**, Brown, E.T. Rock characterization testing and monitoring. Pergamon Press, p. 131-137, 1981.

MAERZ, N.H.; FRANKLIN, J.A.; BENNETT, C.P. **Joint roughness measurements using shadow profilometry**, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, Abstr. v.27, n.5, p. 329-343, 1990.

MARQUES, E.A.G.; AZEVEDO, I.C.D. **Introdução à Mecânica das rochas**, 2ª. Ed., Viçosa, Ed. UFV, v.1., p.361, 2006.

MARQUES, E.A.G.; BARROSO, E.V.; MENEZES FILHO, A.P.; VARGAS Jr. E. do A. **Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro - Physical, mineralogical and geomechanical characterization**, Engineering Geology 111, p. 1-18, 2010.

MURALHA, J.; GRASSELLI, G.; TATONE, B.; BLUMEL, M.; CHRYSANTHAKIS, P.; JIANG, Y.J. **ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version**, Rock mechanics, Rock engineering. n.47, p. 291-302, 2013.

NEWLAND, P.L.; ALLEY, B. H. **Volume changes in drained triaxial test, on granular materials**, Geotechnique, v. 17, n. 1, p.17-34, 1957.

PAPALIANGAS, T.T.; HENCHER, S. R.; LUMSDEN, A.C. **Scales independent shear strength of rock joints**. In: CSMR, IV, Integral approach to applied rock mechanics, Santiago, Chile, p. 123-133, 1994.

RAO, K.S.; SHRIVASTAVA, A. K. ; SINGH, J. **Development of an automated large scale direct shear testing machine for rock**, In: Indian geotechnical conference, p. 238-244, 2009.

SHRIVASTAVA, A. K.; RAO, K.S. **Shear Behaviour of Rock under different normal stiffness**, Harmonising Rock Engineering and Environment, Qian & Zhou (eds)., p. 831-835, 2012.

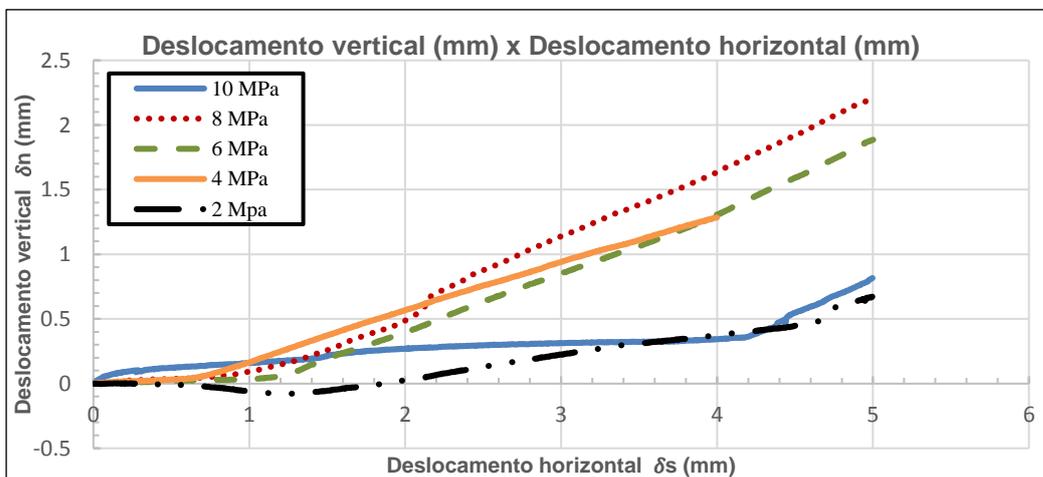
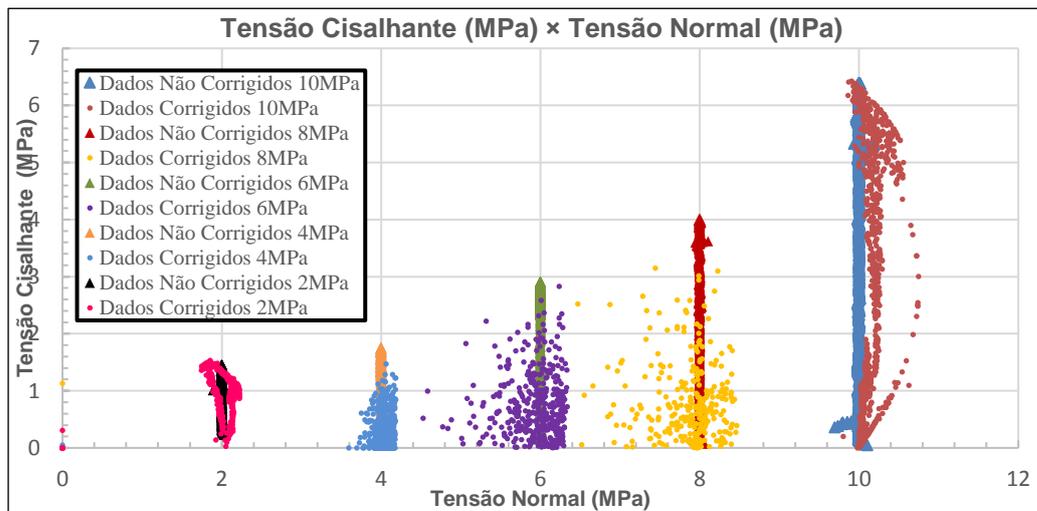
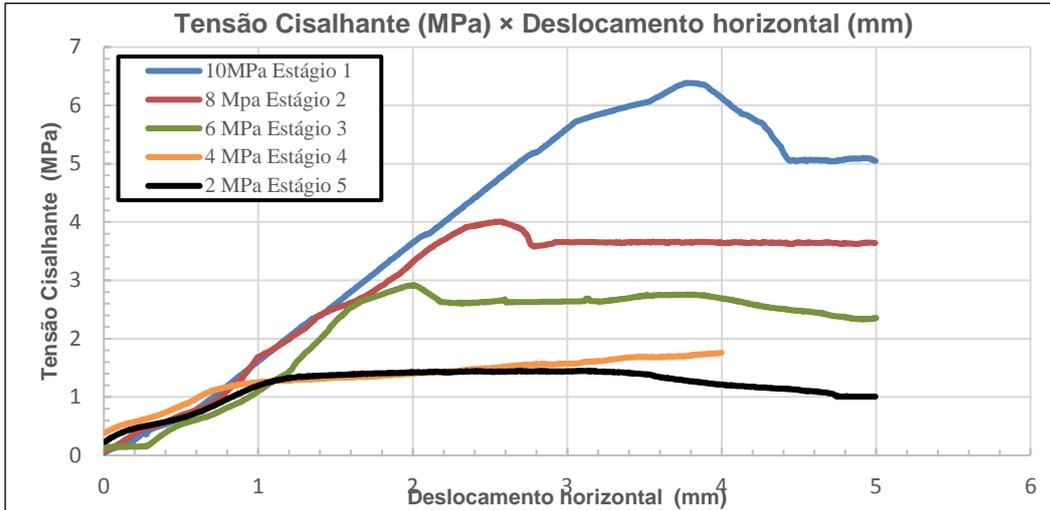
SHRIVASTAVA, A. K.; RAO, K.S. **Shear Behaviour of Rock Joints Under CNL and CNS Boundary Conditions**. International Journal of Geotechnical and Geological Engineering, v. 33, p. 1205-1220, 2015.

TURK, N.; DEARMAN, E.R. **Investigation of some rock joints properties: roughness angle determinations**, In: of the INT. SYMP. On fundamentals of rock joints, p. 197-205, 1985.

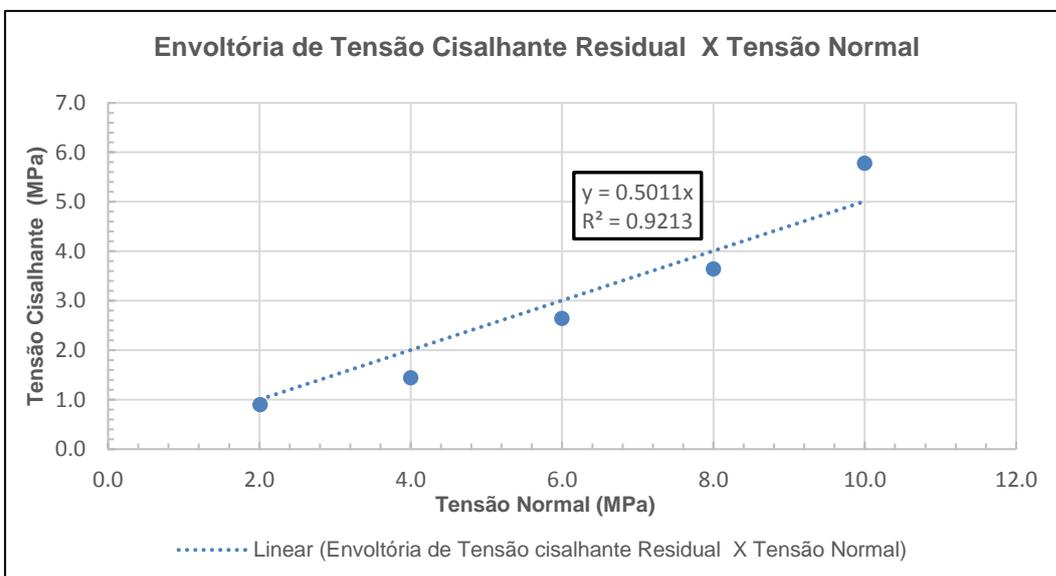
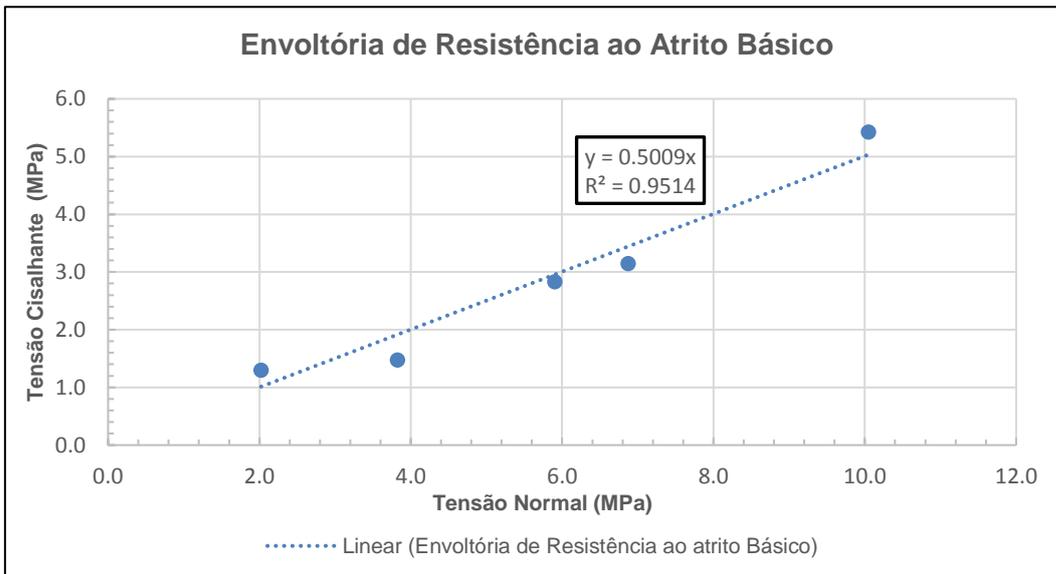
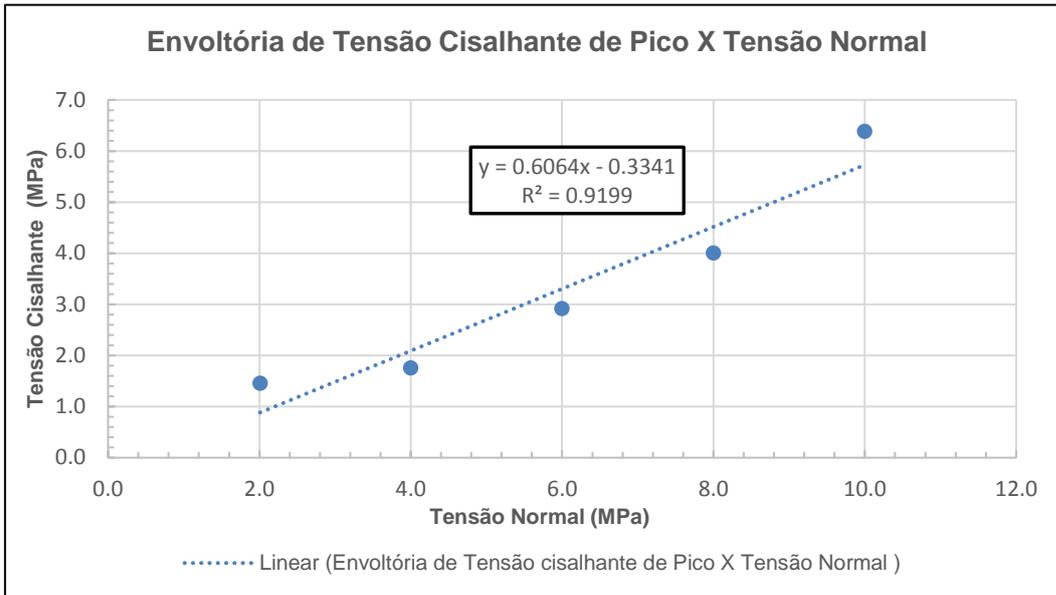
WYLLIE, D. C.; NORRISH, N.I. **Rock strength properties and their measurement**. In: Turner A.K., Schuster, R. (eds)., Landslides investigation and mitigation, Special Report 247, p. 372-390, 1996.

Apêndice I

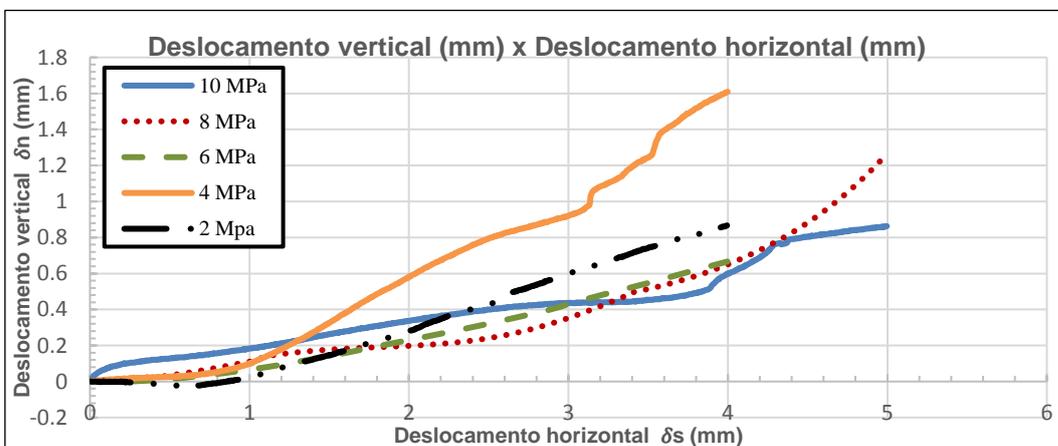
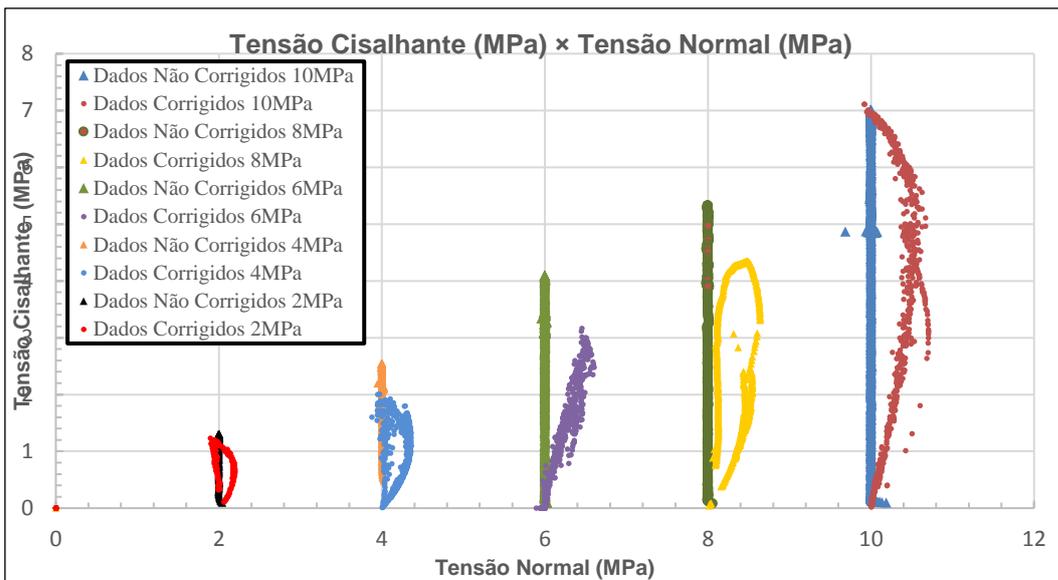
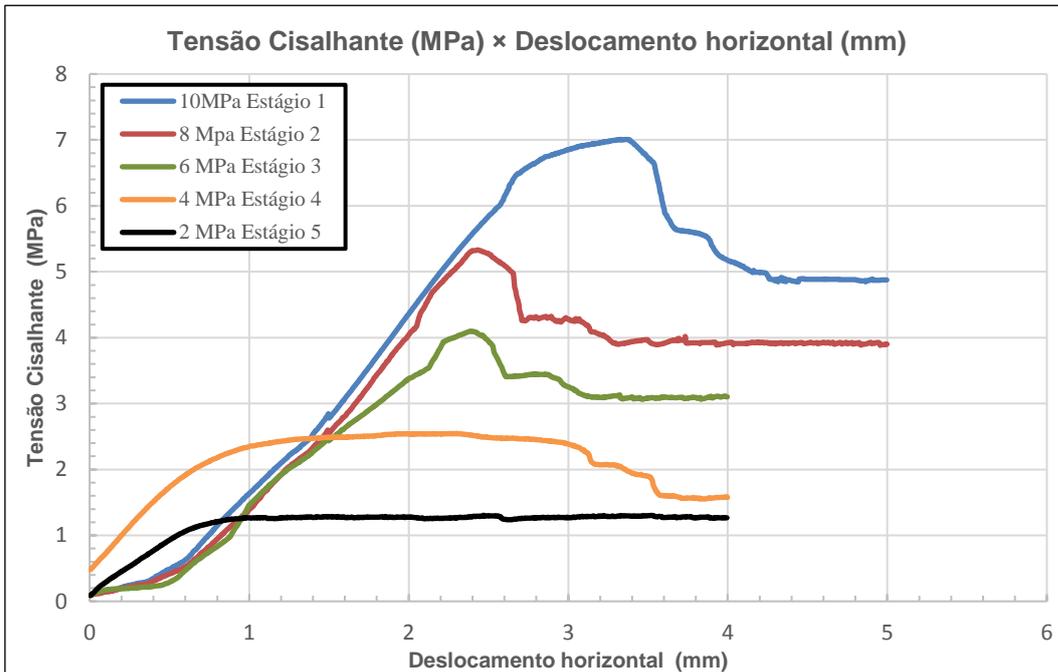
Resultados da amostra 1Nx, de microclina gnaisse facoidal



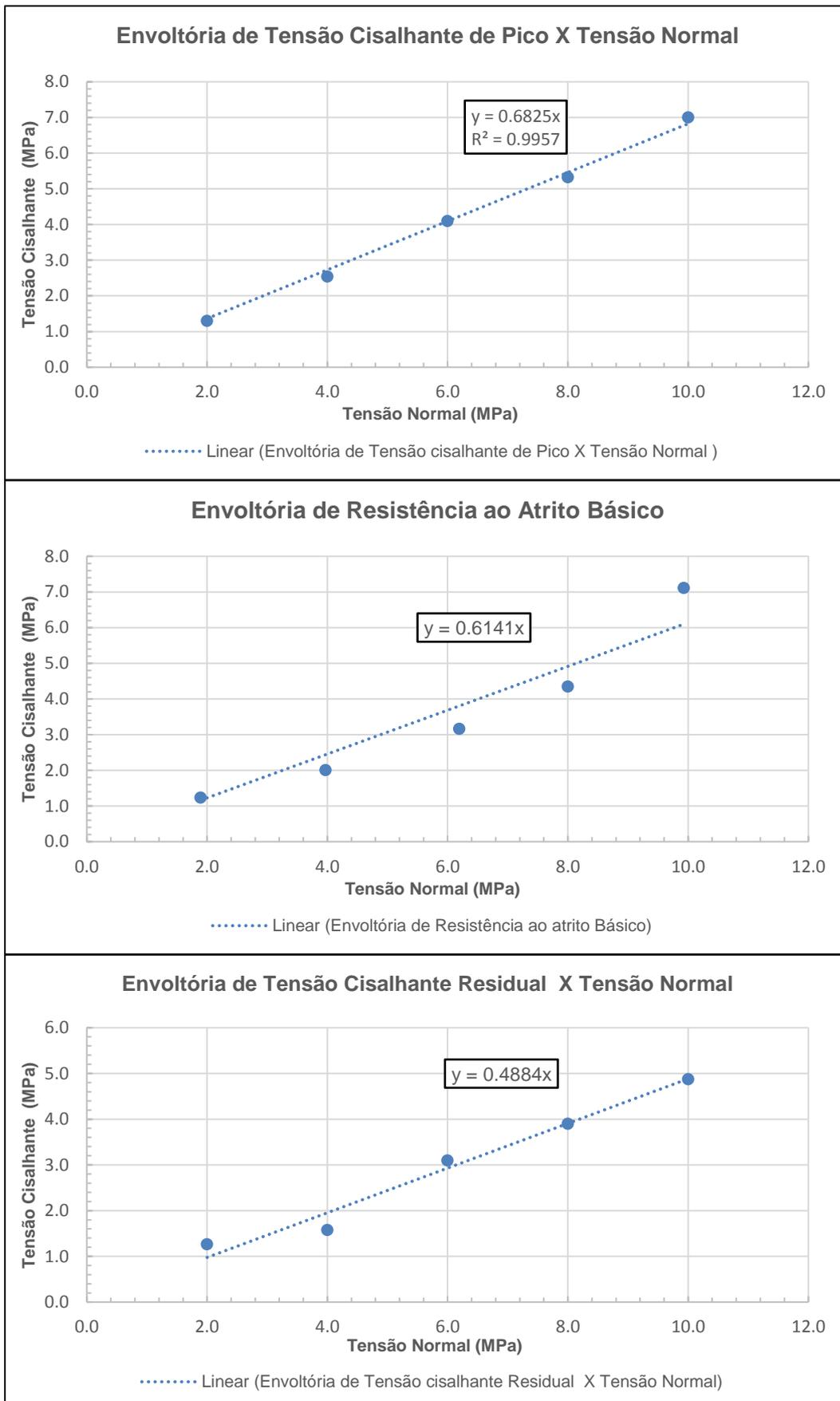
Resultados da amostra 1Nx, de microclina gnaisse facoidal



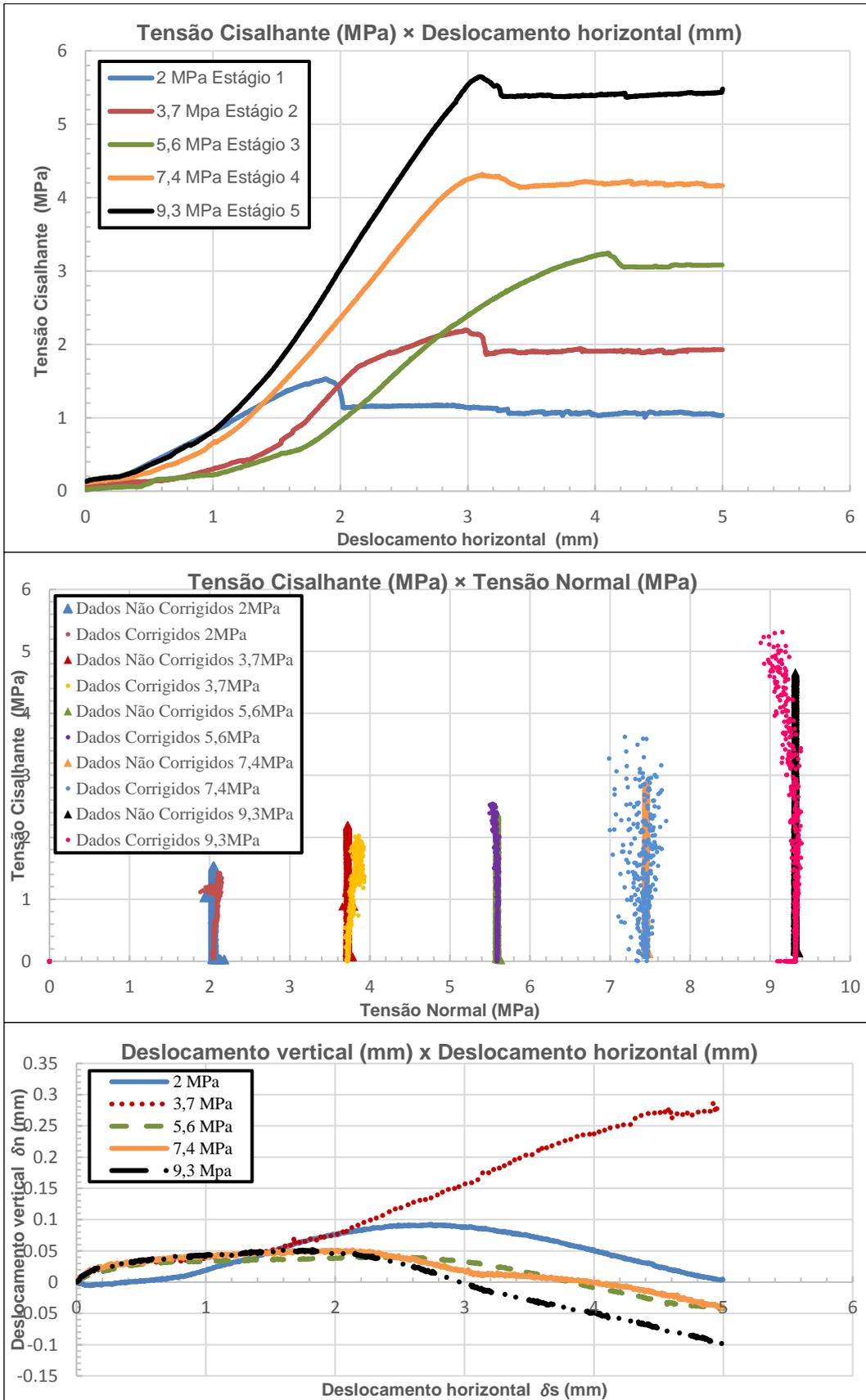
Resultados da amostra 2Nx, de microclina gnaisse facoidal.



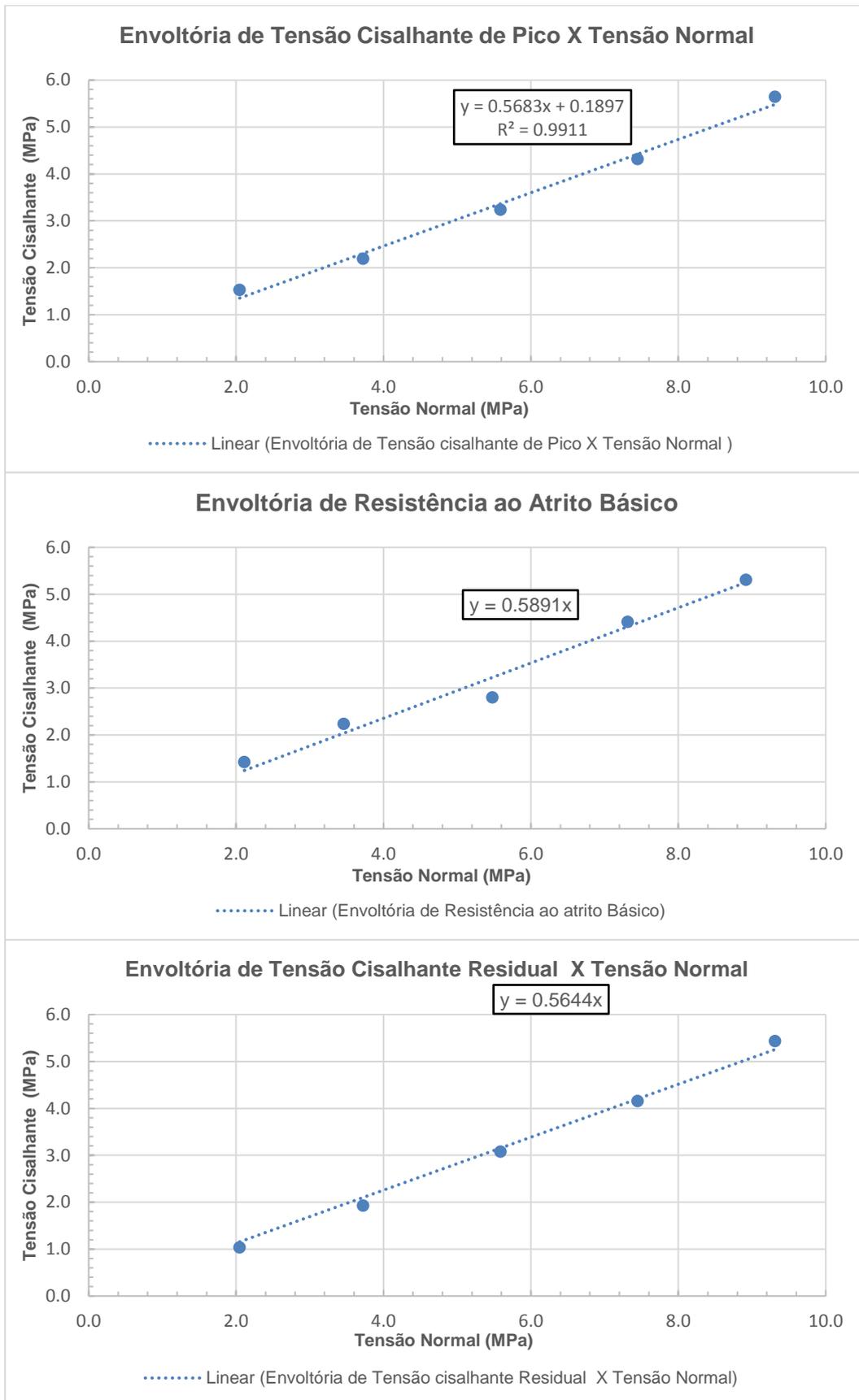
Resultados da amostra 2Nx, de microclina gnaisse facoidal



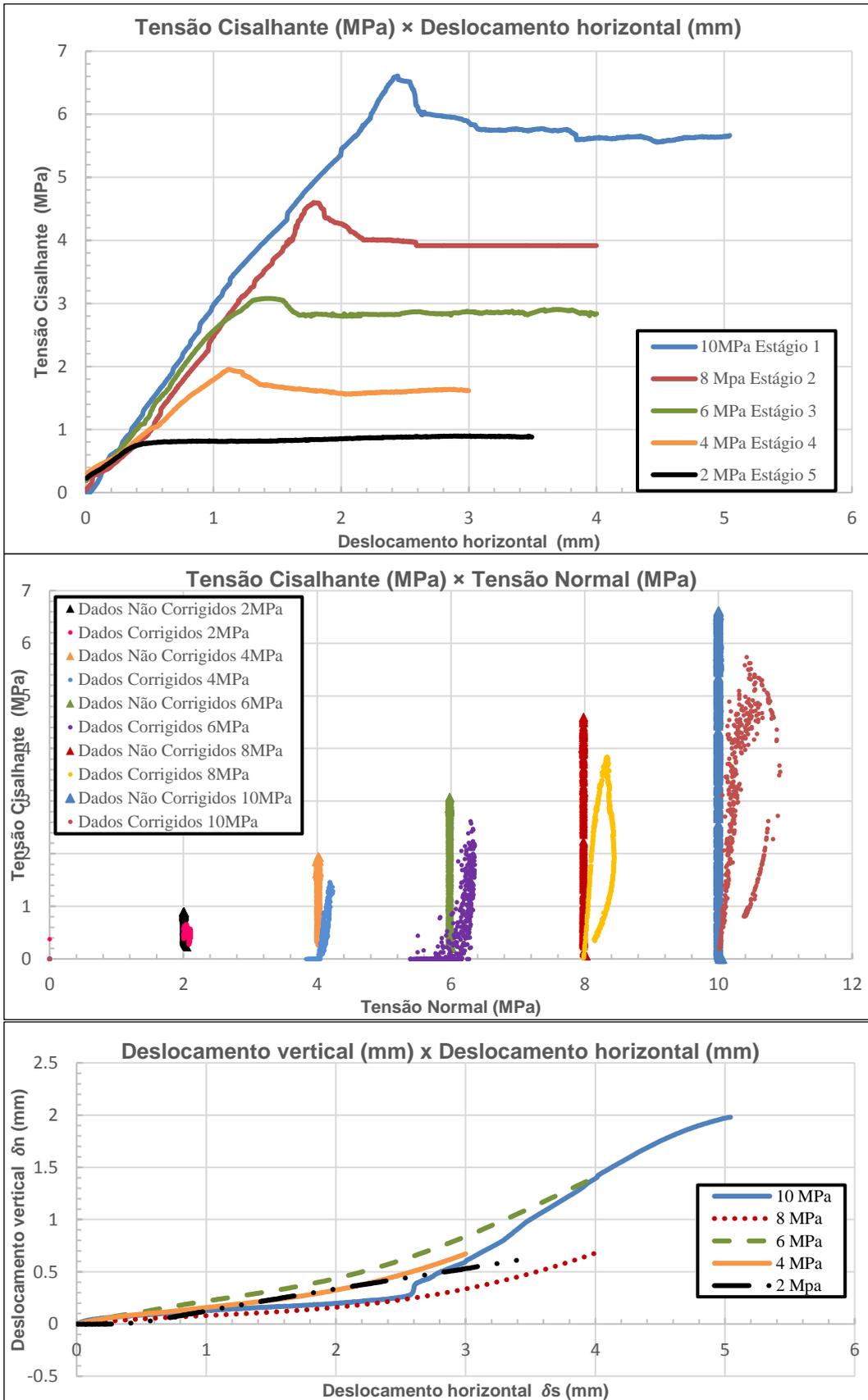
Resultados da amostra 3Nx, de microclina gnaisse facoidal.



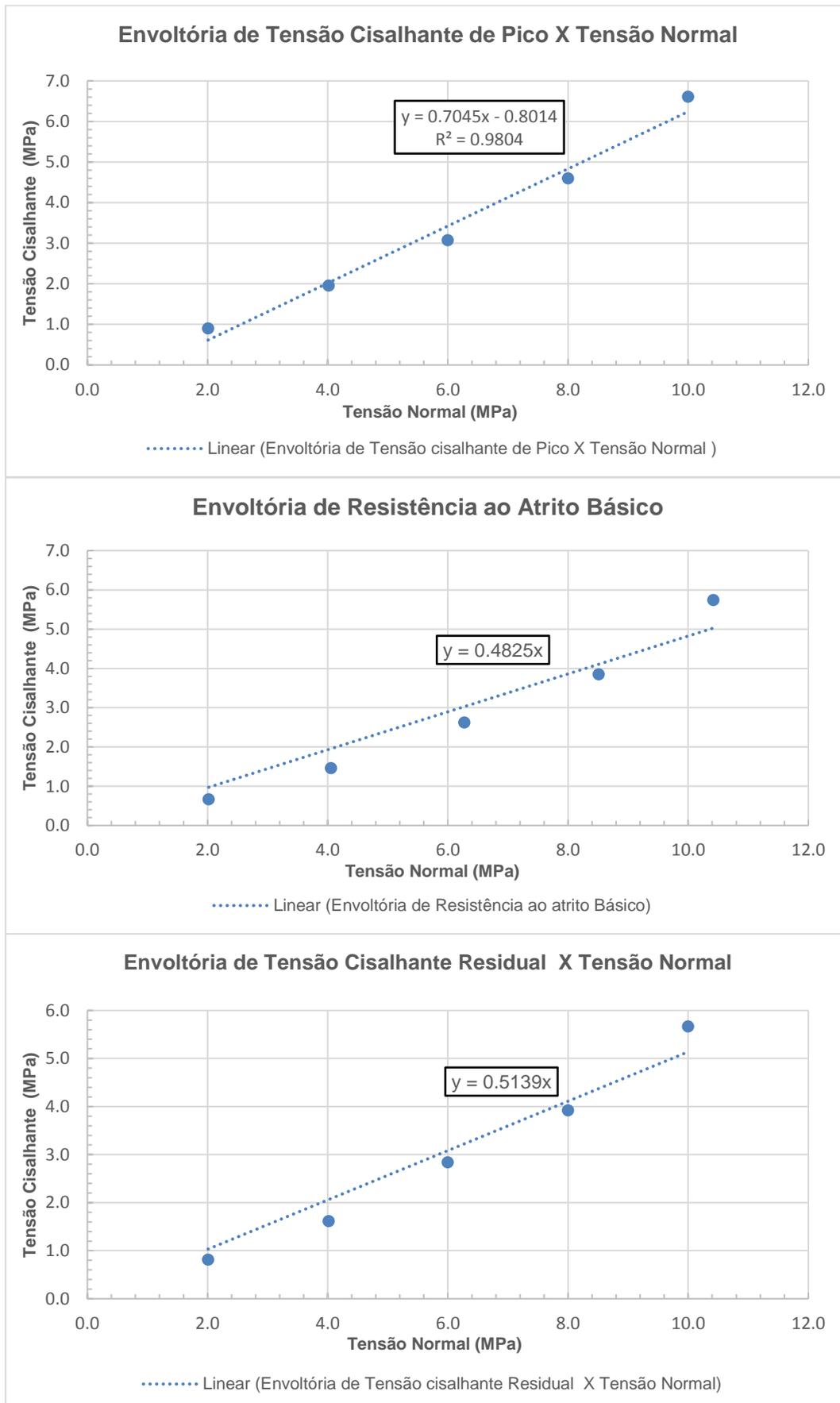
Resultados da amostra 3Nx, de microclina gnaisse facoidal.



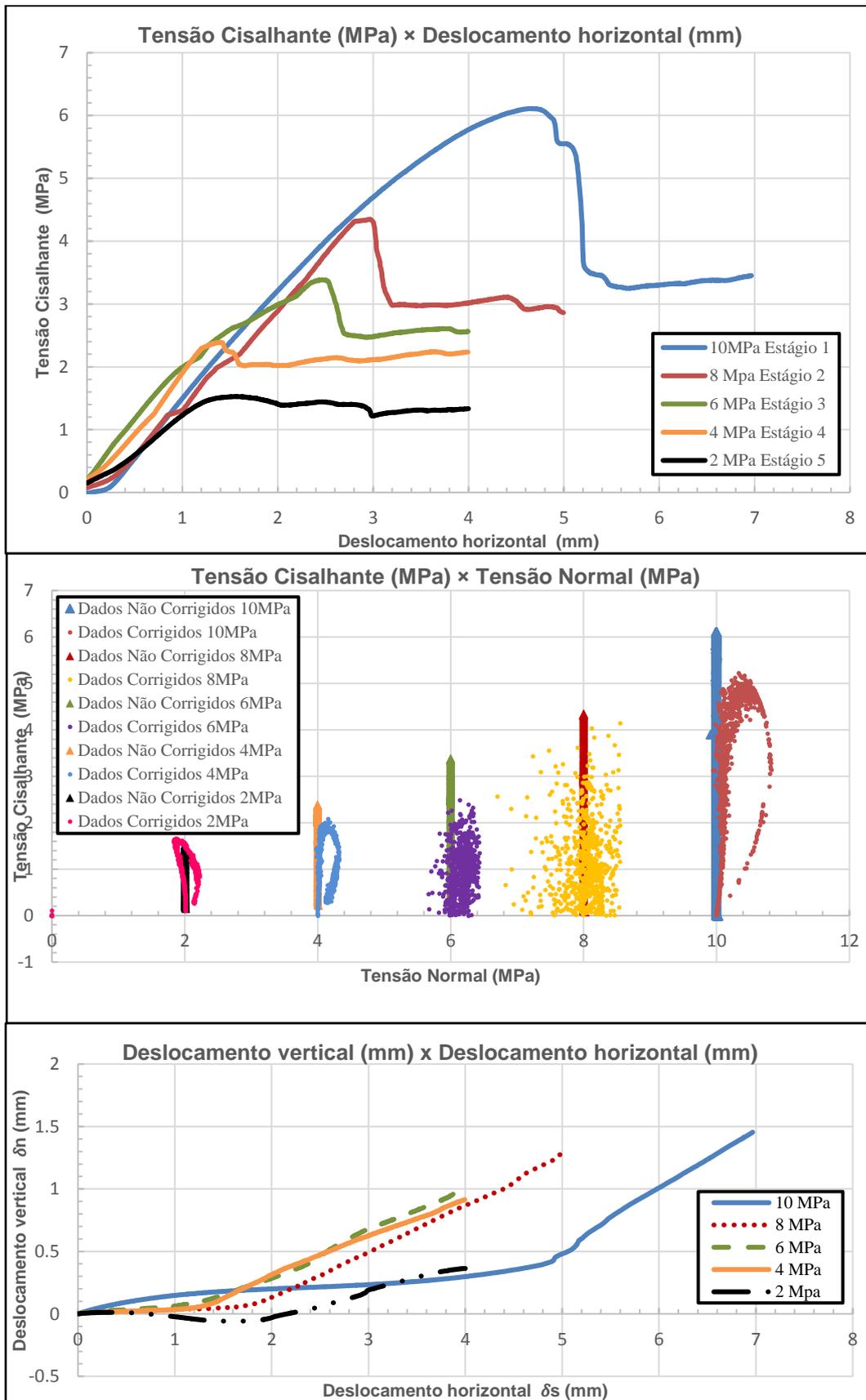
Resultados da amostra 4Nx, de microclina gnaisse facoidal



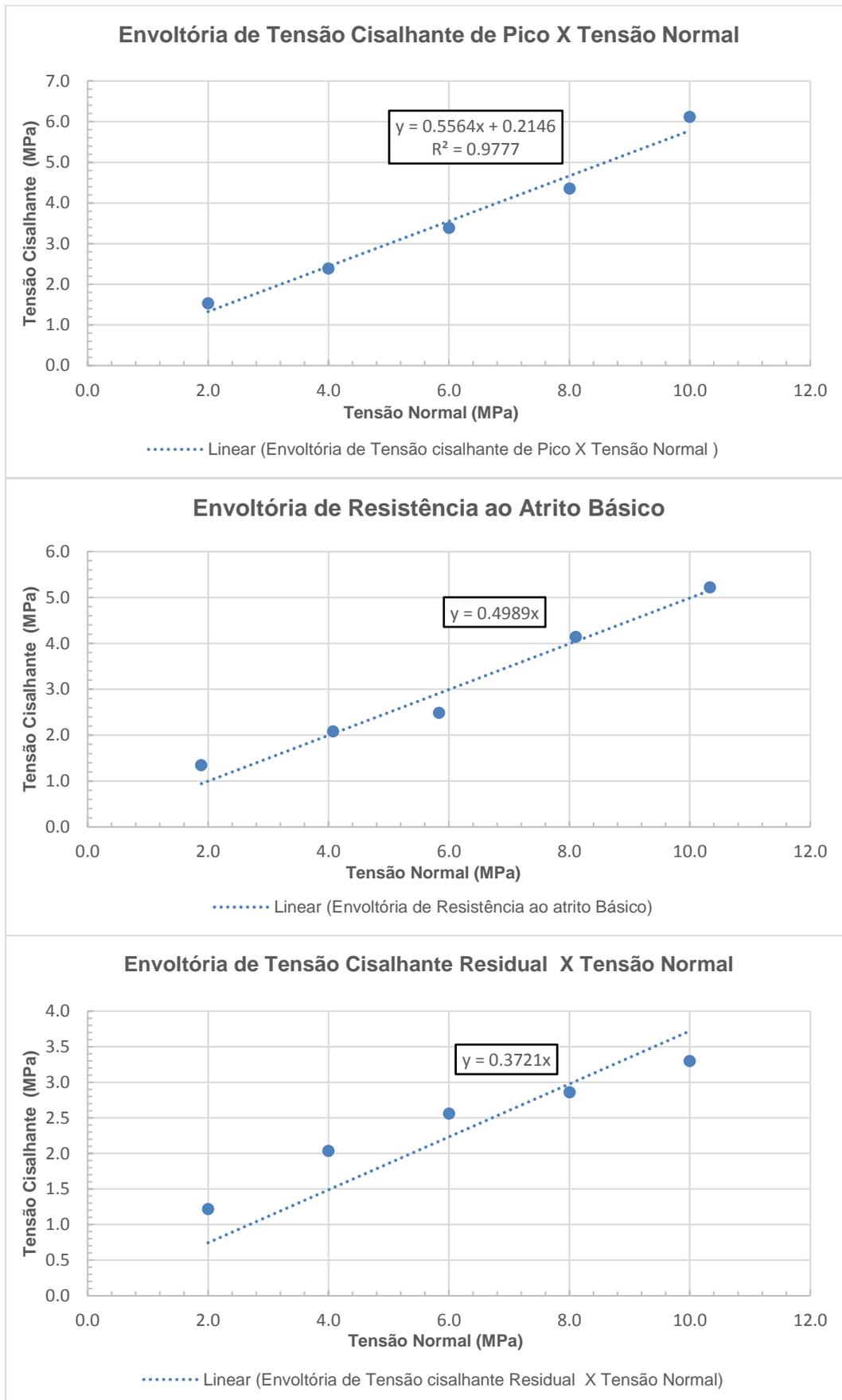
Resultados da amostra 4Nx, de microclina gnaisse facoidal.



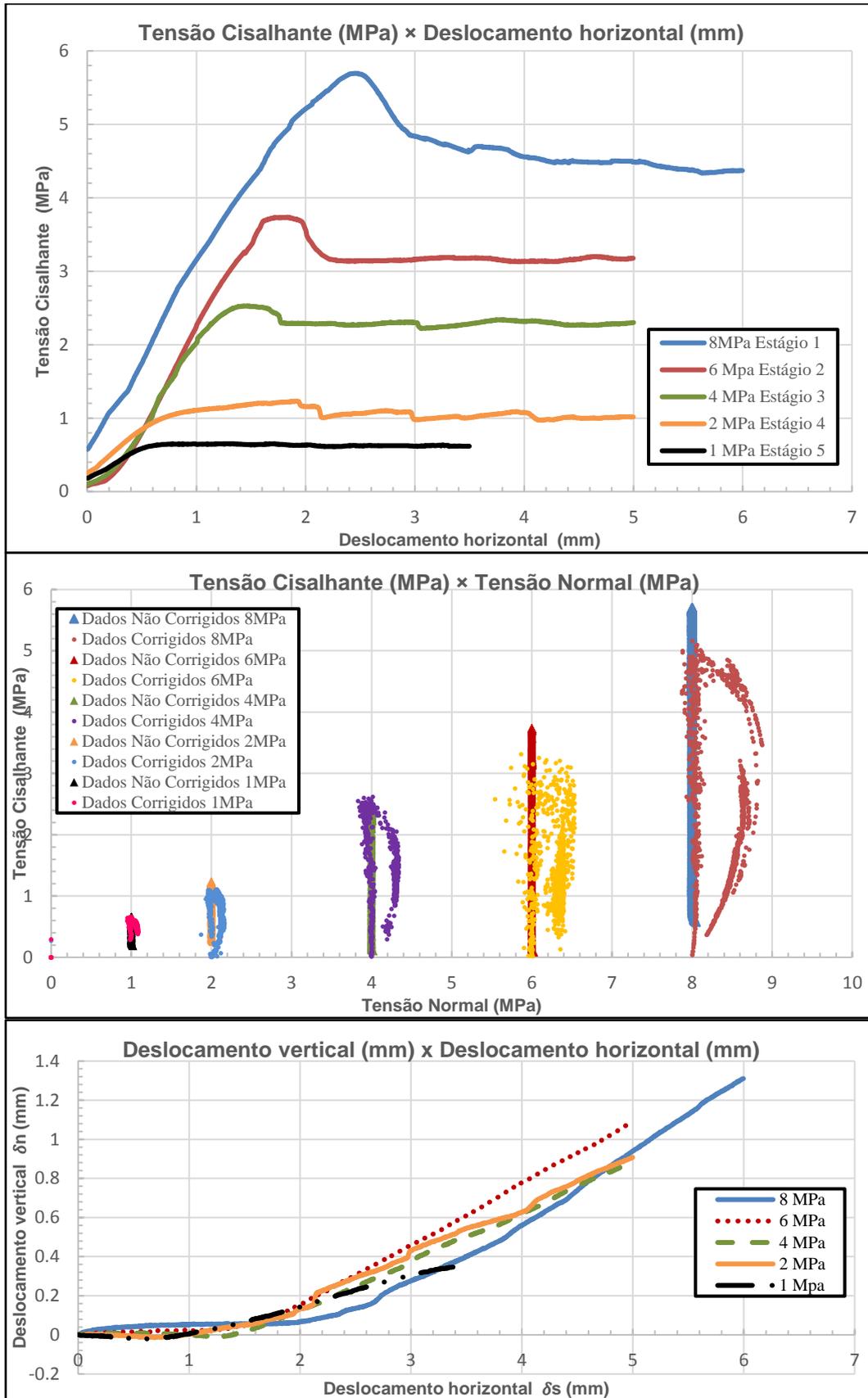
Resultados da amostra 1Hx, de microclina gnaisse facoidal



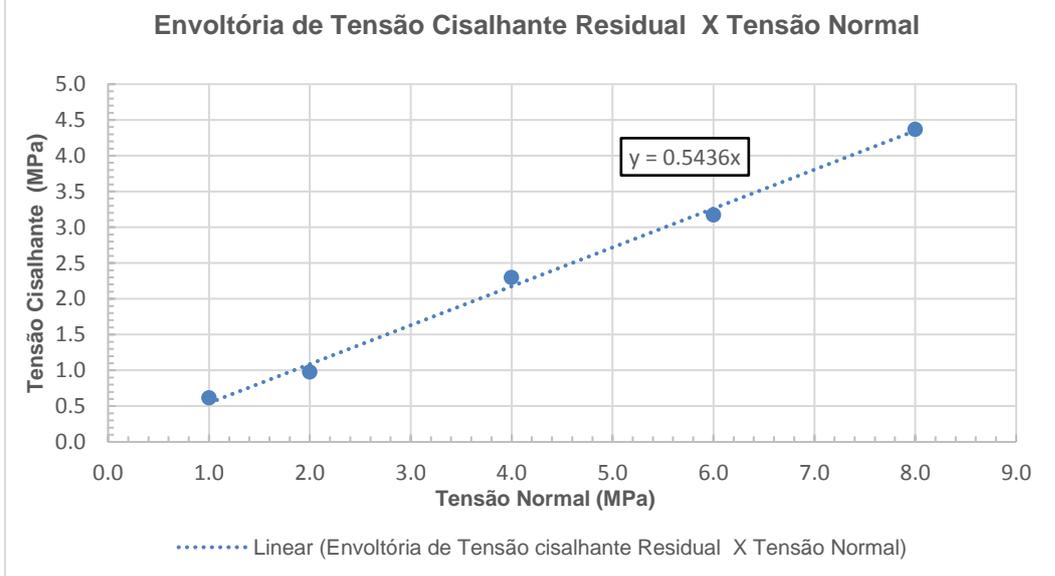
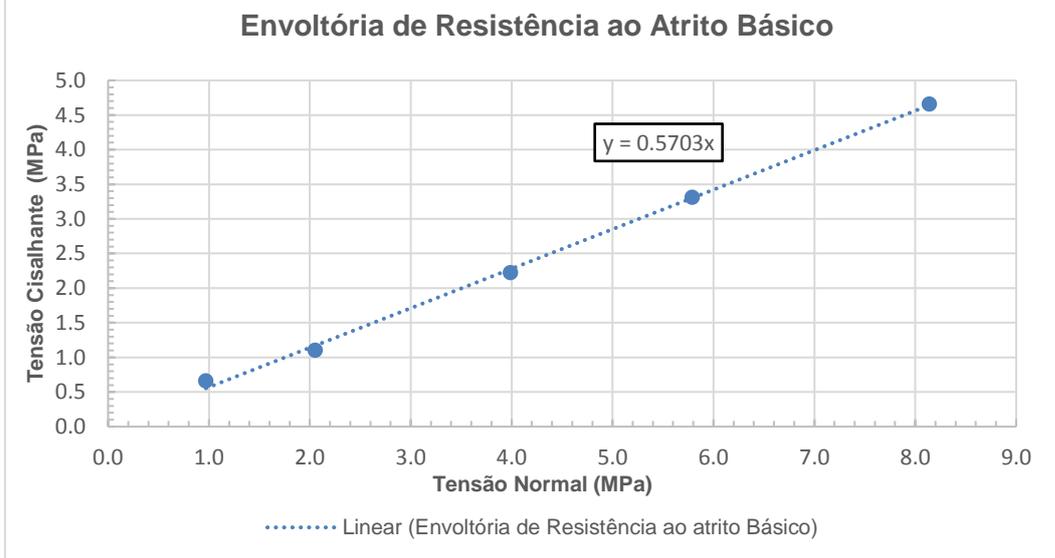
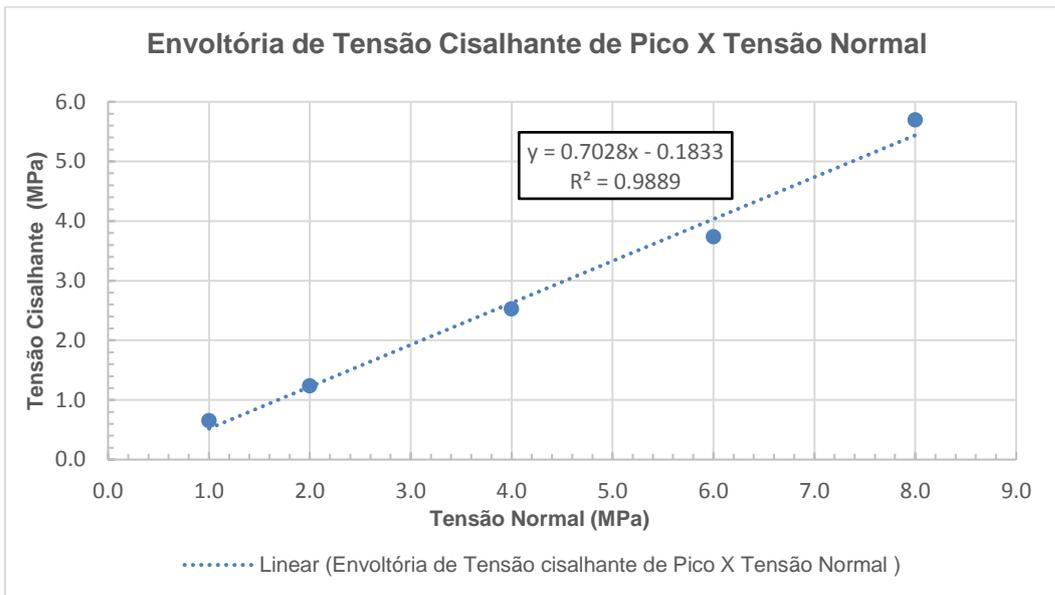
Resultados da amostra 1Hx, de microclina gnaisse facoidal.



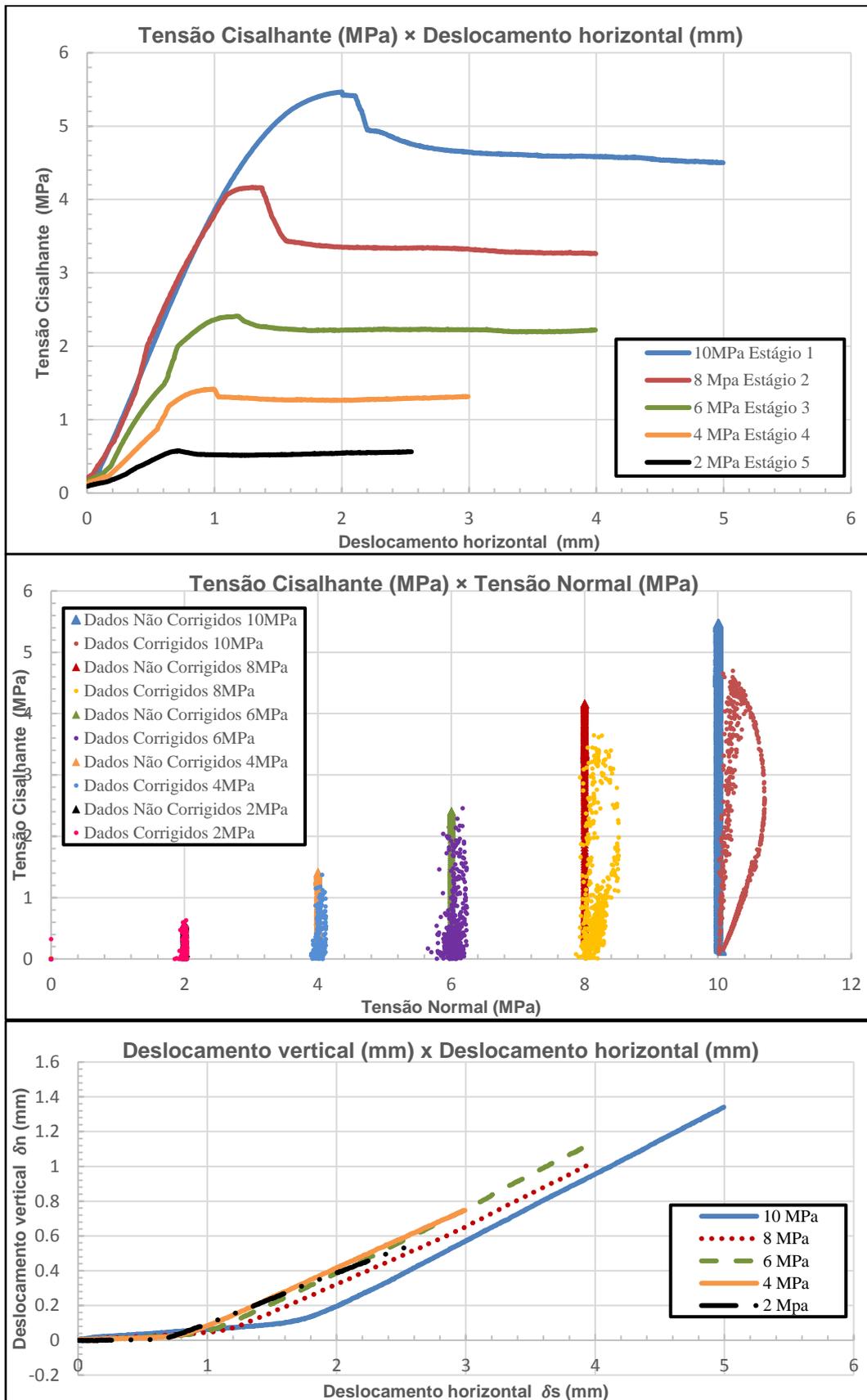
Resultados da amostra 2Hx, de microclina gnaissé facoidal.



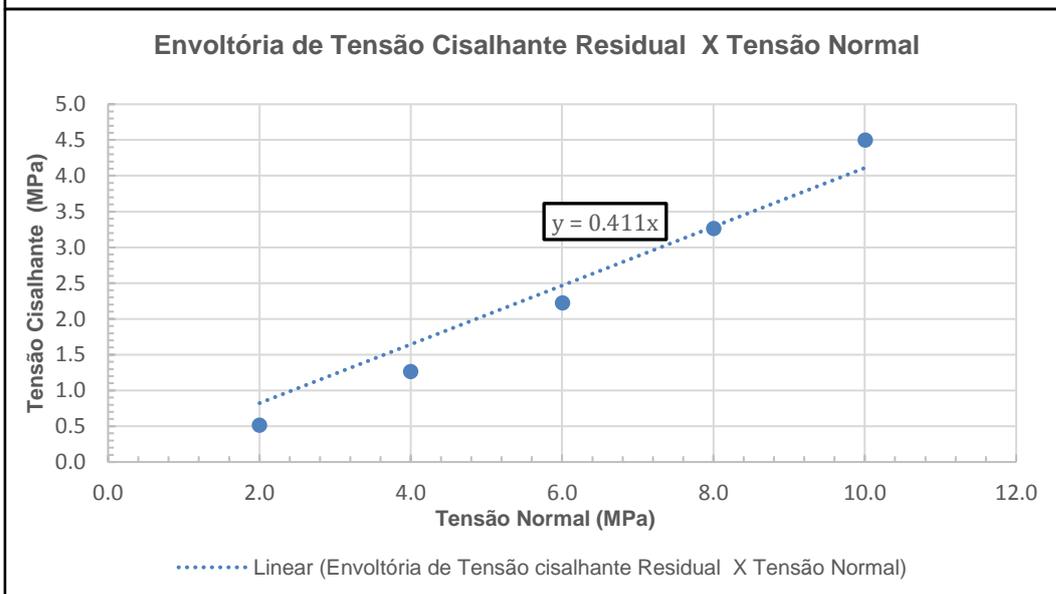
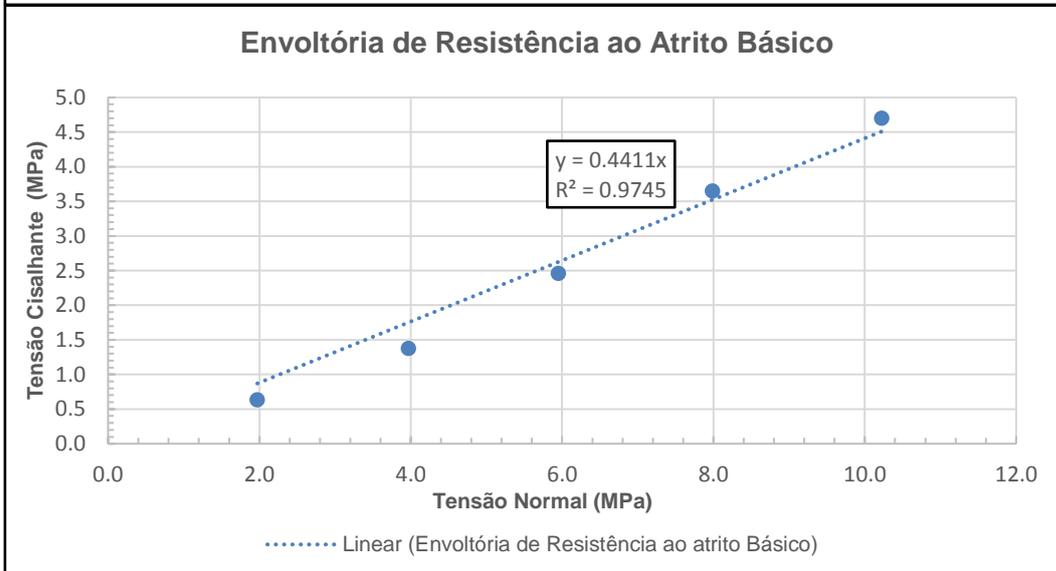
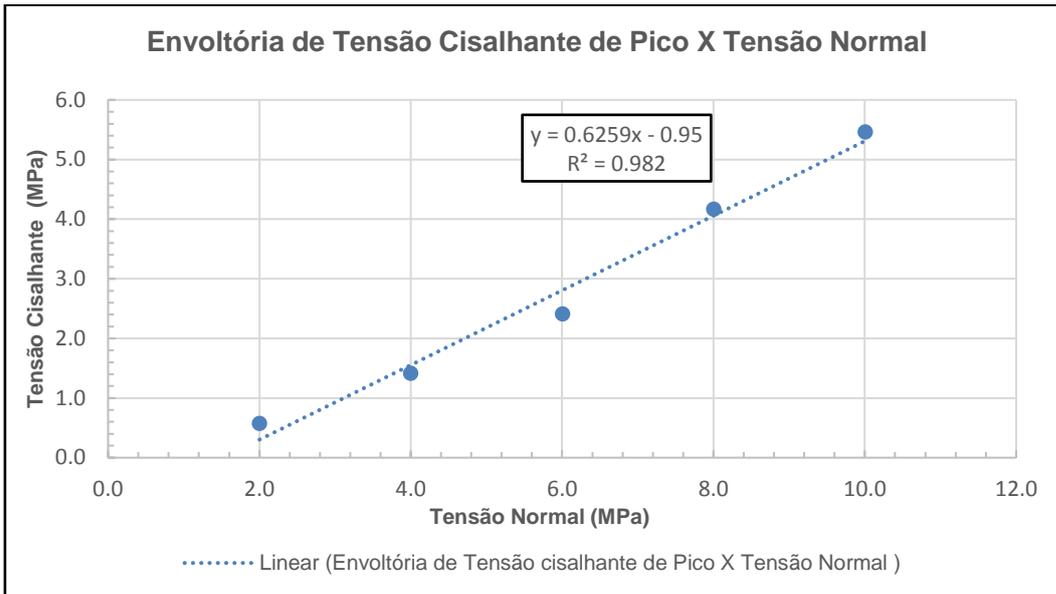
Resultados da amostra 2Hx, de microclina gnaisse facoidal.



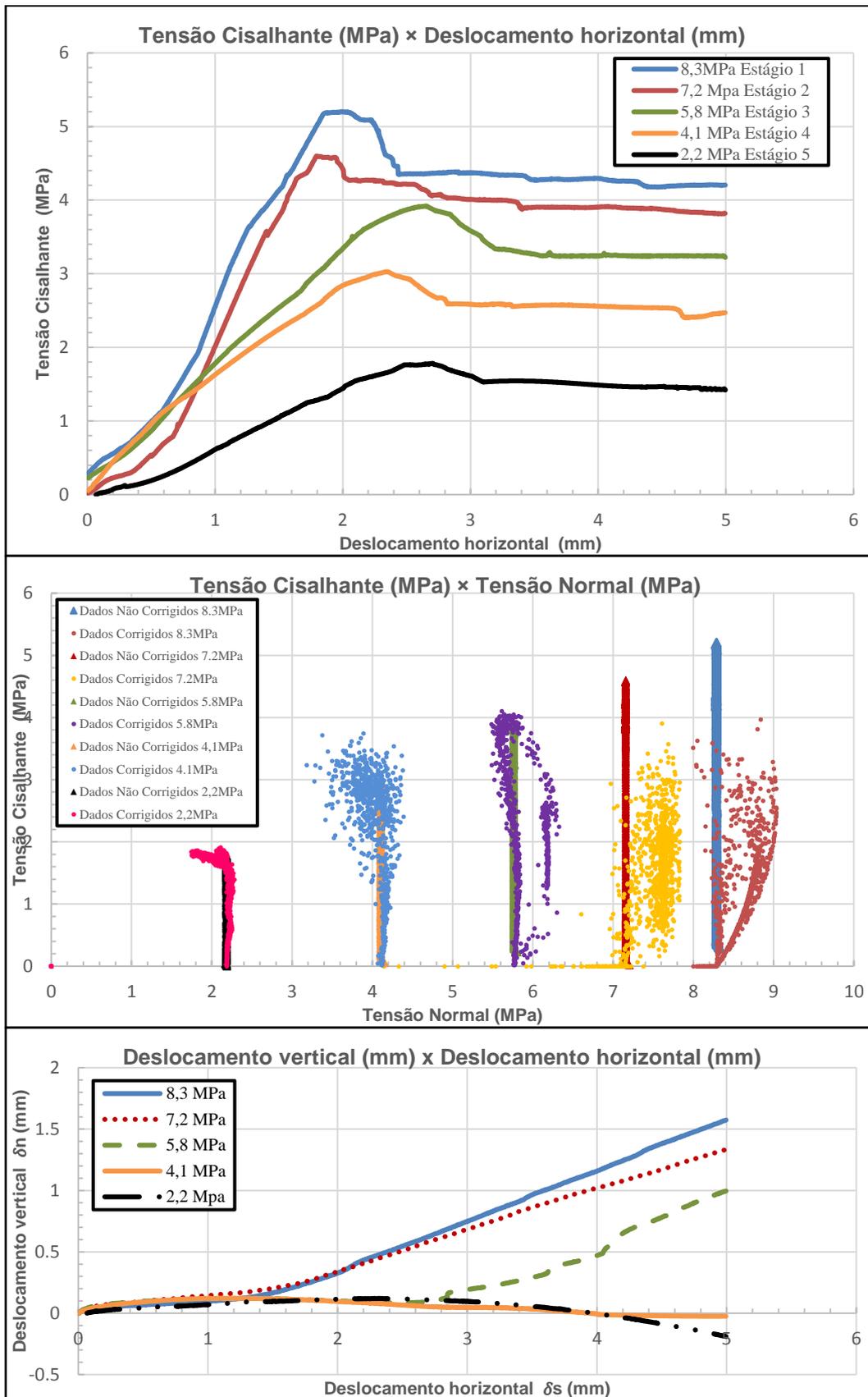
Resultados da amostra 3Hx, de microclina gnaisse facoidal.



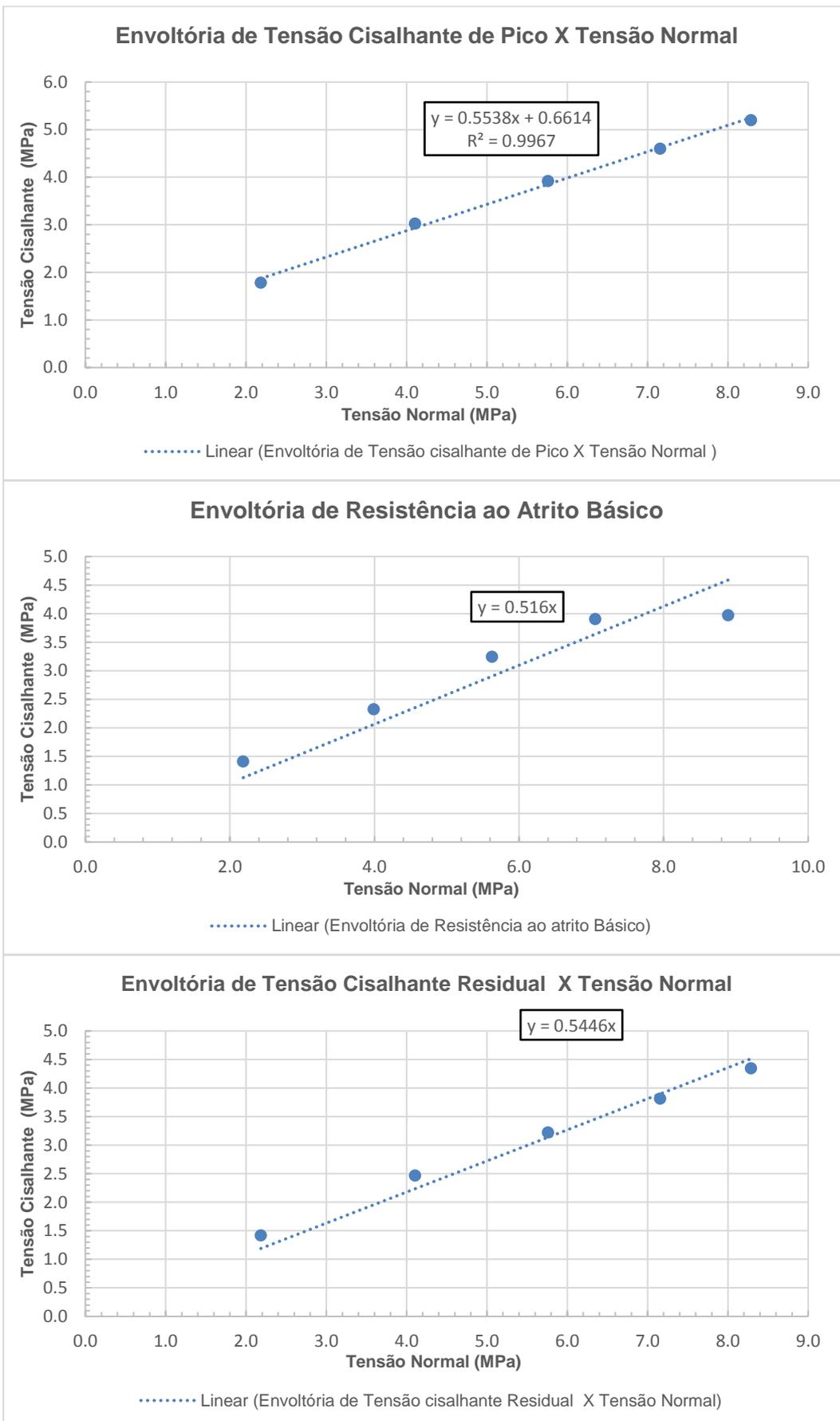
Resultados da amostra 3Hx, de microclina gnaisse facoidal.



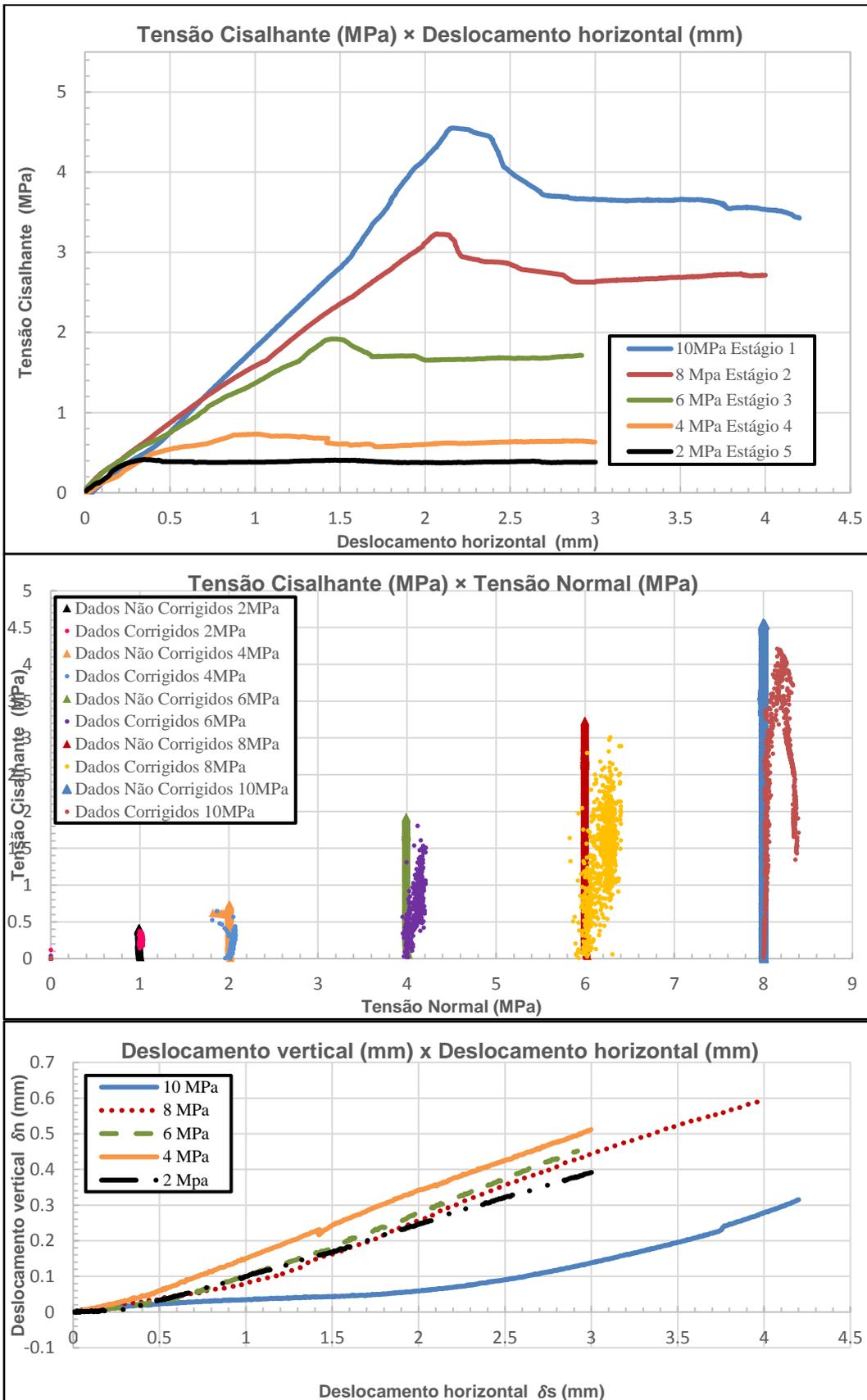
Resultados da amostra 4Hx, de microclina gnaisse facoidal.



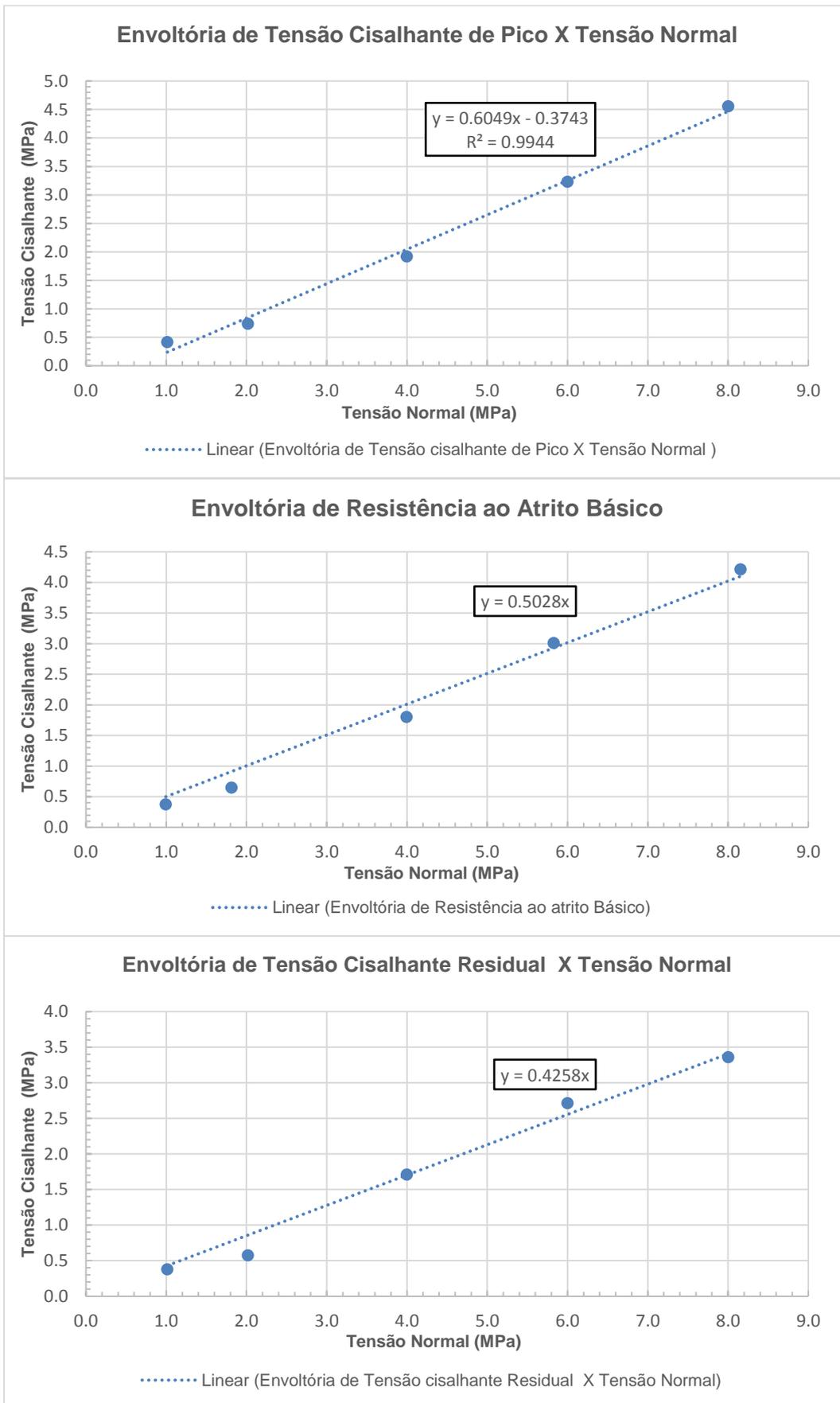
Resultados da amostra 4Hx, de microclina gnaisse facoidal.



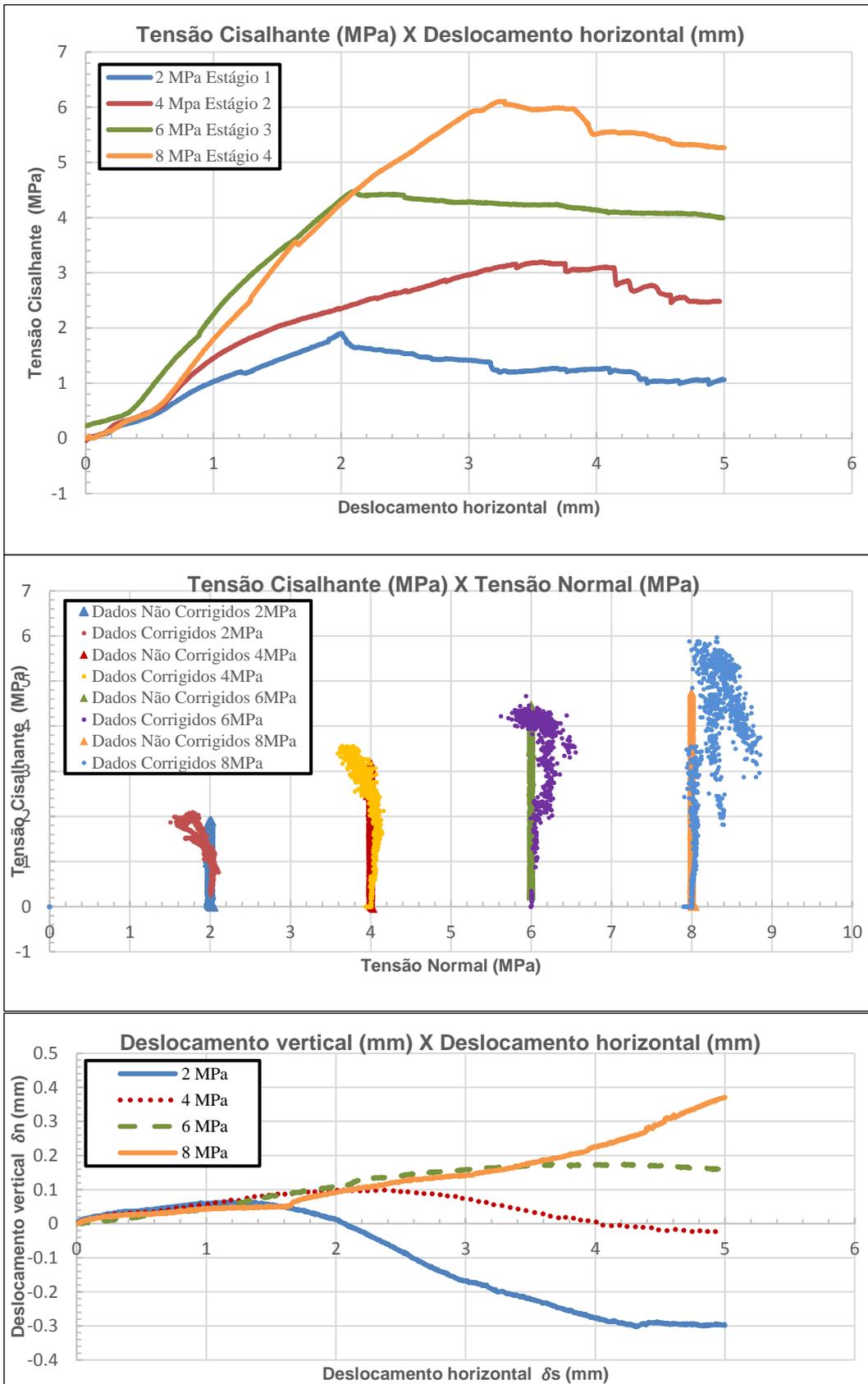
Resultados da amostra 5Hx, de microclina gnaisse facoidal.



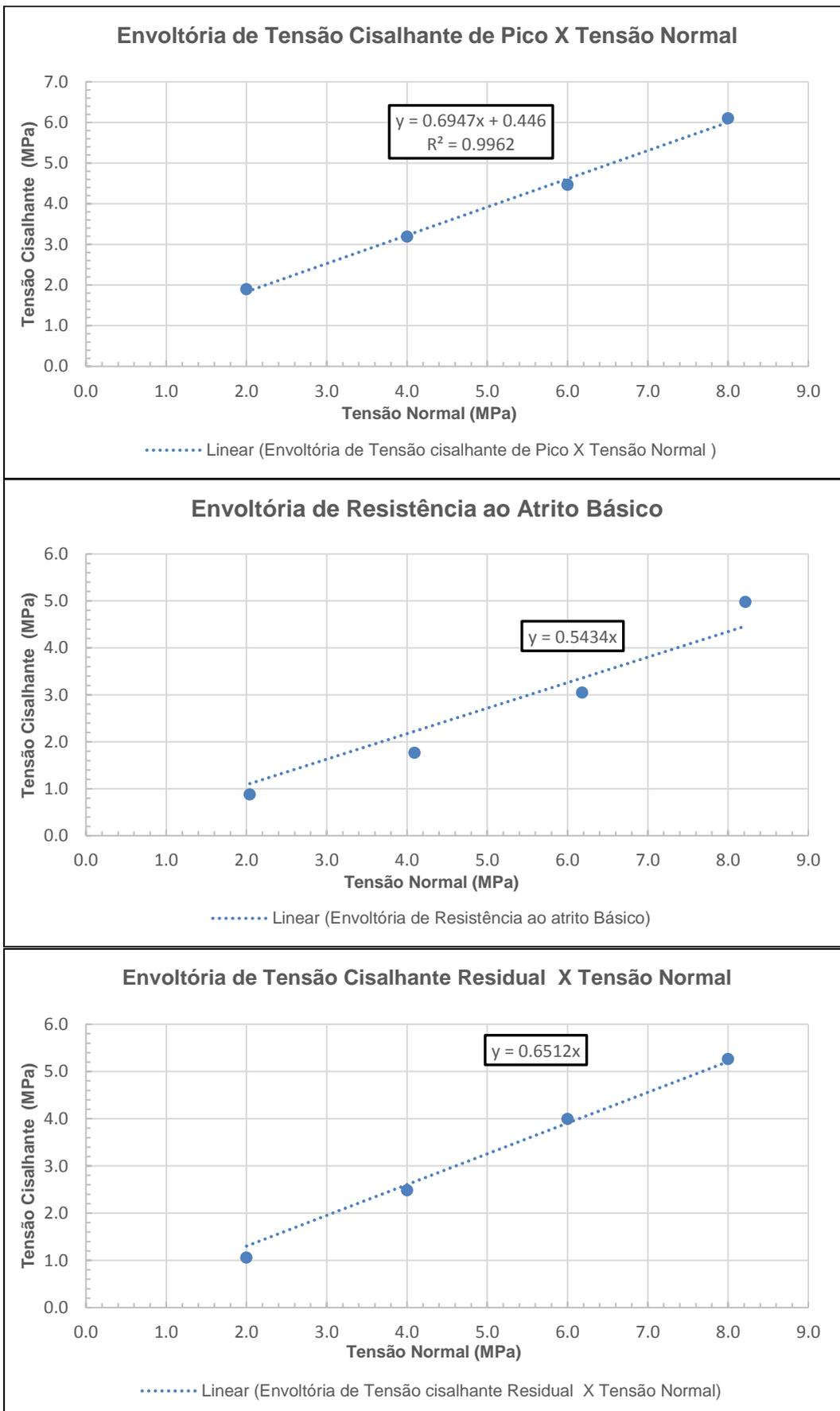
Resultados da amostra 5Hx, de microclina gnaisse facoidal.



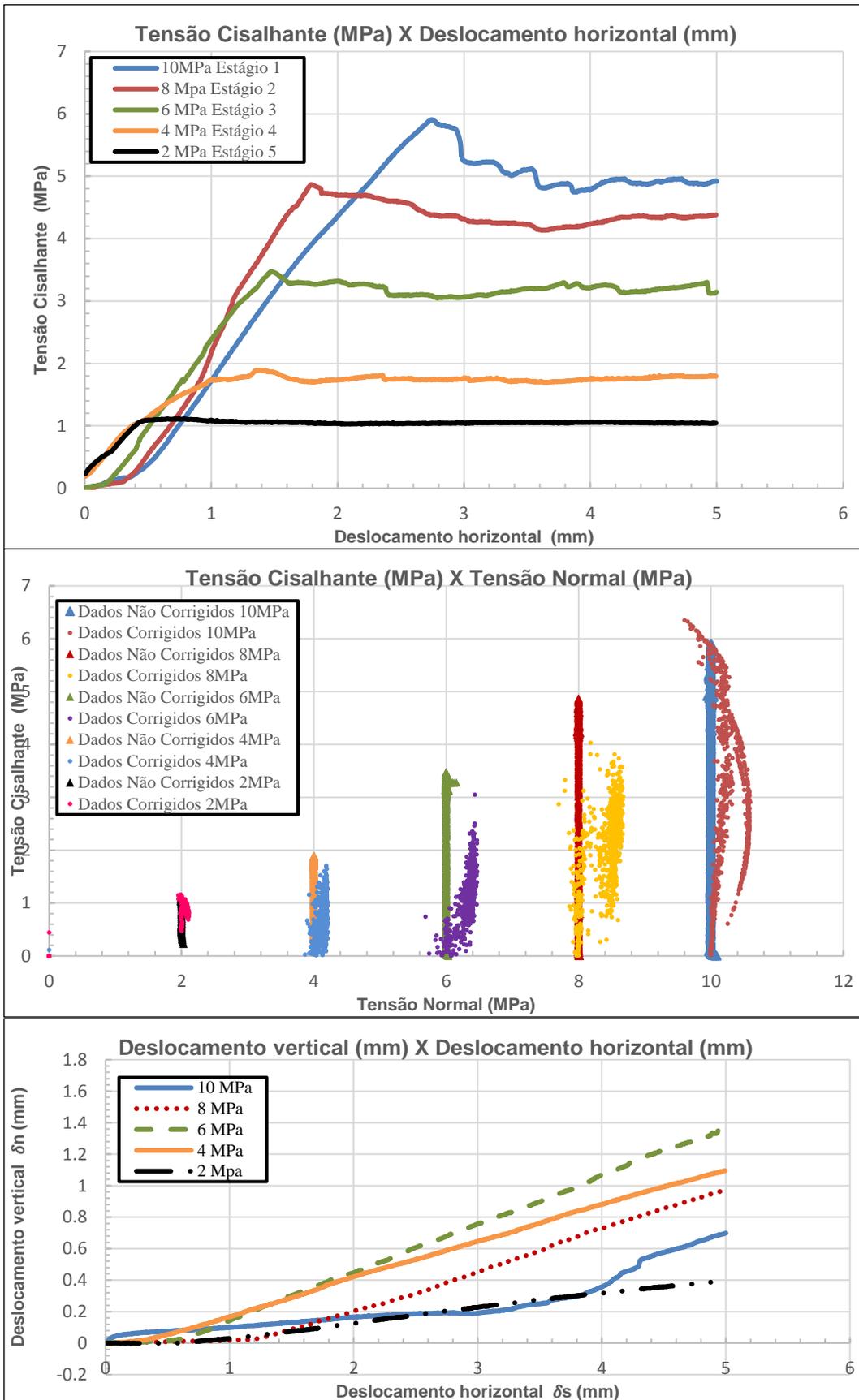
Resultados da amostra 1Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.



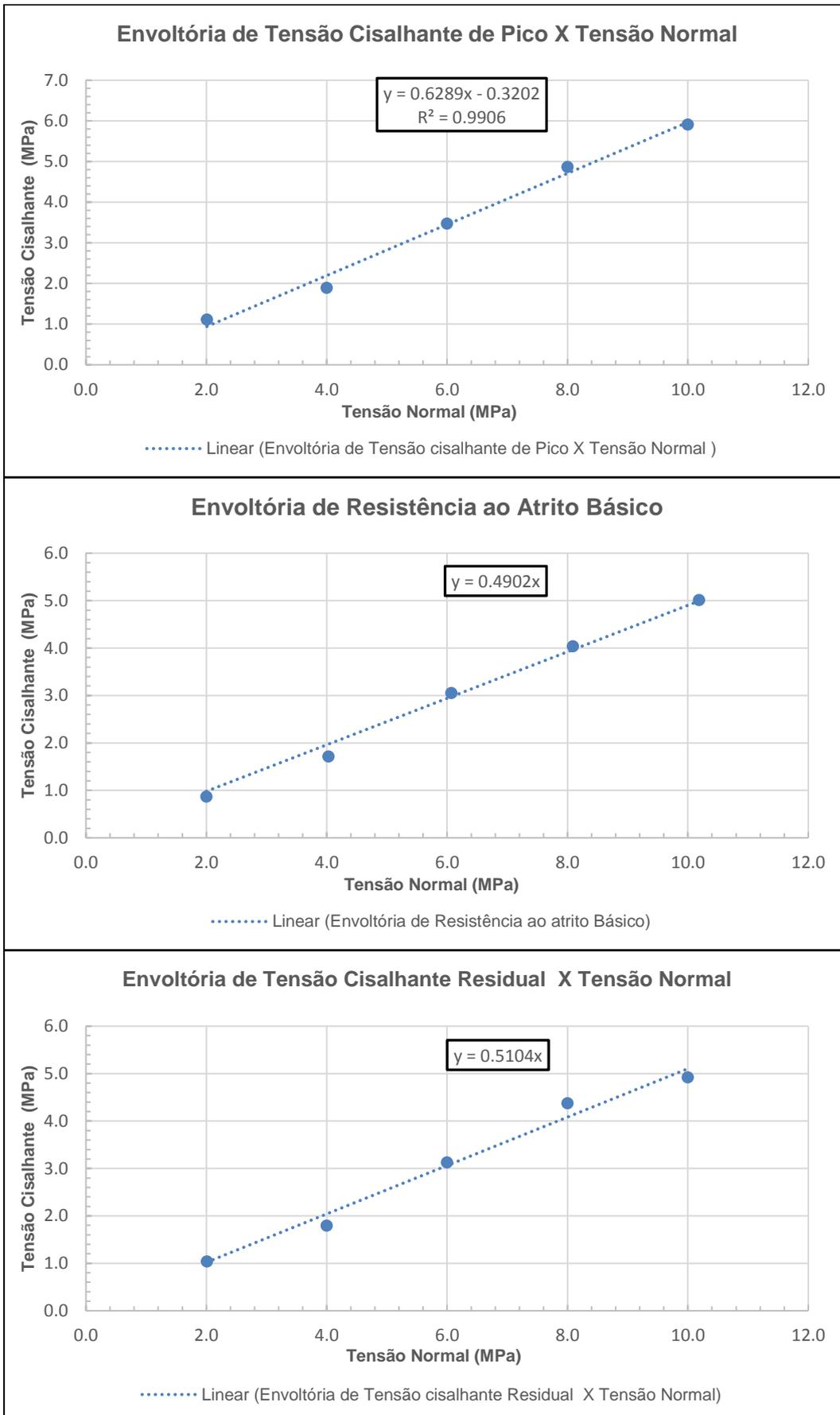
Resultados da amostra 1Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.



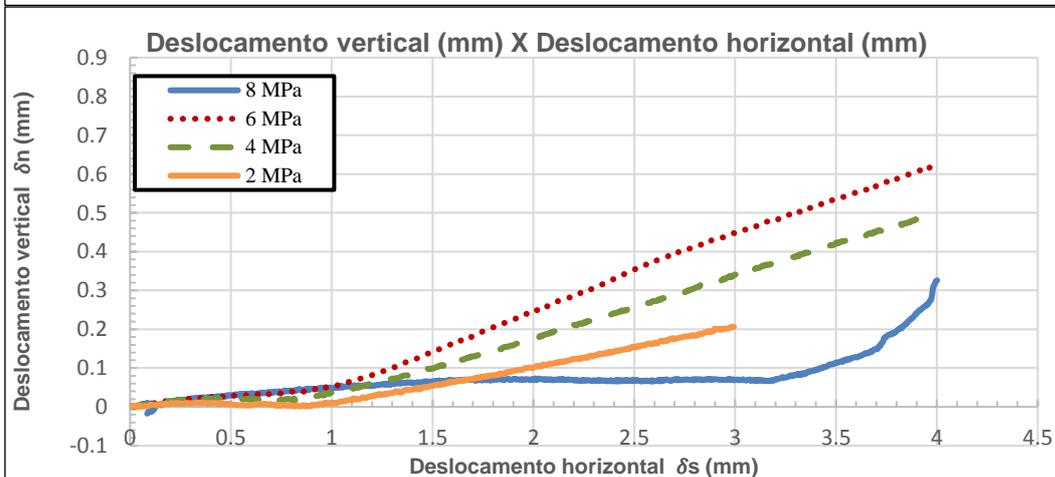
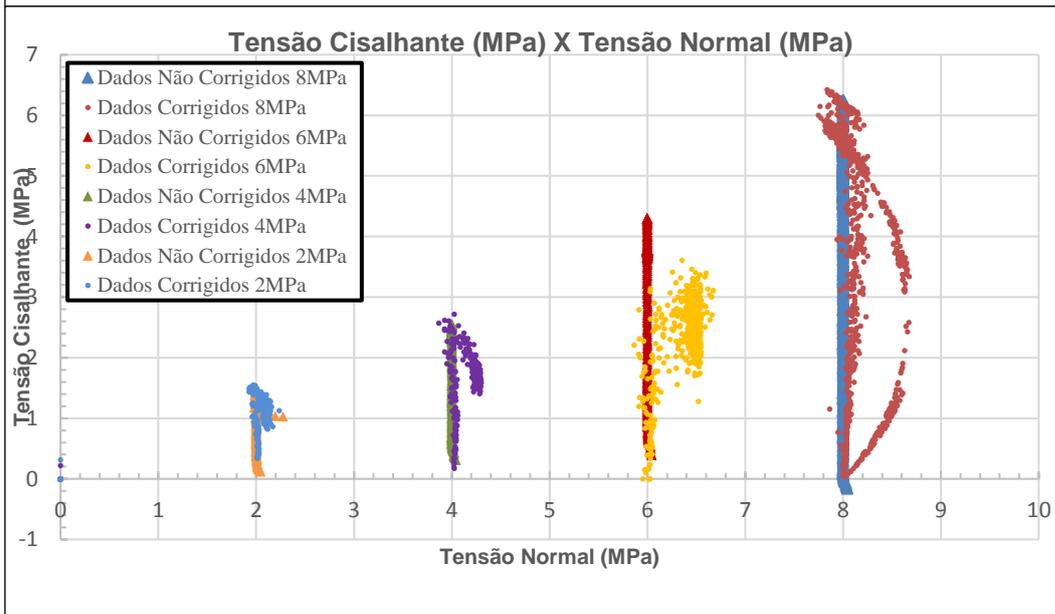
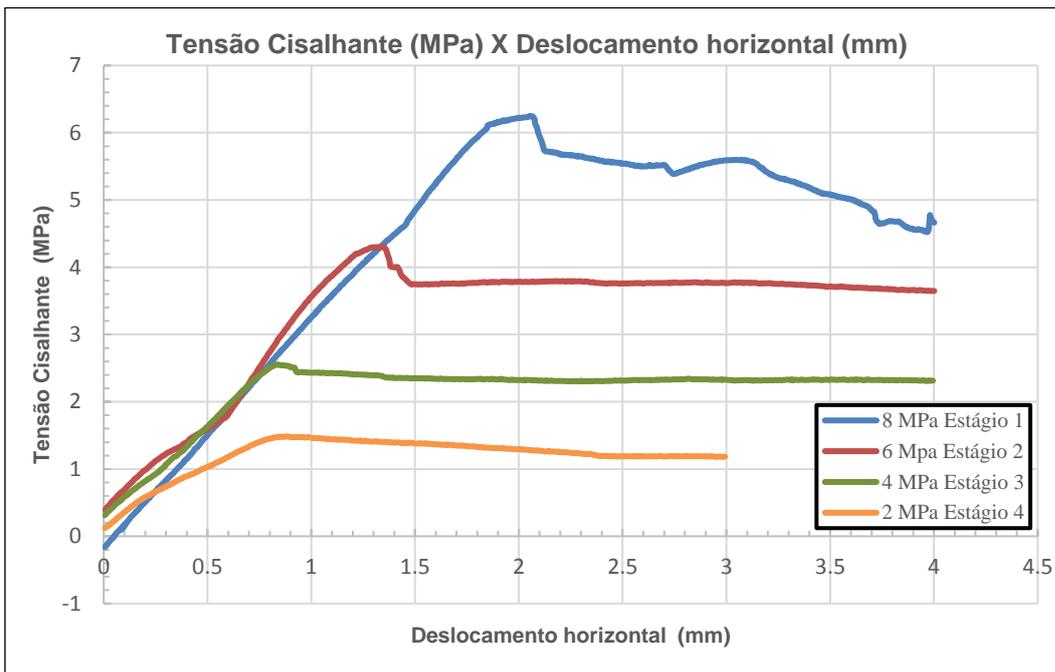
Resultados da amostra 2Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.



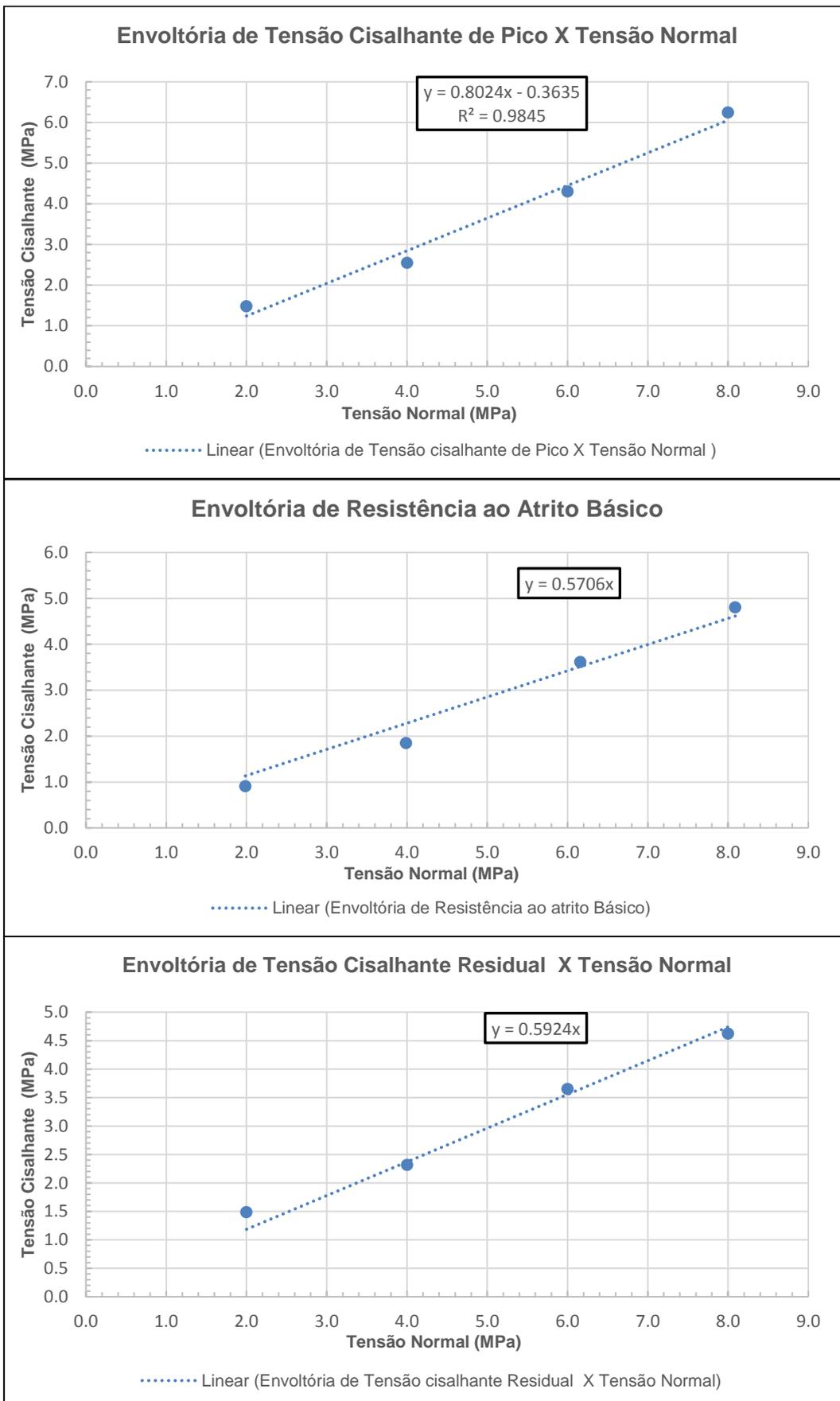
Resultados da amostra 2Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.



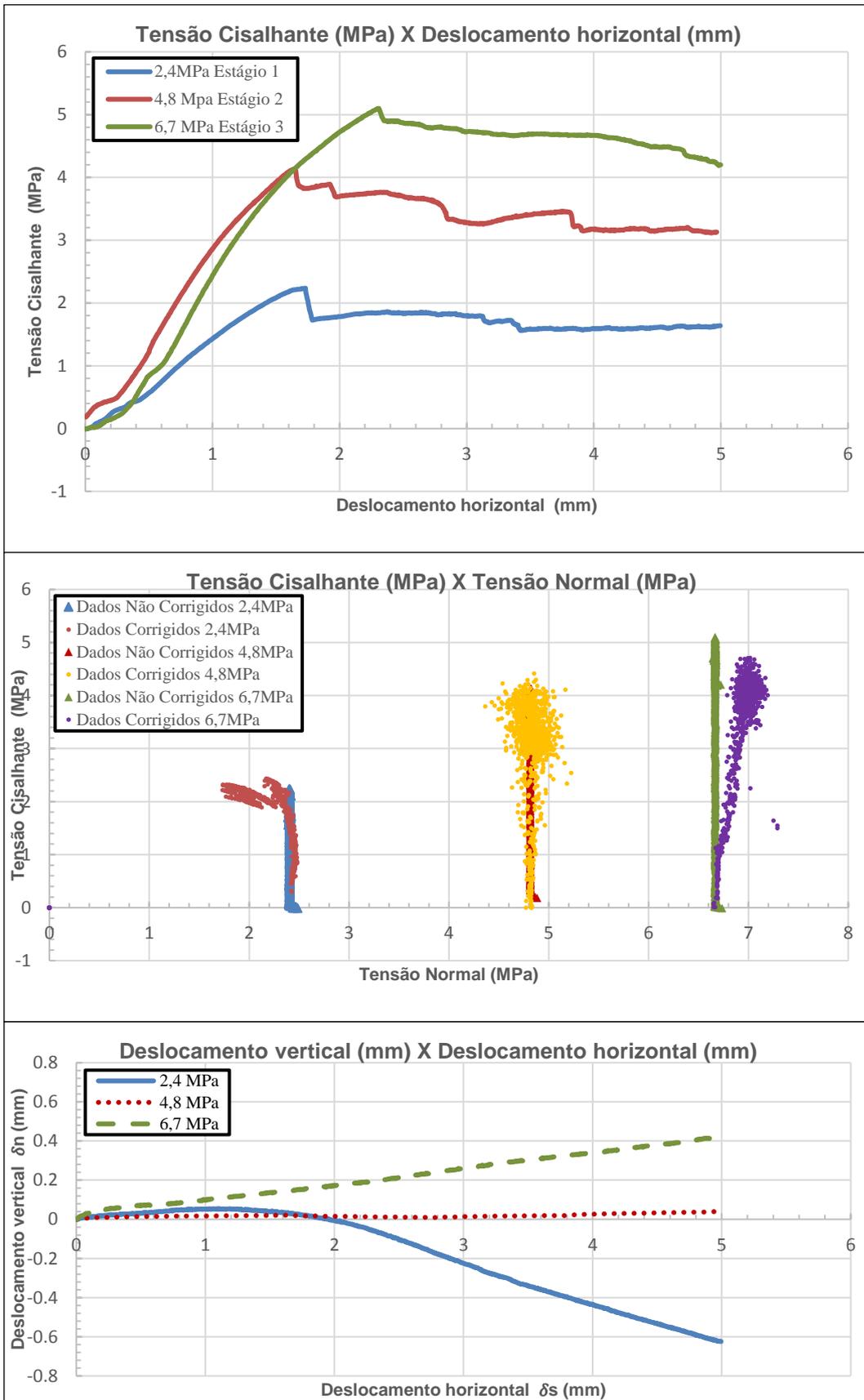
Resultados da amostra 3Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.



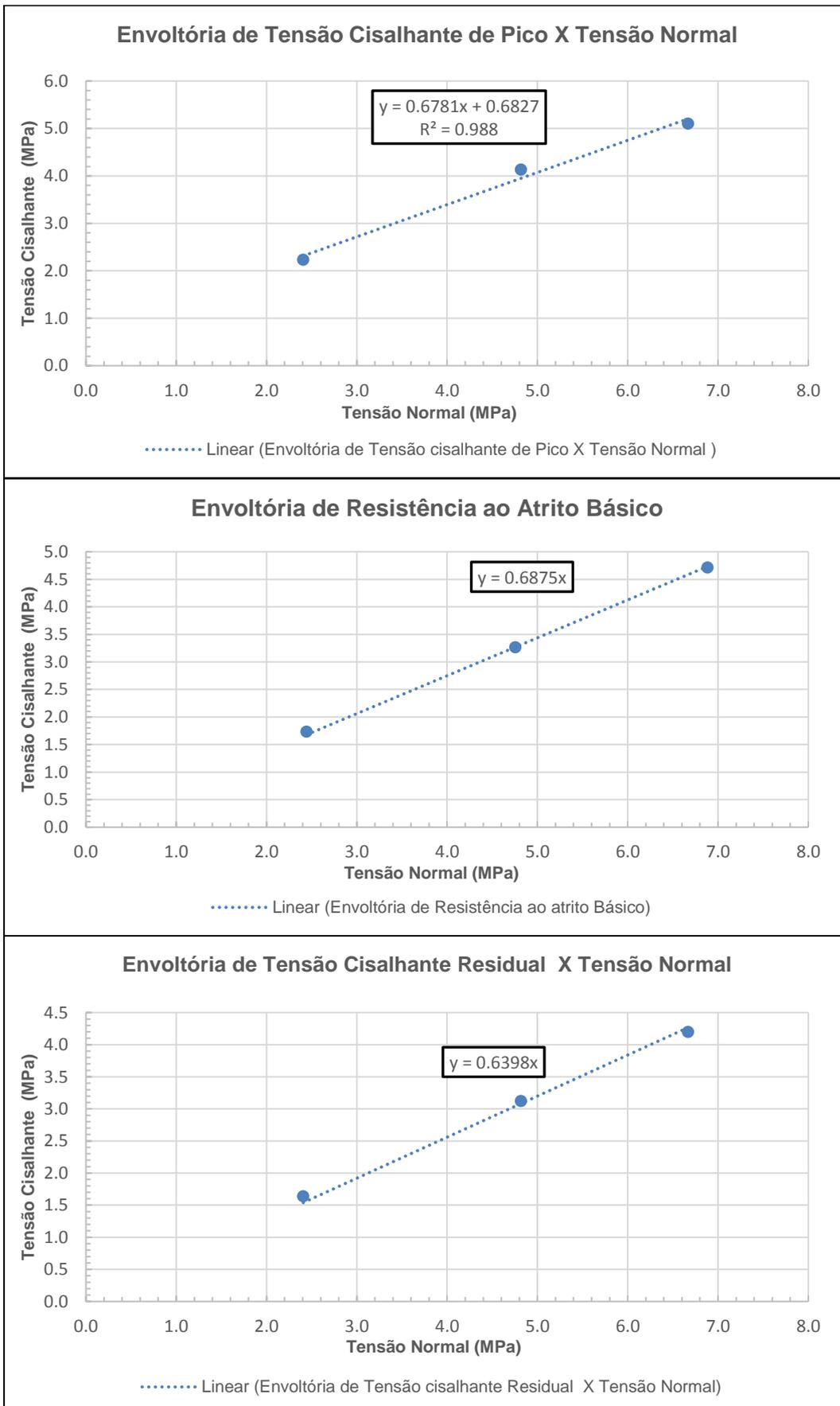
Resultados da amostra 3Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.



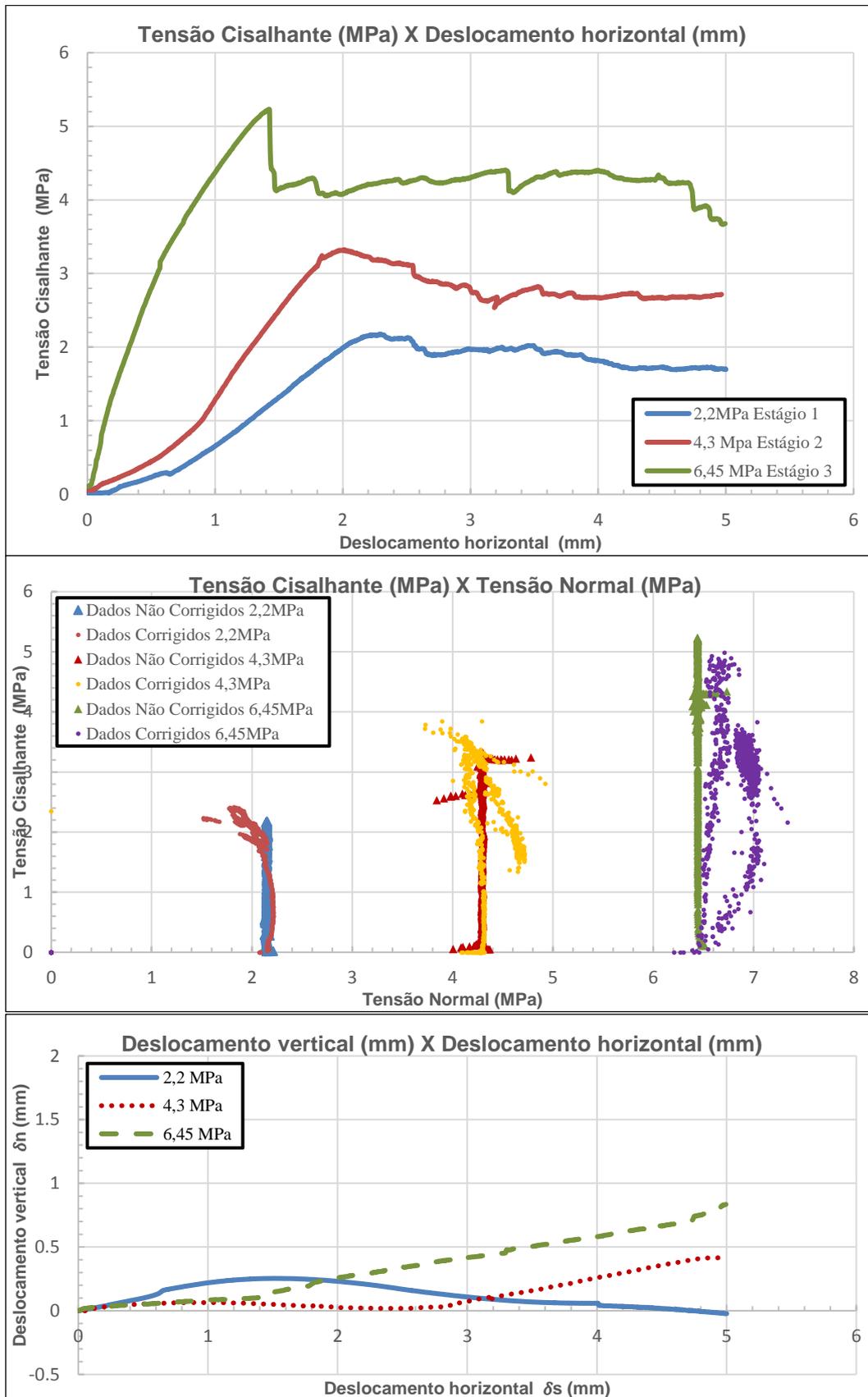
Resultados da amostra 4Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.



Resultados da amostra 4Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.



Resultados da amostra 5Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss



Resultados da amostra 5Nx, de plagioclásio biotita hornblenda gnaiss.

