



**João Victor Melo Coutinho**

**Ensaaios de Cisalhamento Direto na Areia  
da Praia de Ipanema**

**Dissertação de Mestrado**

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 da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Vitor Nascimento Aguiar  
Co-orientador: Prof. Ian Schumann Marques Martins

Rio de Janeiro

Abril de 2021



**João Victor Melo Coutinho**

## **Ensaio de Cisalhamento Direto na Areia da Praia de Ipanema**

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

**Prof. Vitor Nascimento Aguiar**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

**Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

**Prof. Robson Palhas Saramago**

UFF

Rio de Janeiro, 26 de abril de 2021

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

## **João Victor Melo Coutinho**

Graduou-se em Engenharia Civil pela UFS (Universidade Federal de Sergipe), em 2017. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2018, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental.

### Ficha Catalográfica

Coutinho, João Victor Melo

Ensaio de cisalhamento direto na areia da praia de Ipanema / João Victor Melo Coutinho ; orientador: Vitor Nascimento Aguiar ; co-orientador: Ian Schumann Marques Martins. – 2021.  
282 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2021.  
Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Areia da praia de Ipanema. 3. Resistência ao cisalhamento. 4. Ensaio de cisalhamento direto. 5. Dilatância. I. Aguiar, Vitor Nascimento. II. Martins, Ian Schumann Marques. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Dedico esta dissertação  
à Deus e à minha família.



## Agradecimentos

Acima de tudo, agradeço a Deus pelo dom da vida, por estar sempre presente, guiando-me com Seu amor e concedendo-me coragem para lutar.

Aos meus pais, João Ricardo e Maria José, minha gratidão eterna por me ensinarem a crescer, traçar o meu caminho e por sempre me apoiarem nos momentos mais difíceis. À minha irmã, Lorena, por compartilhar os melhores momentos de alegria. Pelo apoio e pelo auxílio nos momentos difíceis.

À minha namorada, Nathália, agradeço por estar sempre presente dando todo o apoio durante esse tempo dedicado à pesquisa.

Ao professor Vitor Nascimento Aguiar, por ter sido meu orientador e mentor durante esses últimos anos. Obrigado, professor, por toda a paciência, o conhecimento e rigor. Agradeço também ao meu co-orientador Ian Schumann Marques Martins, por todo o auxílio durante a pesquisa. Muito obrigado pela dedicação e apoio.

Aos amigos que fiz na PUC-Rio e aos técnicos que conheci no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da PUC-Rio, Amaury, Josué, Carlos e Edson, sou muito grato por todo o apoio e auxílio ao longo da pesquisa. Obrigado por toda a disponibilidade diária.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Por fim, muito obrigado a todos que me apoiaram nessa jornada. Serei eternamente grato a cada um de vocês.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

## Resumo

Coutinho, João Victor Melo. Aguiar, Vitor Nascimento. **Ensaio de Cisalhamento Direto na Areia da Praia de Ipanema**. Rio de Janeiro, 2021. 282p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma extensa campanha de ensaios de cisalhamento direto foi realizada na Areia da Praia de Ipanema, inspirado em Simões (2015). Os ensaios foram realizados em corpos de prova na condição seca, moldados em seis diferentes domínios de compacidade relativa (CR), desde muito fofo até muito compacto. Para cada domínio de CR, foram realizados ensaios sob dez diferentes valores de tensão normal nominal ( $\sigma$ ), variando de 25 a 1250 kPa. Em todos os ensaios, foi utilizado um dispositivo desenvolvido para impedir a rotação do *top cap*. A grande quantidade e variedade de ensaios permitiu uma análise detalhada de como as características das curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) versus deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) versus deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” variaram com as variações de CR e de tensão normal, especialmente o ângulo de atrito de pico ( $\phi'$ ) e o deslocamento vertical do *top cap* na ruptura ( $\delta v_r$ ), mostrando contração ou dilatação na ruptura. O ângulo de atrito a volume constante ( $\phi'_{cv}$ ) da Areia da Praia de Ipanema parece estar situado entre 30° e 32°. Uma curva que relaciona índice de vazios crítico e tensão normal nominal crítica foi obtida a partir dos ensaios de cisalhamento direto na Areia da Praia de Ipanema, sendo análoga à linha de estado crítico proposta por Lee & Seed (1967). Ademais, a alta frequência de aquisição de dados tornou explícito o fenômeno conhecido como *stick-slip* nas curvas obtidas, mostrando que a amplitude do fenômeno é tanto maior quanto menor a tensão normal nominal ( $\sigma$ ).

## Palavras – chave

Resistência ao cisalhamento; Areia; Dilatância.

## Abstract

Coutinho, João Victor Melo. Aguiar, Vitor Nascimento (Advisor). **Direct Shear Tests on Ipanema Beach Sand**. Rio de Janeiro, 2021. 282p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A comprehensive research program of direct shear tests was carried out on Ipanema Beach Sand, inspired by Simões (2015). The tests were carried out on specimens in dry condition, prepared in six different domains of relative density ( $D_r$ ), from very loose to very dense. For each  $D_r$  domain, tests were performed under ten different values of nominal normal stress ( $\sigma$ ), ranging from 25 to 1250 kPa. In all tests, a device developed to prevent the rotation of the *top cap* was used. The large number and variety of tests allowed a detailed analysis of how the characteristics of the “Shear stress ( $\tau$ ) over normal stress ( $\sigma$ ) versus relative horizontal displacement ( $\delta h$ )” curves and “top cap vertical displacement ( $\delta v$ ) versus relative horizontal displacement ( $\delta h$ ) curves” varied with CR and normal stress variations, especially the peak friction angle ( $\phi'$ ) and the vertical displacement of the *top cap* at failure ( $\delta v_r$ ), showing contraction or dilation at failure. The angle of friction at constant volume ( $\phi'_{cv}$ ) of the Ipanema Beach Sand seems to be situated between 30° and 32°. A curve relating critical void ratio and critical nominal normal stress was obtained from the direct shear tests run on Ipanema Beach Sand, being analogous to the critical state line proposed by Lee & Seed (1967). Moreover, the high frequency of data acquisition made explicit the phenomenon known as “stick-slip” in the obtained curves, showing that the amplitude of the phenomenon is greater the smaller the nominal normal stress ( $\sigma$ ).

## Keywords

Shear strength; Sand; Dilatancy.

## Sumário

1 Introdução	22
1.1. Motivação da Pesquisa	22
1.2. Objetivos	23
1.3. Estrutura da Dissertação	24
2 Revisão Bibliográfica	25
2.1. Resistência ao Cisalhamento	25
2.1.1. Introdução à Resistência ao Cisalhamento dos Solos	25
2.1.2. Estado de Tensão no Solo	31
2.1.3. Critério de Ruptura de Solos	37
2.1.4. Comportamento Tensão-deformação de Areias Submetidas ao Cisalhamento Drenado	41
2.1.4.1. Considerações Iniciais	41
2.1.4.2. Comportamento do tipo contráctil	42
2.1.4.3. Comportamento do tipo dilatante	43
2.1.4.4. O fenômeno da dilatância em areias	45
2.1.4.5. O conceito de índice de vazios crítico segundo Lee & Seed (1967)	53
2.1.5. Ensaio de cisalhamento direto	62
2.1.6. Estudo da Resistência ao cisalhamento da Areia da Praia de Ipanema realizado por Simões (2015)	67
3 Programa Experimental	72
3.1. Considerações Iniciais	72
3.2. Coleta da amostra da Areia da Praia de Ipanema	73
3.3. Métodos de ensaio	73
3.3.1. Lavagem da amostra	73
3.3.2. Quarteamento da amostra	75
3.3.3. Caracterização da amostra	75
3.3.3.1. Granulometria por peneiramento	76

3.3.3.2. Densidade relativa dos grãos (Gs) do solo	78
3.3.3.3. Microscopia eletrônica e formato dos grãos	79
3.3.3.4. Índice de Vazios Máximo	81
3.3.3.5. Índice de Vazios Mínimo e Índice de Vazios Intermediários	89
3.3.4. Ensaio de Cisalhamento Direto	97
3.3.5. Preparação dos corpos de prova	110
3.3.6. Procedimento de montagem e execução dos ensaios de cisalhamento direto	115
4 Resultados e discussões	122
4.1. Visão geral dos ensaios de cisalhamento direto	122
4.2. Apresentação e análise dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto agrupados por domínio de compactação relativa	124
4.2.1. Considerações iniciais	124
4.2.2. Domínio Muito Fofo	126
4.2.3. Domínio Fofo	130
4.2.4. Domínio Médio 1	134
4.2.5. Domínio Médio 2	138
4.2.6. Domínio Compacto	142
4.2.7. Domínio Muito Compacto	146
4.3. Apresentação e análise dos resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto agrupados por tensão normal nominal	150
4.3.1. Considerações iniciais	150
4.3.2. Tensão normal nominal igual a 25 kPa	151
4.3.3. Tensão normal nominal igual a 50 kPa	153
4.3.4. Tensão normal nominal igual a 75 kPa	155
4.3.5. Tensão normal nominal igual a 100 kPa	157
4.3.6. Tensão normal nominal igual a 150 kPa	159
4.3.7. Tensão normal nominal igual a 300 kPa	161
4.3.8. Tensão normal nominal igual a 500 kPa	163
4.3.9. Tensão normal nominal igual a 750 kPa	165
4.3.10. Tensão normal nominal igual a 1000 kPa	167
4.3.11. Tensão normal nominal igual a 1250 kPa	169

4.3.12. Análise dos resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto agrupados por tensão normal nominal	171
4.4. Resumo geral dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto	172
4.5. Construção da a curva índice de vazios crítico <i>versus</i> tensão normal nominal crítica	175
4.6. Análise do fenômeno da dilatância segundo a abordagem de Taylor (1948)	177
4.7. Comparação entre o ângulo de atrito a volume constante e o ângulo de atrito no repouso	187
4.8. Análise do efeito <i>stick-slip</i>	188
4.9. Avaliação da eficácia do dispositivo utilizado para impedir a rotação do <i>top cap</i>	199
 5 Conclusões	 202
5.1. Conclusões Gerais	202
5.2. Sugestões para futuros trabalhos	207
 6 Referências bibliográficas	 208

## Lista de figuras

Figura 1 - Representação microscópica do atrito entre dois corpos sólidos (Lambe & Whitman, 1979)	26
Figura 2 - Representação macroscópica do contato entre um bloco e uma superfície horizontal na qual nenhuma força $T$ é aplicada ao bloco (adaptado de Taylor, 1948)	28
Figura 3 - Representação macroscópica do contato entre um bloco e uma superfície horizontal na qual uma pequena força $T'$ ( $T' < F_{at}$ ) é aplicada (adaptado de Taylor, 1948)	29
Figura 4 - Representação macroscópica do contato entre um bloco e uma superfície horizontal na qual toda a força de atrito $F_{at}$ disponível é solicitada (adaptado de Taylor, 1948)	30
Figura 5 - Representação das tensões atuantes nos planos vertical e horizontal em um elemento no interior de uma massa de solo (adaptado - Lambe e Whitman, 1979)	32
Figura 6 - Representação das tensões atuantes nas faces de um elemento cúbico que representa um ponto em uma massa de solo, segundo o sistema de referência cartesiano $x,y,z$	33
Figura 7 - Tensões principais em um ponto de uma massa de solo	34
Figura 8 – Representação do Circulo de Mohr (Villaça & Taborda, 2000)	35
Figura 9 - Círculos de Mohr de tensões totais e efetivas	37
Figura 10 - Representação do critério de ruptura de Mohr	38
Figura 11 - Representação do critério de ruptura de Mohr-Coulomb	40
Figura 12 - Curvas típicas tensão desviadora x deformação específica axial e de deformação específica volumétrica x deformação específica axial para corpos de prova de areia com comportamento contráctil (modificado de Pinto, 2006).	43
Figura 13 - Curvas típicas tensão desviadora x deformação específica axial e de deformação específica volumétrica x deformação específica axial para	



corpos de prova de areia com comportamento dilatante (modificado de Pinto, 2006).	44
Figura 14 – Cisalhamento na areia no estado fofo e compacto (modificado de Gerscovich, 2010).	46
Figura 15 – Modelo dente de serra para dilatância (modificado de Houlsby, 1991).	47
Figura 16 – Ângulo de atrito medido versus índice de vazios inicial de uma areia de granulometria média a fina para uma dada tensão de confinamento (Rowe, 1962 <i>apud</i> Lambe & Whitman, 1979)	48
Figura 17 – Dilatância associada ao trabalho realizado para expandir o corpo de prova de areia em um ensaio de cisalhamento direto (Simões, 2015)	49
Figura 18 – Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica específica de corpos de prova de areia com CR = 38% submetido a ensaios triaxiais CIDc (Lee & Seed, 1967)	54
Figura 19 – Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica específica de corpos de prova de areia com CR = 100% submetido a ensaios triaxiais CIDc (Lee & Seed, 1967)	55
Figura 20 – Características na ruptura de corpos de prova compactos da Areia do Rio Sacramento (Lee & Seed, 1967)	56
Figura 21 – Linha ( $\sigma_{cr}$ , $\epsilon_{cr}$ ) definida em ensaios triaxiais drenados CIDc (Lee & Seed, 1967)	57
Figura 22 - Deformação volumétrica específica na ruptura para tensões confinantes de até 40 kgf/cm <sup>2</sup> (Lee & Seed, 1967).	58
Figura 23 – Deformação volumétrica específica na ruptura para diferentes índices de vazios após o adensamento (Lee & Seed, 1967).	58
Figura 24 – Linha ( $\sigma_{cr}$ , $\epsilon_{cr}$ ) definida em ensaios triaxiais CIDc da areia do Rio Sacramento (Lee & Seed, 1967)	59
Figura 25 - Linha ( $\sigma_{cr}$ , $\epsilon_{cr}$ ) definida em ensaios triaxiais CIDc (adaptado por Simões, 2015 a partir de Lee & Seed, 1967).	60
Figura 26 - Método de obtenção do índice de vazios crítico a partir de ensaios triaxiais CIDc submetidos a mesma tensão confinante (Pinto, 2006).	62

Figura 27 - Esquema do Equipamento do Ensaio de Cisalhamento Direto (Simões, 2015).	63
Figura 28 - Efeito do adernamento do <i>top cap</i> após um ensaio de cisalhamento direto (Simões, 2015).	66
Figura 29 – Curvas granulométricas determinadas em três ensaios (Simões, 2015)	67
Figura 30 - Amostra coletada da Areia da Praia de Ipanema/RJ (Costa, 2020).	73
Figura 31 – Amostra colocada na estufa com temperatura de 60 °C (Costa, 2020)	74
Figura 32 – Quarteamento da amostra (Costa, 2020)	75
Figura 33 - Granulometria da Areia da Praia de Ipanema (Costa, 2020).	76
Figura 34 - Imagens microscópicas da Areia da Praia de Ipanema (Costa, 2020).	80
Figura 35 - Execução do método “A” da norma ASTM-D4254-16 para determinação do índice de vazios máximo (Costa, 2020).	82
Figura 36 - Execução do método “B” da norma ASTM-D4254-16 para determinação do índice de vazios máximo (Costa, 2020).	83
Figura 37 - Execução do método “C” da norma ASTM-D4254-16 para determinação do índice de vazios máximo (Costa, 2020).	85
Figura 38 – Esquema da determinação do índice de vazios máximo pelo método da queda livre idealizado por Simões (2015) (Simões, 2015).	87
Figura 39 - Execução do método da queda livre idealizado por Simões (2015) para obtenção do índice de vazios máximo (Costa, 2020).	87
Figura 40 – Execução do método da pluviação sobre peneiras (Miura & Toki, 1982) para obtenção do índice de vazios mínimo e intermediários (Costa, 2020).	90
Figura 41 – Curvas “índice de vazios <i>versus</i> diâmetro da abertura do funil” obtidas pelo método de pluviação sobre peneiras por Costa (2020) e por Simões (2015), utilizando como molde o cilindro Proctor Normal (modificado de Costa, 2020).	92

Figura 42 - Execução do método baseado no <i>Geolabs in-house</i> (Blaker <i>et al.</i> , 2015), porém com uma série de modificações, para obtenção do índice de vazios mínimo (Costa, 2020).	94
Figura 43 – Execução do método NGI (Blaker <i>et al.</i> , 2015) para obtenção do índice de vazios mínimo (Costa, 2020).	96
Figura 44 – Equipamento de cisalhamento direto montado no LGMA da PUC-Rio	98
Figura 45 – Itens utilizados no equipamento de cisalhamento direto	99
Figura 46 – Dispositivo fixado na metade superior da caixa interna desenvolvido para impedir o adernamento do <i>top cap</i> .	101
Figura 47 – Quantificação do atrito estático e dinâmico entre o pistão e o rolamento linear; (a) aplicação de força à célula de carga sem o rolamento linear; (b) com o rolamento linear.	103
Figura 48 – Calibração dos transdutores de deslocamento.	106
Figura 49 – Curva de calibração do transdutor de deslocamento horizontal.	106
Figura 50 – Curva de calibração do transdutor de deslocamento vertical.	107
Figura 51 – Calibração do anel dinamométrico de 150 kgf.	109
Figura 52 – Curva de calibração do anel dinamométrico de 150 kgf.	109
Figura 53 – Curva de calibração do anel dinamométrico de 500 kgf.	110
Figura 54 – Método de pluviação sobre peneiras sobre a caixa de cisalhamento.	112
Figura 55 – Curva “índice de vazios <i>versus</i> diâmetro da abertura do funil” obtida pelo método de pluviação sobre peneiras na caixa de cisalhamento	115
Figura 56 – Montagem da caixa de cisalhamento com o posicionamento da placa ranhurada (e perfurada) inferior.	116
Figura 57 – Moldagem do corpo de prova na caixa de cisalhamento.	116
Figura 58 – (a) Arrasamento do topo do corpo de prova com placa retilínea; (b) Limpeza da superfície externa da caixa de cisalhamento.	117
Figura 59 – Posicionamento da placa ranhurada, do <i>top cap</i> e do pistão sobre o corpo de prova.	118

Figura 60 – Instalação do rolamento linear e posicionamento da bilha e do pendural.	118
Figura 61 – (a) Posicionamento dos transdutores de deslocamento; (b) Carregamento vertical do corpo de prova;	119
Figura 62 – Aproximação da caixa de cisalhamento ao anél dinamométrico.	120
Figura 63 – Afastamento vertical das partes superior e inferior da caixa de cisalhamento.	120
Figura 64 – Início e acompanhamento do cisalhamento do corpo de prova.	121
Figura 65 – Corpo de prova rompido.	121
Figura 66 – Curvas $\tau/\sigma \times \delta h$ e $\delta v \times \delta h$ dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito fofo.	127
Figura 67 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito fofo	128
Figura 68 - Curvas $\tau/\sigma \times \delta h$ e $\delta v \times \delta h$ dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio fofo.	131
Figura 69 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio fofo	132
Figura 70 - Curvas $\tau/\sigma \times \delta h$ e $\delta v \times \delta h$ dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 1	135
Figura 71 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 1	136
Figura 72 – Curvas $\tau/\sigma \times \delta h$ e $\delta v \times \delta h$ dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 2.	139
Figura 73 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 2.	140
Figura 74 - Curvas $\tau/\sigma \times \delta h$ e $\delta v \times \delta h$ dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio compacto.	143
Figura 75 – Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio compacto	144
Figura 76 - Curvas $\tau/\sigma \times \delta h$ e $\delta v \times \delta h$ dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito compacto.	147

Figura 77 – Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito compacto	148
Figura 78 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 25 kPa	152
Figura 79 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 50 kPa.	154
Figura 80 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 75 kPa	156
Figura 81 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 100 kPa.	158
Figura 82 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 150 kPa.	160
Figura 83 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 300 kPa.	162
Figura 84 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 500 kPa.	164
Figura 85 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 750 kPa.	166
Figura 86 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 1000 kPa.	168
Figura 87 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 1250 kPa.	170
Figura 88 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto moldados em cada domínio de compacidade relativa agrupados	173
Figura 89 - Curva “Índice de vazios crítico x tensão normal nominal crítica” da Areia da Praia de Ipanema obtida de ensaios de cisalhamento direto	177
Figura 90 – Curvas $\tau/\sigma \times \delta h$ e $\delta v \times \delta h$ do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova do domínio médio 2 sob tensão normal nominal de 500kPa.	179
Figura 91 – Curvas $\tau/\sigma \times \delta h$ e $\delta v \times \delta h$ do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova do domínio compacto sob tensão normal nominal de 75kPa.	180

Figura 92 – Curvas $\tau/\sigma$ x $\delta h$ e $\delta v$ x $\delta h$ do ensaio de cisalhamento direto do corpos de prova moldado no domínio muito compacto sob tensão normal nominal de 750 kPa.	181
Figura 93 – Determinação do ângulo de atrito no repouso da Areia da Praia de Ipanema (Martins, 2020).	188
Figura 94 – Coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito cinético. (a) deslizamento suave; (b) Stick-slip. (Lambe & Whitman, 1979)	190
Figura 95 – Curvas $\tau/\sigma$ x $\delta h$ dos ensaios de cisalhamento direto realizados em corpos de prova no domínio fofo (Simões, 2015)	191
Figura 96 – Curvas $\tau/\sigma$ x $\delta h$ e $\delta v$ x $\delta h$ do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito fofo, sob tensão normal nominal de 25 kPa	194
Figura 97 – Curvas $\tau/\sigma$ x $\delta h$ e $\delta v$ x $\delta h$ do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito fofo, sob tensão normal nominal de 1250 kPa	195
Figura 98 – Curvas $\tau/\sigma$ x $\delta h$ e $\delta v$ x $\delta h$ do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito compacto, sob tensão normal nominal de 25 kPa	196
Figura 99 – Curvas $\tau/\sigma$ x $\delta h$ e $\delta v$ x $\delta h$ do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito compacto, sob tensão normal nominal de 1250 kPa	197
Figura 100 – Curvas $\tau/\sigma$ x $\delta h$ e $\delta v$ x $\delta h$ do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito compacto, sob tensão normal nominal de 75 kPa	198
Figura 101 – Dispositivo utilizado para impedimento da rotação do <i>top cap</i>	199
Figura 102 – Corpo de prova ao fim do ensaio de cisalhamento direto. (a) Na presente pesquisa (b) Simões (2015)	200

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova fofos (Simões, 2015)	68
Tabela 2 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova med. Compactos (Simões, 2015)	69
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova compactos (Simões, 2015)	69
Tabela 4 – Densidade relativa dos grãos (Costa, 2020).	79
Tabela 5 – Índices de vazios obtidos pelo método “A” da norma ASTM-D4254-16 (Costa, 2020).	82
Tabela 6 - Índices de vazios obtidos pelo método “B” da norma ASTM-D4254-16 (Costa, 2020).	84
Tabela 7 - Índices de vazios obtidos pelo método “C” da ASTM-D4254-16 (Costa, 2020).	86
Tabela 8 - Índices de vazios obtidos pelo método da queda livre idealizado por Simões (2015) (Costa, 2020).	88
Tabela 9 - Índices de vazios obtidos pelo método da pluviação sobre peneiras (Costa, 2020).	91
Tabela 10 - Índices de vazios obtidos pelo método da pluviação sobre peneiras com molde cilíndrico de volume 124,75 cm <sup>3</sup> (Costa, 2020).	93
Tabela 11 - Índices de vazios obtidos pelo método baseado no <i>Geolabs in-house</i> , porém com uma série de modificações (Costa, 2020).	95
Tabela 12 - Índices de vazios obtidos pelo método NGI (Costa, 2020).	96
Tabela 13 – Tensões e forças verticais aplicadas aos corpos de prova durante os ensaios de cisalhamento direto.	100
Tabela 14 – Quantificação do atrito estático entre o pistão do <i>top cap</i> e o rolamento linear.	102
Tabela 15 – Quantificação do atrito dinâmico entre o pistão do <i>top cap</i> e o rolamento linear.	104
Tabela 16 – Características e funções dos instrumentos de medição.	105

Tabela 17 – Classificação da compacidade relativa (Lambe & Whitman, 1969)	110
Tabela 18 – Testes para obtenção dos corpos de prova nos seis domínios de compacidade relativa na caixa de cisalhamento.	113
Tabela 19 – Tabela resumo dos ensaios de cisalhamento direto.	123
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito fofo.	126
Tabela 21 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio fofo.	130
Tabela 22 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 1.	134
Tabela 23 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 2.	138
Tabela 24 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio compacto.	142
Tabela 25 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito compacto.	146
Tabela 26 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 25 kPa.	151
Tabela 27 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 50 kPa.	153
Tabela 28 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 75 kPa.	155
Tabela 29 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 100 kPa.	157
Tabela 30 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 150 kPa.	159
Tabela 31 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 300 kPa.	161
Tabela 32 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 500 kPa.	163
Tabela 33 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 750 kPa.	165



Tabela 34 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 1000 kPa	167
Tabela 35 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 1250 kPa	169
Tabela 36 – Coordenadas obtidas para a construção da curva “ $e_{cr} \times \sigma_n$ ”	176
Tabela 37 – Valores de $\phi'_{cv}$ e de $\tau_e/\sigma_n$ obtidos dos corpos de prova do domínio médio 2	183
Tabela 38 – Valores de $\phi'_{cv}$ e de $\tau_e/\sigma_n$ obtidos dos corpos de prova do domínio compacto	184
Tabela 39 – Valores de $\phi'_{cv}$ e de $\tau_e/\sigma_n$ obtidos dos corpos de prova do domínio muito compacto	185

# 1

## Introdução

### 1.1. Motivação da Pesquisa

Embora banhado apenas pelo Oceano Atlântico, o Brasil é o país/território com a 16ª maior extensão litoral do mundo, segundo a *Central Intelligence Agency* (CIA) dos Estados Unidos. Não obstante, são poucos os dados na literatura relacionados à caracterização geotécnica das areias das praias do litoral brasileiro. Provavelmente, é por esta razão que, em geral, as aulas de mecânica dos solos em nosso país são ilustradas por propriedades geotécnicas de areias internacionais.

Com a finalidade de suprir esta carência, um extenso programa de pesquisa que visa investigar as características geotécnicas das areias das praias do litoral do estado do Rio de Janeiro foi iniciado por Nunes (2014), que estudou a areia da praia de Itaipuaçu, e Simões (2015), que estudou a areia da praia de Ipanema. Motivado por Nunes (2014) e Simões (2015), o presente trabalho visa dar prosseguimento a este programa de pesquisa.

Simões (2015) realizou ensaios de caracterização completa, ensaios de cisalhamento direto e ensaios de compressão unidimensional em uma amostra da areia da praia de Ipanema. Com base nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto, Simões (2015) tentou obter a curva tensão vertical (normal) de adensamento crítica *versus* índice de vazios crítico para a areia da praia de Ipanema, análoga à curva tensão confinante de adensamento crítica *versus* índice de vazios crítico definida por Lee & Seed (1967) para ensaios triaxiais. Esta curva delimita a fronteira entre dois tipos de comportamento da areia quando cisalhada em condições drenadas, a saber: comportamento fofo, caracterizado pela areia apresentar deformação volumétrica específica ( $\epsilon_v$ ) de compressão na ocasião da ruptura e comportamento compacto, caracterizado pela areia apresentar deformação volumétrica específica ( $\epsilon_v$ ) de expansão na ocasião da ruptura. No caso do cisalhamento não drenado, a tendência de diminuição de volume na ruptura (comportamento fofo) traduz-se em geração de excesso de poropressão positivo, ao

passo que essa tendência de aumento de volume na ruptura (comportamento compacto) traduz-se em geração de excesso de poropressão negativo.

Todavia, tal curva não pôde ser obtida por Simões (2015) haja vista que o número de corpos de prova ensaiados com diferentes índices de vazios iniciais sob a mesma tensão vertical de adensamento aplicada foi insuficiente para cada uma das tensões verticais de adensamento. Assim, a presente pesquisa visa, em primeiro lugar, realizar um programa experimental de ensaios de cisalhamento direto mais completo que o realizado por Simões (2015), planejado para que seja possível a obtenção da curva tensão vertical de adensamento crítica *versus* índice de vazios crítico para a areia da praia de Ipanema, complementando a investigação realizada por Simões (2015).

Um outro problema ocorrido em alguns dos ensaios de cisalhamento direto realizados por Simões (2015), e que aliás é muito comum neste tipo de ensaio em geral, foi o adernamento do *top cap* durante a etapa de cisalhamento, o que, segundo Simões (2015), pode ter afetado alguns de seus resultados. Assim, o presente trabalho também visa testar a eficácia de um dispositivo implementado no equipamento de cisalhamento direto, idealizado para impedir o adernamento indesejado do *top cap*, avaliando também a influência da restrição do adernamento na qualidade dos resultados obtidos.

## **1.2. Objetivos**

Portanto, seguindo duas das sugestões para pesquisas futuras apresentadas por Simões (2015), os principais objetivos deste trabalho são:

- (1) realizar ensaios de cisalhamento direto em uma amostra da areia da praia de Ipanema sob diferentes combinações de índice de vazios inicial e tensão vertical de adensamento com a finalidade de obter a curva tensão vertical de adensamento crítica *versus* índice de vazios crítico, análoga à curva tensão confinante crítica *versus* índice de vazios crítico proposta por Lee & Seed (1967) com base em ensaios triaxiais;
- (2) executar os ensaios de cisalhamento direto implementando no equipamento um dispositivo que seja capaz de impedir o adernamento

indesejado do *top cap* durante o cisalhamento, avaliando a influência desta medida na qualidade dos resultados obtidos e

(3) avaliar a variação da resistência e do comportamento da areia em função da compacidade relativa e da tensão vertical de adensamento.

### 1.3. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos.

No capítulo 1, é feita uma breve introdução dos assuntos abordados na pesquisa, apresentando as motivações que levaram o autor pela escolha do tema e definindo claramente os principais objetivos deste trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão resumida dos principais tópicos teóricos julgados importantes para a compreensão do trabalho.

O capítulo 3 detalha o programa experimental realizado, descrevendo os equipamentos, os instrumentos de medição e as metodologias empregadas na calibração dos instrumentos e nos próprios ensaios de caracterização e de cisalhamento direto.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios de caracterização e dos ensaios de cisalhamento direto, comparando-os com aqueles obtidos por Simões (2015). Além disso, é determinada a curva que relaciona a tensão vertical de adensamento crítica e o índice de vazios crítico da areia da praia de Ipanema, avaliando a influência do índice de vazios inicial (compacidade relativa inicial) e da tensão vertical de adensamento no ângulo de atrito efetivo.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho, bem como sugestões para o prosseguimento da pesquisa.

## 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1. Resistência ao Cisalhamento

##### 2.1.1. Introdução à Resistência ao Cisalhamento dos Solos

O entendimento da resistência ao cisalhamento dos solos baseia-se fundamentalmente nos conceitos relacionados às leis básicas do atrito, enunciadas pela primeira vez por Leonardo da Vinci no fim do século XV e, após muito tempo esquecidas, redescobertas por Amontons em 1699 (ver Lambe & Whitman, 1979, pp. 62), e novamente enunciadas por Coulomb em 1785.

A primeira Lei do Atrito enuncia que a força tangencial (T) necessária para promover o deslocamento entre os dois corpos sólidos é proporcional à força normal (N) entre eles. A segunda Lei do Atrito enuncia que a força tangencial (T) necessária para promover o deslocamento entre dois corpos sólidos independe da área de contato entre eles. Desta forma, as Leis do Atrito podem ser traduzidas matematicamente pela Equação 1.

$$T = f \cdot N \quad (\text{Eq. 1})$$

, onde:

f : coeficiente de proporcionalidade chamado de coeficiente de atrito.

Segundo Lambe & Whitman (1979), a explicação básica sobre o processo de atrito (fricção) entre dois corpos sólidos em contato e que deslizam um sobre o outro provém, inicialmente, de uma visão microscópica do atrito. Bowden & Tabor (1950) ressaltam que, em uma escala submicroscópica, mesmo as superfícies aparentemente mais bem polidas são, na realidade, rugosas (ver Lambe & Whitman, 1979). Consequentemente, dois corpos sólidos somente estarão em contato através

dos pontos altos (cumes) de algumas irregularidades de suas superfícies, conforme ilustrado na Figura 1.

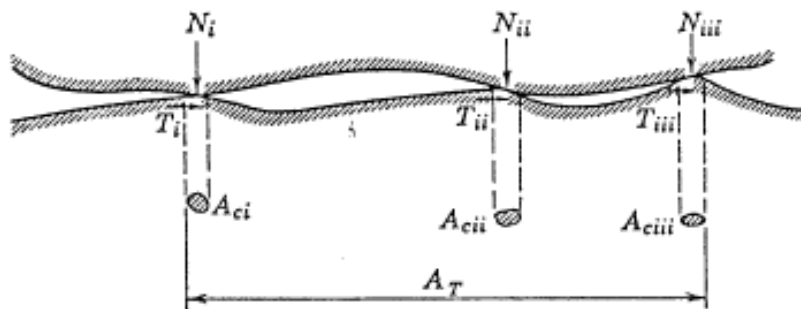


Figura 1 - Representação microscópica do atrito entre dois corpos sólidos (Lambe & Whitman, 1979)

Sendo a área de contato real ( $A_c$ ) entre dois corpos sólidos apenas uma pequeníssima fração da área de contato aparente ( $A_T$ ), as tensões normais nos pontos de contato são extremamente elevadas, ainda que a força normal total ( $N$ ) entre os corpos seja baixa. Segundo a teoria de Bowden & Tabor (1950), estas elevadas tensões normais levam ao escoamento do material nesses pontos de contato, formando uma ligação química, uma espécie de “solda fria”, nesses pontos. A área de contato real entre os corpos sólidos ( $A_c$ ), nesse caso, é dada pela relação entre a força normal ( $N$ ) entre eles e a tensão de escoamento ( $q_u$ ) do material, isto é:

$$A_c = \frac{N}{q_u} \quad (\text{Eq. 2})$$

, onde (ver Figura 1):

$$N = \sum N_i$$

$$A_c = \sum A_{ci}$$

Uma vez que  $q_u$  é uma propriedade dos materiais em contato e possui valor constante, um aumento na força normal total ( $N$ ) entre os corpos irá resultar em um aumento proporcional na área de contato real ( $A_c$ ) entre eles. A conclusão que se chega é que a área de contato real ( $A_c$ ) é diretamente proporcional à força normal total ( $N$ ).

Admitindo-se que a resistência ao cisalhamento por unidade de área ( $s$ ) nos pontos de contato, ligados pela “solda fria”, seja uma propriedade dos materiais em contato, então a força externa tangencial ( $T$ ) necessária para romper os contatos vale:

$$T = s A_c \quad (\text{Eq. 3})$$

, onde (ver Figura 1):

$$T = \sum T_i$$

$$A_c = \sum A_{ci}$$

Disto conclui-se que a força tangencial ( $T$ ) necessária para promover o deslizamento entre os corpos sólidos é diretamente proporcional à área de contato real ( $A_c$ ) entre eles.

Substituindo a Equação 2 na Equação 3, tem-se que:

$$T = \frac{s}{q_u} N \quad (\text{Eq. 4})$$

Desta forma, conclui-se que a força tangencial ( $T$ ) necessária para promover o deslizamento entre os corpos sólidos é diretamente proporcional à força normal ( $N$ ), conforme enuncia a primeira Lei do Atrito.

Comparando ainda a Equação 4 com a Equação 1, tem-se que o coeficiente de atrito ( $f$ ) é dado por:

$$f = \frac{s}{q_u} \quad (\text{Eq. 5})$$

, sendo que  $f$  é uma propriedade dos materiais em contato.

Taylor (1948), por sua vez, apresenta uma abordagem macroscópica do atrito entre dois corpos considerando blocos sobre superfícies planas em diferentes situações. Ao ser posicionado um bloco sobre uma superfície horizontal plana, por

exemplo, a força  $P$  vertical agindo sobre o corpo, incluindo o seu peso próprio, provoca uma força de reação normal ( $N$ ) da superfície horizontal no bloco (Figura 2). A ação da força normal ( $N$ ) possibilita a existência de uma força de atrito ( $F_{at}$ ), que não entra em ação até que esta seja solicitada para resistir a uma força horizontal ( $T$ ) aplicada (força solicitante). A força de atrito máxima disponível ( $F_{at}$ ) é expressa pela seguinte Equação:

$$F_{at} = N \cdot f = N \cdot \tan \phi \quad (\text{Eq. 6})$$

, onde  $\phi$  e  $f$  são características dos materiais em contato, conhecidos como ângulo de atrito e coeficiente de atrito, respectivamente.

Para a maioria dos materiais,  $f$  e  $\phi$  são aproximadamente constantes e independem do valor de  $N$ .

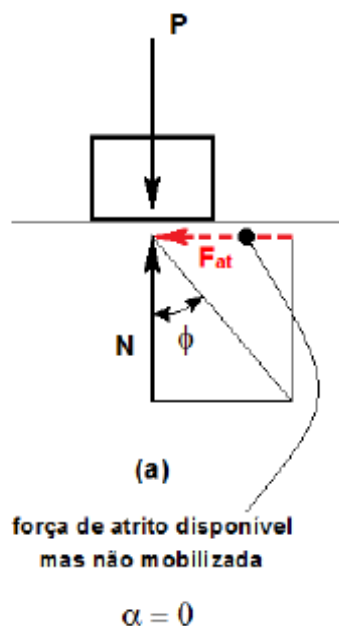


Figura 2 - Representação macroscópica do contato entre um bloco e uma superfície horizontal na qual nenhuma força  $T$  é aplicada ao bloco (adaptado de Taylor, 1948)

Ao ser aplicada uma pequena força horizontal ( $T'$ ) ao bloco (Figura 3), a força resultante ( $R'$ ) das forças  $T'$  e  $P$  faz um ângulo  $\alpha$  com a direção normal à interface entre o corpo e a superfície horizontal. Este ângulo é chamado de ângulo de obliquidade da resultante das forças  $T'$  e  $P$  que agem sobre o bloco. O ângulo  $\alpha$



depende apenas do sistema de forças, não dependendo das propriedades dos materiais em contato.

Com o objetivo de impedir a movimentação do bloco provocada pela ação da força  $T'$ , uma parcela da força de atrito ( $F_{at}$ ) disponível é mobilizada e a força resultante da parcela mobilizada da força  $F_{at}$  e da força  $N$  faz um ângulo  $\phi_{mob} = \alpha$  com a direção normal à interface entre o corpo e a superfície horizontal, chamado de ângulo de atrito mobilizado. Como  $T' < F_{at}$  e  $\alpha < \phi$ , então não há deslizamento do bloco. Esta situação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$T' = N \cdot \tan \phi_{mob} \quad (\text{Eq. 7})$$

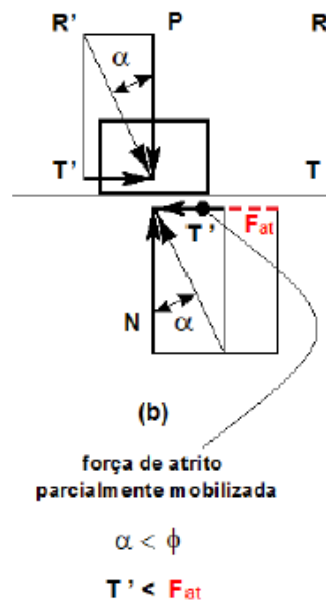


Figura 3 - Representação macroscópica do contato entre um bloco e uma superfície horizontal na qual uma pequena força  $T'$  ( $T' < F_{at}$ ) é aplicada (adaptado de Taylor, 1948)

Quando se aplica uma força horizontal  $T$  igual à força de atrito disponível ( $F_{at}$ ), toda a força de atrito disponível ( $F_{at}$ ) é solicitada para resistir à força  $T$  aplicada e, portanto,  $\alpha = \phi$ , e o corpo encontra-se na iminência de deslizar sobre a superfície (Figura 4). Neste caso:

$$T = F_{at} = N \tan \phi \quad (\text{Eq. 8})$$

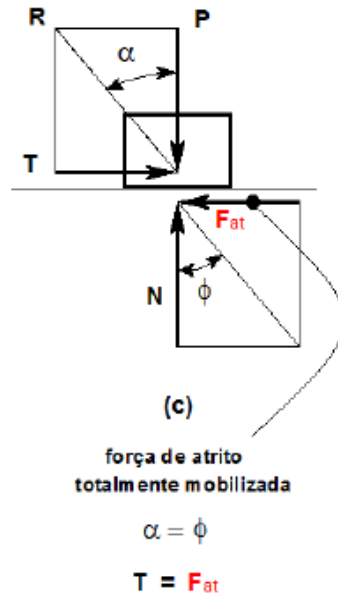


Figura 4 - Representação macroscópica do contato entre um bloco e uma superfície horizontal na qual toda a força de atrito  $F_{at}$  disponível é solicitada (adaptado de Taylor, 1948)

Na Equação 8, dividindo as forças pela área de contato entre o bloco e a superfície, tem-se que:

$$\frac{T}{A} = \frac{F_{at}}{A} = \frac{N}{A} \tan \phi \quad (\text{Eq. 9})$$

Considerando  $s = \frac{F_{at}}{A}$  como a resistência ao cisalhamento entre o corpo e a superfície horizontal, e  $\sigma = \frac{N}{A}$ , a tensão normal média na superfície aparente de contato entre o bloco e a superfície horizontal, a expressão matemática que melhor representa a situação de iminência do deslizamento do bloco sobre a superfície fica então:

$$\tau = s = \sigma \cdot \tan \phi \quad (\text{Eq. 10})$$

, onde:

$\tau$ : tensão cisalhante média aplicada entre o bloco e a superfície horizontal;

$s$ : resistência ao cisalhamento entre o bloco e a superfície horizontal;

$\sigma$ : tensão normal média atuante entre o bloco e a superfície horizontal.

Segundo Taylor (1948), a resistência ao deslizamento de uma massa de solo ao longo de um plano em seu interior é análoga à resistência ao cisalhamento entre dois corpos sólidos, isto é, é função da tensão normal existente no plano e do ângulo de atrito. No caso dos solos, este ângulo é chamado de ângulo de atrito interno.

Embora haja uma grande semelhança entre a análise da resistência ao cisalhamento entre dois corpos sólidos e a análise da resistência ao cisalhamento dos solos, esta possui uma maior complexidade, exigindo um conhecimento mais aprofundado do comportamento dos solos frente às solicitações. Nas areias, por exemplo, a resistência ao cisalhamento é governada basicamente por duas parcelas, uma referente ao atrito despertado pelo deslizamento e rolamento entre os grãos, e uma referente ao mecanismo conhecido pela expressão *interlocking*, que corresponde ao entrosamento entre as partículas do solo, função do índice de vazios e da tensão normal efetiva (Taylor, 1948). Este aspecto será explorado mais à frente nesta dissertação.

### **2.1.2. Estado de Tensão no Solo**

Segundo Lambe & Whitman (1979), devido à enorme dificuldade em observar e dimensionar as forças em cada ponto de contato entre as partículas do solo, na quase totalidade das vezes, a análise de tensões em mecânica dos solos é procedida utilizando-se o mesmo conceito de tensão da mecânica do contínuo, na qual a tensão é definida simplesmente como força por unidade de área. Essas tensões são denominadas de “tensões macroscópicas” por Lambe & Whitman (1979). Assim, raramente são avaliadas as tensões nos contatos grão a grão, denominadas por “tensões de contato” por estes mesmos autores.

Sendo assim, em mecânica dos solos, quando se analisa o estado de tensões em um “ponto” numa massa de solo, não se deve entender o termo “ponto” como uma entidade matemática abstrata de dimensões tão pequenas quanto se queira. Deve-se interpretá-lo como um elemento cúbico muito pequeno, porém de dimensões suficientes para encerrar uma pequena massa de solo que possua um peso específico equivalente ao peso específico da massa de solo no qual o ponto está inserido (ver Atkinson & Bransby, 1978).

A Figura 5, extraída de Lambe & Whitman (1979), ilustra um elemento A no interior de uma massa de solo seco a uma profundidade  $z$  da superfície do terreno, bem como as forças que atuam nas faces horizontal e vertical deste elemento. Neste caso, a análise é bidimensional. A força que atua em cada uma das faces é decomposta em uma componente normal e uma componente tangencial ao plano em que atua. A força  $N_v$  é a força normal que atua no plano horizontal, a força  $T_h$  é a força tangencial que atua no plano horizontal, a força  $N_h$  é a força normal que atua no plano vertical e força  $T_v$  é a força tangencial que atua no plano vertical. Sendo o conceito de tensão definido pela força dividida pela área em que ela atua, e sabendo-se que as arestas do cubo que representa o elemento A possuem dimensão “a”, então as tensões normais e cisalhantes, verticais e horizontais, que atuam no elemento A são calculadas pelas seguintes Equações:

$$\sigma_v = \frac{N_v}{a^2} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\sigma_h = \frac{N_h}{a^2} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\tau_v = \frac{T_v}{a^2} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\tau_h = \frac{T_h}{a^2} \quad (\text{Eq. 14})$$

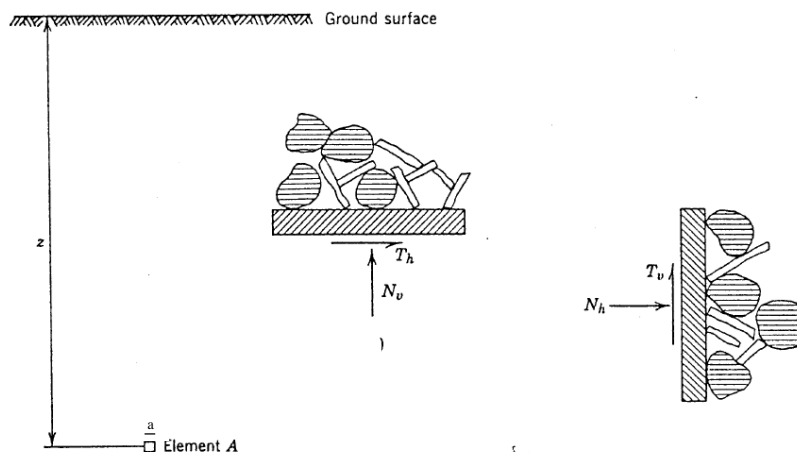


Figura 5 - Representação das tensões atuantes nos planos vertical e horizontal em um elemento no interior de uma massa de solo (adaptado - Lambe e Whitman, 1979)

Sendo assim, todo e qualquer ponto no interior de uma massa de solo está sujeito a um conjunto de forças que agem nas faces do cubo que representa aquele ponto. Em uma análise tridimensional mais geral, as direções normais às faces do cubo são referenciadas a um sistema cartesiano  $xyz$  pré-definido. Tais forças

divididas pelas áreas das faces do cubo resultam nas tensões que atuam nessas faces, conforme ilustrado na Figura 6. Assim como na análise bidimensional, a tensão em cada face pode ser decomposta em tensões normal e cisalhantes, neste caso, segundo as três direções ortogonais. Estas tensões definem o estado de tensões do solo naquele ponto e são originadas pelos esforços devido ao peso próprio do material, como também a esforços externos eventualmente atuantes na massa de solo. Uma vez definido o estado tensões em um determinado ponto da massa de solo, demonstra-se que é possível calcular as tensões normal e cisalhantes segundo qualquer plano, naquele ponto.

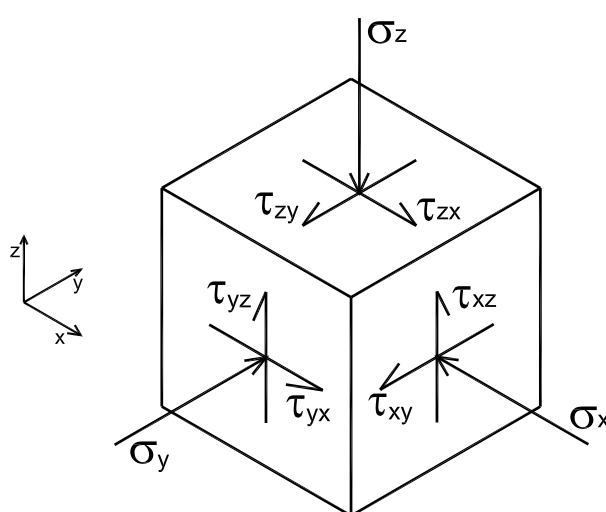


Figura 6 - Representação das tensões atuantes nas faces de um elemento cúbico que representa um ponto em uma massa de solo, segundo o sistema de referência cartesiano x,y,z

Na engenharia geotécnica, a grande importância em se conhecer as tensões normal e cisalhantes segundo vários planos, em diferentes pontos na massa de solo deve-se, em primeiro lugar, à análise de ruptura, permitindo identificar os planos do solo mais susceptíveis à ruptura, por exemplo, e, em segundo lugar, à análise de deformações da massa de solo.

De uma forma geral, nos diferentes planos em um ponto de uma massa de solo, atuam tanto tensões normais quanto tensões cisalhantes. Porém, na mecânica dos sólidos, demonstra-se a existência de três planos ortogonais entre si nos quais as tensões cisalhantes são nulas. Estes planos são chamados de planos principais de tensões e as tensões normais que neles atuam são chamadas de tensões principais ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ ), conforme ilustrado na Figura 7, sendo que:  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . A tensão

$\sigma_1$  é chamada de tensão principal maior,  $\sigma_2$  é chamada de tensão principal intermediária e  $\sigma_3$  é chamada de tensão principal menor. A tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) atua na direção principal “1” que é normal ao plano principal “1”, e assim por diante para as demais tensões principais.

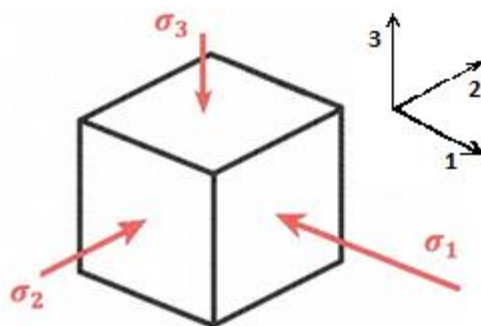


Figura 7 - Tensões principais em um ponto de uma massa de solo

De posse das tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , o estado de tensões no ponto fica definido, podendo-se determinar as tensões normal ( $\sigma$ ) e cisalhante ( $\tau$ ) segundo qualquer plano, naquele ponto. Isso pode ser feito a partir de representações gráficas chamadas de círculos de Mohr (ver Figura 8), que são traçados em um sistema de coordenadas onde o eixo das abscissas representa as tensões normais ( $\sigma$ ) e o eixo das ordenadas representa as tensões cisalhantes ( $\tau$ ). Na Figura 8, o círculo de Mohr com centro  $O_3$ , na coordenada  $[(\sigma_1 + \sigma_2)/2 ; 0]$ , representa o lugar geométrico dos pares ordenados ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) que atuam nos planos paralelos à direção principal “3”, naquele ponto, sendo que cada par ordenado ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) são as tensões que atuam em um plano. O mesmo raciocínio vale para os demais círculos. A região hachurada entre os três círculos de Mohr, chamada de lúnula de tensões, compreende o lugar geométrico ao qual pertencem todos os pares ordenados ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) que atuam em todos os planos, naquele ponto. A obtenção de  $\sigma$  e  $\tau$  que atua em um dado plano pode ser feita por um procedimento gráfico, descrito por exemplo em Villaça & Taborda (2000), bastando, para isso, que sejam conhecidos os cossenos diretores que o vetor normal ao plano considerado faz com as direções principais “1”, “2” e “3”. Para mais detalhes ver Villaça & Taborda (2000).

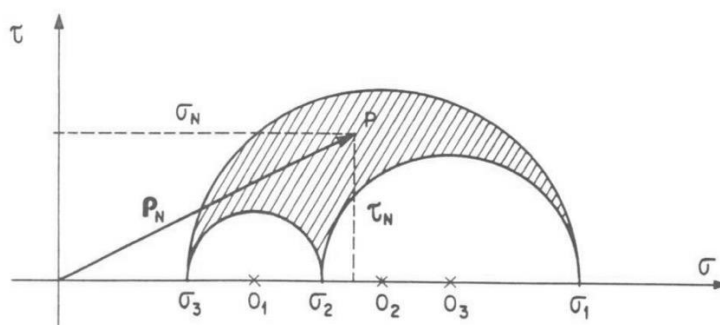


Figura 8 – Representação do Círculo de Mohr (Villaça & Taborda, 2000)

Por ser o solo, em geral, um material trifásico, composto por sólidos (grãos), água e ar, que preenchem os vazios entre os grãos, os esforços numa massa de solo podem ser sentidos tanto pelo arcabouço sólido (grãos), quanto pela água que preenche os vazios. Enquanto no caso de solos secos, até agora mencionado, a totalidade dos esforços são transmitidos pelo arcabouço sólido, em solos saturados, as tensões normais são transmitidas tanto pelo arcabouço sólido quanto pela água que preenche os vazios. Já as tensões cisalhantes continuam sendo transmitidas exclusivamente pelo arcabouço sólido, uma vez que a água não resiste a tensões cisalhantes e, portanto, não as transmite.

O papel desempenhado pela água que preenche os vazios no comportamento mecânico de um solo saturado só foi devidamente esclarecido quando Terzaghi (1936) enunciou, pela primeira vez em língua inglesa, o Princípio das Tensões Efetivas.

Atkinson & Bransby (1978) propuseram a divisão do Princípio das Tensões Efetivas em duas partes, traduzidas a seguir. A primeira parte define tensão efetiva, ao passo que a segunda parte define o papel da tensão efetiva no comportamento dos solos.

Primeira parte:

*“As tensões em qualquer ponto em uma massa de solo podem ser computadas a partir das tensões principais totais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  que atuam neste ponto. Se os vazios do solo estiverem preenchidos com água sob uma pressão  $u$ , as tensões principais consistem de duas parcelas. Uma parcela de valor  $u$  que age na água e na parte sólida, em todas as direções, com igual magnitude. Essa parcela é denominada pressão neutra (modernamente poro-pressão). As parcelas remanescentes  $\sigma'_1 = \sigma_1$*

-  $u$ ,  $\sigma'_2 = \sigma_2 - u$  e  $\sigma'_3 = \sigma_3 - u$  são “sentidas” exclusivamente pelo esqueleto sólido do solo. Estas parcelas das tensões principais totais são denominadas tensões principais efetivas.”

A equação das tensões efetivas, segundo o Princípio das Tensões Efetivas, é, portanto:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (\text{Eq. 15})$$

Esta equação é válida para todas as direções, já que a água não resiste ao cisalhamento.

Segunda parte:

*“Todos os efeitos mensuráveis oriundos da variação do estado de tensões, tais como compressão, distorção e variação da resistência ao cisalhamento, são devidos exclusivamente à variação do estado de tensões efetivas.”*

De acordo com a segunda parte do Princípio das Tensões Efetivas fica claro que são as tensões efetivas que comandam o comportamento dos solos, e não as tensões totais.

Assim, de acordo com a Equação 15, uma vez conhecidos os estados de tensões totais em um dado ponto representados pelos círculos de Mohr das tensões totais (Figura 9) e o valor da poropressão ( $u$ ) no ponto, os círculos de Mohr das tensões efetivas podem ser determinados. Os círculos de Mohr das tensões efetivas possuem as mesmas dimensões dos círculos de Mohr das tensões totais, já que a água não resiste ao cisalhamento, estando aqueles deslocados horizontalmente em relação a estes pelo valor da poropressão ( $u$ ). Se a poropressão possui valor positivo, os círculos de Mohr das tensões efetivas estão à esquerda dos círculos de Mohr das tensões totais. Se, ao contrário, a poropressão possui valor negativo, o que significa sucção, os círculos de Mohr das tensões efetivas ficam à direita dos círculos de Mohr das tensões totais.



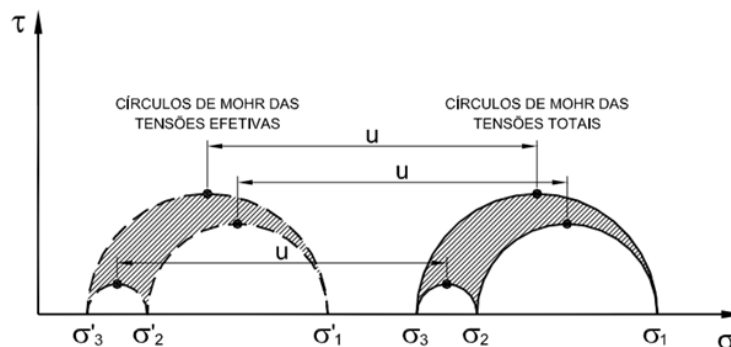


Figura 9 - Círculos de Mohr de tensões totais e efetivas

### 2.1.3. Critério de Ruptura de Solos

Na engenharia de solos, é fundamental conhecer antecipadamente a capacidade de suporte do solo frente às cargas que lhe serão impostas pela obra a ser executada, isto é, se o solo sofre ruptura ou não, bem como prever o comportamento tensão-deformação do solo frente às solicitações que nele podem atuar.

Para a análise quanto à ruptura, é necessário, em primeiro lugar, definir um critério de ruptura a ser utilizado. Segundo Pinto (2006), critérios de ruptura são formulações que procuram refletir as condições em que ocorre a ruptura do material. Existem critérios que estabelecem máximas tensões de tração, de compressão, de cisalhamento, condições de máximas deformações, ou ainda os que consideram a energia de deformação.

Ainda Segundo Pinto (2006), a ruptura dos solos é quase sempre um fenômeno de cisalhamento, que acontece, por exemplo, quando uma sapata de fundação é carregada até a ruptura ou quando ocorre um escorregamento de um talude. É por esta razão que a análise do estado de tensões que provoca a ruptura dos solos é um estudo da resistência ao cisalhamento dos solos.

O critério de ruptura que melhor representa o comportamento dos solos é produto de uma combinação do critério de ruptura de Mohr com o critério de ruptura de Coulomb, conhecido como critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

O critério proposto por Mohr define uma curva no espaço  $\sigma$ - $\tau$  que é traçada tangenciando círculos de Mohr representativos dos estados de tensões correspondentes a rupturas observadas experimentalmente de um dado material (Figura 10). A ruptura é definida como o pico na curva tensão-deformação do

material. Essa curva definida no espaço  $\sigma$ - $\tau$  é chamada de envoltória de ruptura de Mohr. Uma vez definida a envoltória, o critério estabelece que não há ruptura enquanto o círculo de Mohr representativo do estado de tensões do material encontrar-se no interior da região delimitada pela envoltória, isto é, sem tocá-la. Na Figura 10 por exemplo, não há ruptura para o estado de tensões A, porém há ruptura para o estado de tensões B. O ponto que o círculo de Mohr definido por  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  toca a envoltória define as tensões normal e cisalhante no plano de ruptura, na ruptura e, por esta razão, são denotados por  $\sigma_{ff}$  e  $\tau_{ff}$ , respectivamente, sendo “f” do inglês “failure”. A resistência ao cisalhamento (s) fica definida, portanto, como a tensão cisalhante no plano de ruptura, na ruptura ( $\tau_{ff}$ ).

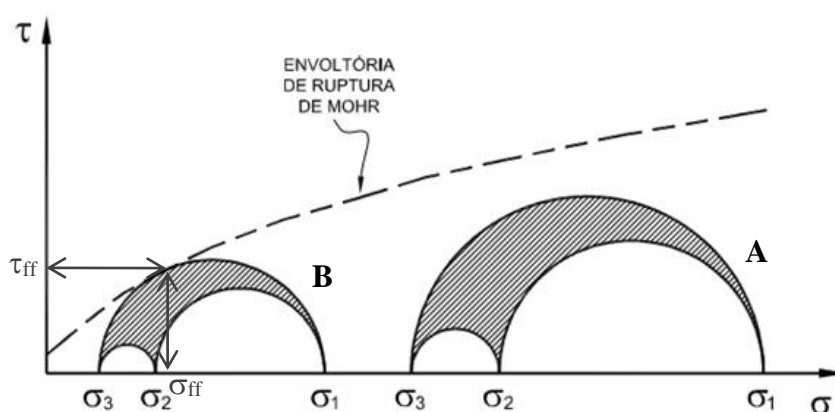


Figura 10 - Representação do critério de ruptura de Mohr

A envoltória de Mohr é, portanto, descrita pela seguinte equação:

$$s = \tau_{ff} = f(\sigma_{ff}) \quad (\text{Eq. 16})$$

, onde:

$f$  é a função que melhor representa a envoltória traçada com base em dados experimentais.

O critério de ruptura de Coulomb, por sua vez, enuncia que a condição para a qual ocorre a ruptura de um material é resultado das Leis de atrito de Coulomb, discutidas no item 2.1.1 desta dissertação. Assim, a resistência ao cisalhamento ( $s$ ) varia com a tensão normal ( $\sigma$ ) ao plano de ruptura, na ruptura, sendo função do ângulo de atrito ( $\phi$ ) e, eventualmente, de um intercepto coesivo ou de uma coesão

verdadeira (c), de acordo com a Equação 17. O intercepto coesivo é simplesmente produto de uma extrapolação linear de dados obtidos experimentalmente e, portanto, não possui significado físico. Já a coesão verdadeira é oriunda de cimentação entre as partículas, comum, por exemplo, em solos residuais jovens.

$$s = \tau_{ff} = c + \sigma_{ff} \cdot \tan \phi \quad (\text{Eq. 17})$$

, onde:

s: resistência ao cisalhamento

$\tau_{ff}$ : tensão cisalhante atuante no plano de ruptura, na ruptura.

$\sigma_{ff}$ : tensão normal atuante no plano de ruptura, na ruptura.

$\phi$ : ângulo de atrito

c: intercepto de coesão ou coesão verdadeira

Diante disso, Mohr combinou o critério de ruptura proposto por Coulomb com o conceito de envoltória de ruptura que leva seu nome passando a ser conhecido como critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Nele, a envoltória de ruptura de Mohr é representada por uma reta que melhor se ajusta à curva que tangencia os círculos de Mohr representativos dos estados de tensões na ruptura.

Como no caso dos solos quem comanda a resistência ao cisalhamento são as tensões efetivas e não as tensões totais, a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb deve tangenciar os círculos de Mohr das tensões efetivas na ruptura e não os círculos de Mohr das tensões totais, conforme ilustrado na Figura 11. Assim, a equação da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb deve ser escrita em termos de tensões efetivas, isto é:

$$s = \tau_{ff} = c' + \sigma'_{ff} \cdot \tan \phi' \quad (\text{Eq. 18})$$

, onde:

s: resistência ao cisalhamento

$\tau_{ff}$ : tensão cisalhante atuante no plano de ruptura, na ruptura.

$\sigma'_{ff}$ : tensão normal efetiva atuante no plano de ruptura, na ruptura.

$\phi'$ : ângulo de atrito efetivo

$c'$ : intercepto de coesão efetiva ou coesão efetiva

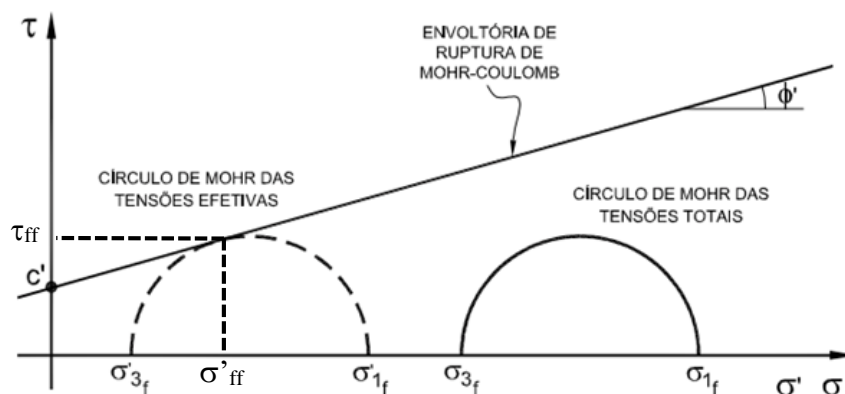


Figura 11 - Representação do critério de ruptura de Mohr-Coulomb

Observa-se da Figura 11 que, ao considerar que a ruptura ocorre quando o círculo de Mohr definido por  $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$  toca a envoltória, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb assume que a ruptura ocorre em um plano paralelo a direção da tensão principal intermediária efetiva ( $\sigma'_2$ ), além de assumir que a magnitude de  $\sigma'_2$  não influencia na resistência ao cisalhamento ( $s$ ).

No caso das areias secas ou saturadas, a coesão e o intercepto coesivo são, em geral, nulos para as condições em que se encontram usualmente na engenharia e, portanto, a equação da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb reduz-se à Equação 19, passando a ser representada por uma reta que passa pela origem. Além disto, por se tratar de um material extremamente permeável, para a grande maioria das solicitações de engenharia a que uma areia saturada é submetida, o excesso de poropressão gerado é dissipado instantaneamente, de modo a não ser nem se quer detectável. Por esta razão, costuma-se dizer que não há geração de excesso de poropressão ( $\Delta u=0$ ).

$$s = \sigma' \cdot \tan \phi' \quad (\text{Eq. 19})$$

## **2.1.4. Comportamento Tensão-deformação de Areias Submetidas ao Cisalhamento Drenado**

### **2.1.4.1. Considerações Iniciais**

Lambe & Whitman (1979, capítulo 11) discutem os diversos fatores que determinam o comportamento de uma areia submetida ao cisalhamento drenado, a saber, curva tensão-deformação, resistência ao cisalhamento e variação de volume, dividindo-os basicamente em dois grupos. O primeiro grupo inclui aqueles fatores que afetam o comportamento de uma dada areia, dentre os quais se destacam como os mais importantes o índice de vazios (ou compacidade relativa) no início do cisalhamento e a tensão de confinamento, para o caso de ensaio triaxial, que, no caso do cisalhamento direto, seria a tensão normal (vertical) nominal. Já o segundo grupo inclui aqueles fatores responsáveis por fazer com que a resistência ao cisalhamento de uma dada areia seja diferente da resistência ao cisalhamento de uma outra areia, ainda que moldadas com a mesma compacidade relativa e submetidas à mesma tensão de confinamento, tais como: tamanho e forma dos grãos, distribuição granulométrica, composição mineralógica e etc.

Em relação aos dois principais fatores do primeiro grupo, sabe-se, por exemplo, que corpos de prova de uma mesma areia moldados com diferentes índices de vazios irão apresentar diferentes comportamentos tensão-deformação quando submetidos a ensaios triaxiais drenados convencionais de compressão (CIDc), ainda que todos sejam submetidos a mesma tensão de confinamento. Da mesma forma, corpos de prova de uma mesma areia moldados todos com o mesmo índice de vazios irão apresentar comportamentos tensão-deformação diferentes, se submetidos a diferentes tensões de confinamento.

Segundo Lee & Seed (1967), as primeiras demonstrações experimentais de variação de volume de solos submetidos a deformações cisalhantes foram feitas por Reynolds (1885), que mostrou que areias compactas dilatavam quando cisalhadas. Ainda segundo Lee & Seed (1967), Casagrande (1940) foi um dos precursores no estudo tensão-deformação-resistência de areias, demonstrando a dependência do ângulo de atrito de uma areia em relação ao seu índice de vazios no início do cisalhamento e às variações de volume durante o cisalhamento. Casagrande (1940) mostrou que enquanto areias compactas dilatavam quando cisalhadas e exibiam um ângulo de atrito elevado, areias fofas contraíam durante o cisalhamento e

desenvolviam um ângulo de atrito muito menor. Casagrande (1940) definiu um “índice de vazios crítico” para descrever um estado particular de compacidade relativa sob a qual uma dada areia não apresenta variação de volume quando cisalhada de forma drenada, além de ter demonstrado que o valor do índice de vazios crítico diminuía com o aumento da tensão confinante aplicada.

É verdade que, de uma forma geral, areias fofas tendem a apresentar redução de volume e areias compactas tendem a apresentar aumento de volume quando cisalhadas de forma drenada. Todavia, Lee & Seed (1967) mostraram que mesmo uma areia compacta pode apresentar redução de volume desde que cisalhada sob elevadas tensões de confinamento, ao passo que uma areia fofa pode apresentar aumento de volume quando cisalhada sob tensões de confinamento muito baixas, conforme será mostrado mais adiante. Por esta razão, o autor desta dissertação preferiu adotar a seguinte classificação para descrever o comportamento das areias quando submetidas ao cisalhamento drenado: comportamento do tipo contráctil e comportamento do tipo dilatante.

#### **2.1.4.2. Comportamento do tipo contráctil**

A Figura 12, apresentada por Pinto (2006), ilustra resultados típicos de comportamento do tipo contráctil observados em ensaios triaxiais do tipo adensado hidrostaticamente (ou isotropicamente) e cisalhado de forma drenada por compressão axial (CIDc) de dois corpos de prova de uma mesma areia, sendo um submetido a uma tensão confinante ( $\sigma_3$ ) igual 1 u.t. (unidade de tensão) e outro submetido a uma tensão confinante ( $\sigma_3$ ) igual a 2 u.t.. Na Figura 12,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_v$  são as deformações específicas axial e volumétrica do corpo de prova, respectivamente.

No caso de areias com comportamento do tipo contráctil submetidas a ensaios triaxiais do tipo CIDc, a tensão desviadora ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) aumenta gradualmente à medida que as deformações axiais aumentam durante a fase do carregamento axial (cisalhamento), até atingir a resistência do material, conforme descrito por Pinto (2006) e ilustrado na Figura 12. Neste tipo de comportamento, a ruptura ocorre para valores de deformações específicas axiais elevados, da ordem de 6 % a 8 % segundo Pinto (2006). Lembra-se aqui que esse tipo de comportamento tensão-deformação é definido como comportamento do tipo dúctil segundo a Resistência dos Materiais.

Pinto (2006) chama a atenção ainda para o fato de que ensaios realizados com tensões de confinamento diferentes apresentam curvas tensão-deformação geometricamente semelhantes (ver Figura 12), sendo a resistência ao cisalhamento proporcional à tensão confinante aplicada, o que faz com que a envoltória de resistência seja reta e passe pela origem.

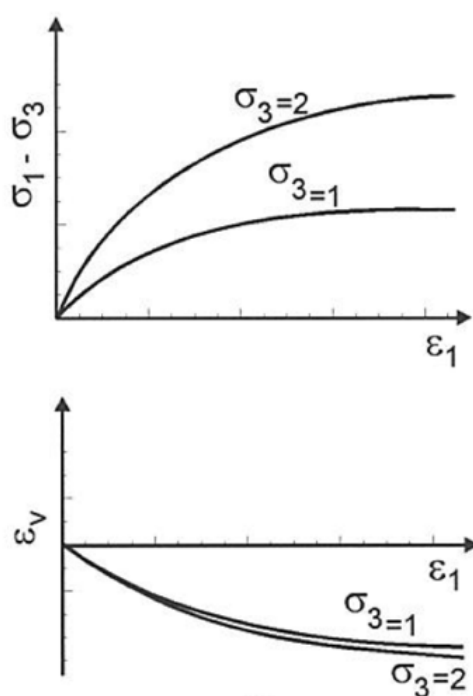


Figura 12 - Curvas típicas tensão desviadora x deformação específica axial e de deformação específica volumétrica x deformação específica axial para corpos de prova de areia com comportamento contrátil (modificado de Pinto, 2006).

Quanto à variação de volume durante o cisalhamento, com o aumento das deformações específicas axiais, os corpos de prova de areia com comportamento do tipo contrátil apresentam redução de volume durante todo o cisalhamento, sendo que, para tensões de confinamento maiores, as diminuições de volume são um pouco maiores (Pinto, 2006).

#### 2.1.4.3. Comportamento do tipo dilatante

A Figura 13, também apresentada por Pinto (2006), ilustra resultados típicos de comportamento do tipo dilatante observados em ensaios triaxiais do tipo CIDc de dois corpos de prova de uma mesma areia, sendo um submetido a uma tensão

confinante ( $\sigma_3$ ) igual a 1 u.t. (unidade de tensão) e outro submetido a uma tensão confinante ( $\sigma_3$ ) igual a 2 u.t..

No caso de corpos de prova de areia com comportamento do tipo dilatante submetidos a ensaios triaxiais do tipo CIDc, durante a fase do carregamento axial (cisalhamento), a taxa de crescimento da tensão desviadora ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) em relação à deformação específica axial é mais elevada do que no caso do comportamento contráctil. Consequentemente, a tensão desviadora atinge um valor máximo, que corresponde à resistência de pico, para um valor de deformação específica axial mais baixo do que no caso do comportamento contráctil, conforme descrito por Pinto (2006) e ilustrado na Figura 13. Após atingir a resistência ao cisalhamento de pico, o aumento da deformação específica axial do corpo de prova tende a provocar uma redução lenta da tensão desviadora até que esta estabiliza-se na chamada resistência residual (Pinto, 2006). Lembra-se aqui que esse tipo de comportamento tensão-deformação é definido como comportamento do tipo frágil segundo a Resistência dos Materiais.

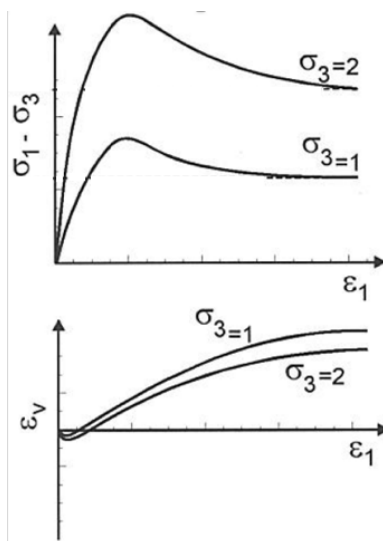


Figura 13 - Curvas típicas tensão desviadora x deformação específica axial e deformação específica volumétrica x deformação específica axial para corpos de prova de areia com comportamento dilatante (modificado de Pinto, 2006).

Pinto (2006) também chama a atenção para o fato de tanto as resistências ao cisalhamento de pico como as resistências ao cisalhamento residuais serem, em uma primeira aproximação, proporcionais às tensões de confinamento. Isso faria com



que ambas as envoltórias de resistência, a de pico e a residual, também passassem pela origem. Segundo Pinto (2006), o ângulo de atrito residual obtidos nos corpos de prova de comportamento dilatante aproxima-se do ângulo de atrito obtido para os corpos de prova de comportamento contrátil.

Quanto à variação de volume durante o cisalhamento, corpos de prova de areias com comportamento do tipo dilatante apresentam uma contração inicial com a deformação específica axial, conforme descrito por Pinto (2006) e ilustrado na Figura 13. Entretanto, antes de ser atingida a resistência ao cisalhamento máxima, ocorre um aumento significativo do volume do corpo de prova durante o cisalhamento até que, no momento da ruptura, o volume do corpo de prova é superior ao seu volume no início do cisalhamento. Isso ocorre devido ao fenômeno conhecido como dilatância, o qual será discutido em mais detalhes no item a seguir. Observa-se também que o corpo de prova submetido a maior tensão de confinamento sofre menor dilatância do que o corpo de prova submetido a menor tensão de confinamento.

Segundo Pinto (2006), as ideias de comportamento das areias apresentadas nas Figuras 12 e 13 com base em resultados de ensaios triaxiais do tipo CIDc aplicam-se também à ensaios de cisalhamento direto bastando, para isso, substituir tensões desviadoras ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ) por tensões cisalhantes ( $\tau$ ), deformações específicas axiais ( $\epsilon_1$ ) por deslocamento relativo horizontal ( $\delta h$  ou  $\delta x$ ) entre as partes superior e inferior do corpo de prova e deformações específicas volumétricas ( $\epsilon_v$ ) por variações de altura do corpo de prova ( $\delta v$  ou  $\delta y$ ).

#### **2.1.4.4. O fenômeno da dilatância em areias**

A Figura 14 ilustra, à esquerda, um conjunto de partículas de areia perfeitamente esféricas arranjadas inicialmente no estado fofo. Na mesma Figura 14, à direita, apresenta-se o mesmo conjunto de partículas de areia, porém com um índice de vazios menor, estando no estado mais compacto possível. Neste estado, a areia para ser cisalhada precisará aumentar de volume, sofrendo dilatância.

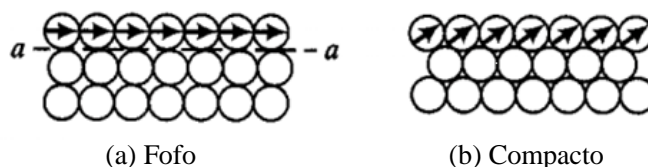


Figura 14 – Cisalhamento na areia no estado fofo e compacto (modificado de Gerscovich, 2010).

Uma das maneiras de explicar a influência da dilatância no ângulo de atrito de pico das areias é via analogia com o deslizamento entre dois blocos dentados, conhecido também como modelo dente de serra, tal como proposto por Houlsby (1991), ilustrado na Figura 15.

Sabe-se que, para um bloco deslizando sobre outro, ambos com superfícies planas horizontais, com ângulo de atrito  $\phi$ , a relação entre a força cisalhante ( $T$ ) necessária para promover o deslocamento entre os blocos e a força normal ( $N$ ) que atua no plano de deslizamento é dada pela Equação 20 abaixo.

$$T = N \cdot \tan \phi \quad (\text{Eq. 20})$$

Ao considerar agora dois blocos em contato por superfícies dentadas, conforme mostra a Figura 15, cujos planos dos dentes formam um ângulo  $i$  com a horizontal, a condição para promover o deslizamento entre os blocos muda e pode ser escrita como:

$$T' = N' \cdot \tan \phi \quad (\text{Eq. 21})$$

, sendo que  $N'$  e  $T'$  representam o somatório das forças normais e cisalhantes, respectivamente, em todos os dentes.

Porém, observa-se que:

$$N' = N \cdot \cos i + T \cdot \sin i \quad (\text{Eq. 22})$$

$$T' = T \cdot \cos i - N \cdot \sin i \quad (\text{Eq. 23})$$

Substituindo as Eq. 22 e 23 na Eq. 21, tem-se que:

$$T \cdot \cos i - N \cdot \sin i = (N \cdot \cos i + T \cdot \sin i) \tan \phi \quad (\text{Eq. 24})$$

Dividindo ambos os membros por  $(\cos i)$ , obtém-se:

$$T - N \cdot \tan i = (N + T \cdot \tan i) \tan \phi \quad (\text{Eq. 25})$$

Isolando a força  $T$ :

$$T = N \frac{(\tan \theta + \tan i)}{(1 - \tan i \cdot \tan \theta)}$$

$$T = N \cdot \tan(\phi + i) \quad (\text{Eq. 26})$$

Dessa analogia, observa-se que o ângulo de atrito ( $\phi$ ) entre os blocos representaria o ângulo de atrito a volume constante da areia ( $\phi_{cv}$ ) ao passo que o ângulo de inclinação dos dentes ( $i$ ) representaria o ângulo de dilatância ( $\psi$ ) da areia. Assim, conclui-se que o ângulo de atrito de pico ( $\phi$ ) de uma areia com comportamento do tipo dilatante é representado pela soma do ângulo de atrito a volume constante da areia ( $\phi_{cv}$ ) com o ângulo de dilatância ( $\psi$ ), conforme definido por Houlsby (1991). Desta forma, para uma dada tensão normal ao plano de ruptura, quanto mais compacta estiver a areia, maior o trabalho necessário para rompê-la (ver Taylor, 1948, pp. 346), representada por um maior ângulo de dilatância ( $\psi$ ) e, portanto, maior o ângulo de atrito ( $\phi$ ) e maior a resistência ao cisalhamento ( $s$ ) do material.

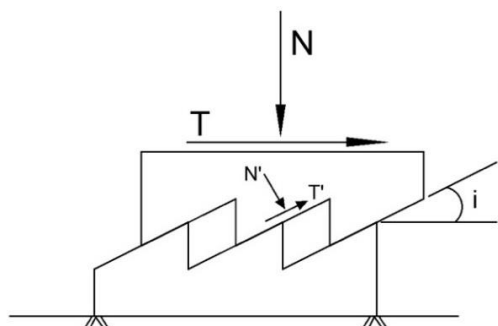


Figura 15 – Modelo dente de serra para dilatância (modificado de Houlsby, 1991).

É oportuno fazer aqui um breve esclarecimento. O que se chama de *interlocking*, podendo ser traduzido como “entrosamento” entre os grãos de areia,

é o fenômeno responsável por fazer com que o ângulo de atrito ( $\phi$ ) de uma areia seja maior do que o ângulo de atrito do mineral que constitui as partículas da areia, chamado de ângulo de atrito mineral-mineral ( $\phi_\mu$ ). Portanto, o fenômeno do *interlocking* está sempre presente em uma areia, ao passo que a dilatância pode ou não ocorrer. É verdade que quanto menor o índice de vazios, maior o *interlocking* e maior a suscetibilidade de ocorrência da dilatância, para uma dada tensão de confinamento ou tensão normal ao plano de ruptura. Todavia, o fenômeno do *interlocking* não é capaz de explicar por si só o fenômeno da dilatância. Mesmo em uma areia cisalhada de forma drenada que apresenta comportamento contrátil e que, portanto, rompe com o ângulo de atrito ( $\phi$ ) igual ao ângulo de atrito a volume constante ( $\phi_{cv}$ ), o fenômeno do *interlocking* está ali presente. Isto está ilustrado na Figura 16 (Rowe, 1962 *apud* Lambe & Whitman, 1979), que mostra o efeito do índice de vazios inicial ( $e_0$ ) no ângulo de atrito ( $\phi$ ) de uma areia de granulometria média a fina, para uma dada tensão de confinamento fixada. Observa-se que o ângulo de atrito mineral-mineral ( $\phi_\mu$ ) é igual a  $26^\circ$  (que corresponde ao ângulo de atrito do quartzo), ao passo que o ângulo de atrito a volume constante ( $\phi_{cv}$ ) da areia é cerca de  $32^\circ$ . Tal diferença é devido ao *interlocking*. O ângulo de atrito medido ( $\phi$ ) só começa a aumentar com a diminuição do índice de vazios para índices de vazios inferiores a 0,72 aproximadamente, devido ao fenômeno da dilatância. A partir daí, quanto menor o índice de vazios, maior o fenômeno da dilatância, e maior o ângulo de atrito medido.

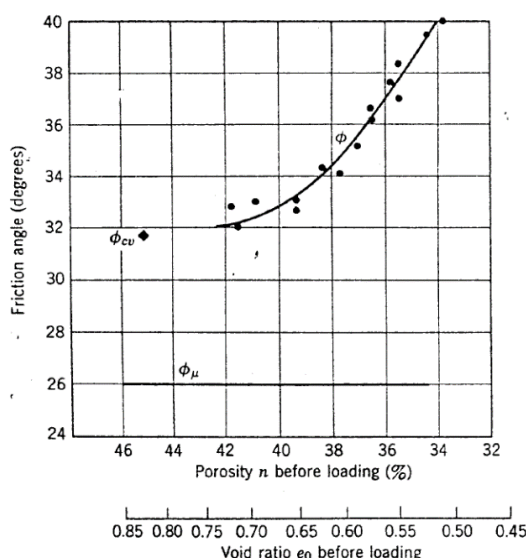


Figura 16 – Ângulo de atrito medido versus índice de vazios inicial de uma areia de granulometria média a fina para uma dada tensão de confinamento (Rowe, 1962 *apud* Lambe & Whitman, 1979)

Taylor (1948) associou o fenômeno da dilatância em um ensaio de cisalhamento direto ao trabalho adicional que a tensão cisalhante no plano de ruptura deve realizar contra a tensão normal, para que as partículas de areia se movam ascendentemente e o corpo de prova sofra ruptura. A Figura 17, apresentada por Simões (2015), mostra curvas típicas obtidas de um ensaio de cisalhamento direto realizado em um corpo de prova de areia com comportamento dilatante. A areia pode estar seca ou inundada desde que cisalhada sob condições drenadas, que é o caso no caso de cisalhamento direto em areias.

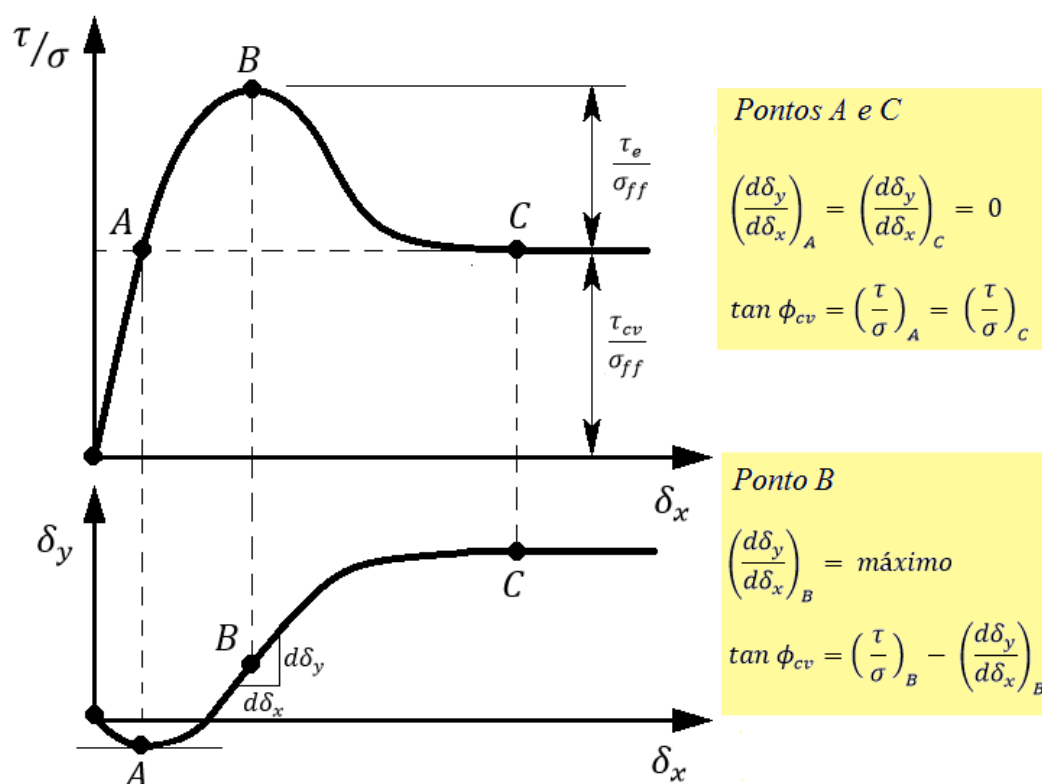


Figura 17 – Dilatância associada ao trabalho realizado para expandir o corpo de prova de areia em um ensaio de cisalhamento direto (Simões, 2015)

De acordo com Taylor (1948), em um ensaio de cisalhamento direto, parte da tensão cisalhante necessária para provocar a ruptura de um corpo de prova de areia com comportamento do tipo dilatante realiza o trabalho para que a areia se expanda contra a tensão normal imposta. Desta forma, a tensão cisalhante ( $\tau_{ff}$ ) necessária para levar à ruptura um corpo de prova de areia que apresente um comportamento do tipo dilatante pode ser dividida em duas parcelas, a saber: uma parcela necessária para romper a areia a volume constante ( $\tau_{cv}$ ), e a parcela de dilatância, a qual realiza

o trabalho adicional necessário para expandir o corpo de prova ( $\tau_e$ ). Sendo assim, na ruptura, tem-se que (ver Simões, 2015):

$$\tau_{ff} = \tau_{cv} + \tau_e \quad (\text{Eq. 27})$$

Em um ensaio de cisalhamento direto realizado em um corpo de prova de areia na condição seca, ou na condição inundada cisalhado de forma drenada, a tensão normal efetiva corresponde à própria tensão normal total.

Assim, dividindo ambos os membros, pela tensão normal total que atua no plano de ruptura, na ruptura ( $\sigma_{ff}$ ), tem-se que:

$$\frac{\tau_{ff}}{\sigma_{ff}} = \frac{\tau_{cv}}{\sigma_{ff}} + \frac{\tau_e}{\sigma_{ff}} \quad (\text{Eq. 28})$$

Igualando-se o trabalho adicional realizado, no momento da ruptura, pela tensão cisalhante (ou pela força cisalhante) para expandir o corpo de prova ao trabalho de expansão contra a tensão normal (ou contra a força normal) imposta, tem-se que:

$$\tau_e A d\delta_x = \sigma_{ff} A d\delta_y \quad (\text{Eq. 29})$$

Ou seja:

$$\frac{\tau_e}{\sigma_{ff}} = \frac{d\delta_y}{d\delta_x} \quad (\text{Eq. 30})$$

, onde:

A: Área de contato (no plano horizontal) entre as partes cisalhantes do corpo de prova na ruptura;

$d\delta_x$ : variação do deslocamento horizontal relativo ( $\delta_x$ ) entre as partes cisalhadas do corpo de prova na ruptura;

$d\delta_y$ : variação do deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta_y$ ) na ruptura;

$\frac{d\delta_y}{d\delta_x}$ : taxa de variação do deslocamento vertical ( $\delta_y$ ) em relação ao deslocamento horizontal relativo ( $\delta_x$ ) na ruptura.

Substituindo a Equação 30 na Equação 28, tem-se que:

$$\frac{\tau_{ff}}{\sigma_{ff}} = \frac{\tau_{cv}}{\sigma_{ff}} + \frac{d\delta_y}{d\delta_x} \quad (\text{Eq. 31})$$

Ou então,

$$\tan \phi = \tan \phi_{cv} + \frac{d\delta_y}{d\delta_x} \quad (\text{Eq. 32})$$

, onde:

$\phi$ : ângulo de atrito da areia, medido no ensaio.

$\phi_{cv}$ : ângulo de atrito da areia a volume constante.

Vale fazer as seguintes interpretações da dedução acima com base em Taylor (1948) e Simões (2015):

- A) A equação 32 mostra que a tangente do ângulo de atrito de uma areia pode ser interpretada como a soma da tangente do ângulo de atrito a volume constante mais o efeito da dilatação, dada pela taxa de variação do aumento da altura do corpo de prova ( $d\delta_y$ ) em relação à variação do deslocamento horizontal relativo entre as partes cisalhadas ( $d\delta_x$ ), que, por sua vez, corresponde à tangente do ângulo que a reta tangente à curva  $\delta_y$  x  $\delta_x$  no ponto correspondente à ruptura faz com a horizontal.
- B) Mesmo sem ocorrer dilatação durante o cisalhamento do corpo de prova, o valor de  $d\delta_y/d\delta_x$  tende a zero para elevados deslocamentos horizontais relativos ( $\delta_x$ ), correspondente ao ponto C da Figura 17, por exemplo. A este respeito vale dizer que, no comportamento contrátil, observa-se que, em geral, a ruptura ocorre quando  $d\delta_y/d\delta_x = 0$ , que corresponde a  $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1 = 0$  no ensaio triaxial CIDc (ver Figura 12). Assim, qualquer que seja a condição inicial antes do cisalhamento, para grandes deslocamentos horizontais relativos, chegar-se-á ao ângulo de atrito a volume constante, que é uma propriedade da areia. Observa-se que o ponto de alcance do ângulo de atrito a volume constante no gráfico  $\tau/\sigma$  x  $\delta_x$  corresponde ao ponto de estabilização do aumento da altura do corpo de prova,  $d\delta_y/d\delta_x = 0$ , no gráfico  $\delta_y$  x  $\delta_x$ , ponto C na Figura 17.

C) Assim como no ponto C, no ponto A, que marca o início do deslocamento vertical ascendente do *top cap*, tem-se  $d\delta_y/d\delta_x = 0$ . Além disso, segundo este modelo teórico ou segundo esta interpretação, observa-se que o valor da razão  $\tau/\sigma$  no ponto A é igual ao valor da razão  $\tau/\sigma$  no ponto C, que corresponde à tangente do ângulo de atrito a volume constante. Assim, tem-se que:

$$\left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_A = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_C = \tan \phi_{cv} \quad (\text{Eq. 33})$$

D) No ponto B, correspondente à ruptura, ocorre a inclinação máxima da curva de deslocamento vertical por deslocamento relativo horizontal ( $d\delta_y/d\delta_x = \text{máx}$ ). Neste ponto, a tensão cisalhante mobilizada (resistência ao cisalhamento) é resultado da soma da parcela necessária para romper a areia a volume constante ( $\tau_{cv}$ ) e a parcela que realiza o trabalho da dilatação ( $\tau_e$ ) com seu valor máximo. Assim, na ruptura, tem-se que:

$$\left(\frac{d\delta_y}{d\delta_x}\right)_B = \left(\frac{d\delta_y}{d\delta_x}\right)_{\text{máximo}} \quad (\text{Eq. 34})$$

Então:

$$\left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_B = \left(\frac{d\delta_y}{d\delta_x}\right)_B + \frac{\tau_{cv}}{\sigma} \quad (\text{Eq. 35})$$

$$\tan \phi = \left(\frac{d\delta_y}{d\delta_x}\right)_B + \tan \phi_{cv} \quad (\text{Eq. 36})$$

Para finalizar este item vale dizer que um dos objetivos da presente pesquisa é verificar as características descritas acima com base na Figura 17 nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados na Areia da Praia de Ipanema, complementando o trabalho realizado por Simões (2015).



#### **2.1.4.5. O conceito de índice de vazios crítico segundo Lee & Seed (1967)**

Lee & Seed (1967) realizaram ensaios triaxiais adensados hidrostaticamente, drenados, de compressão (CIDc) em corpos de prova da Areia do Rio Sacramento preparados com compacidades relativas (CR) diferentes, variando desde CR = 38% até CR = 100%. Os corpos de prova foram submetidos a diferentes tensões de confinamento ( $\sigma_3$ ), variando desde  $\sigma_3 = 1 \text{ kgf/cm}^2$  até  $\sigma_3 = 140 \text{ kgf/cm}^2$ . A Figura 18 mostra os resultados obtidos nos corpos de prova preparados com CR = 38%, ao passo que a Figura 19 mostra os resultados obtidos nos corpos de prova preparados com CR = 100%.

Das Figuras 18 e 19, Lee & Seed (1967) destacaram os seguintes efeitos relacionados ao acréscimo da tensão confinante, para uma dada compacidade relativa, a saber: (1) a inibição das características frágeis da curva tensão-deformação, isto é, inibição ou até mesmo eliminação do pico e aumento da deformação axial específica na ruptura; (2) a redução na dilatância, passando a haver contração do corpo de prova a partir de uma determinada tensão de confinamento.

No que se refere ao efeito (1), observa-se que, de fato, para ambas as compacidades relativas, quanto maior a tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ), menor tende a ser a razão de tensões principais  $\sigma_1/\sigma_3$  na ruptura e maior tende a ser a deformação axial na ruptura. Para CR = 100 %, o aumento da tensão de confinamento vai tornando o pico da curva tensão-deformação menos proeminente.

No que tange ao efeito (2), vale destacar da Figura 19 que até mesmo os corpos de prova preparados com a compacidade relativa de 100 % apresentaram contração quando ensaiados sob tensões confinantes maiores do que  $20 \text{ kgf/cm}^2$ . Em contrapartida, da Figura 18 observa-se que um corpo de prova com compacidade relativa de 38 % apresentou dilatância quando ensaiado sob a tensão confinante mais baixa, igual a  $1 \text{ kgf/cm}^2$ .

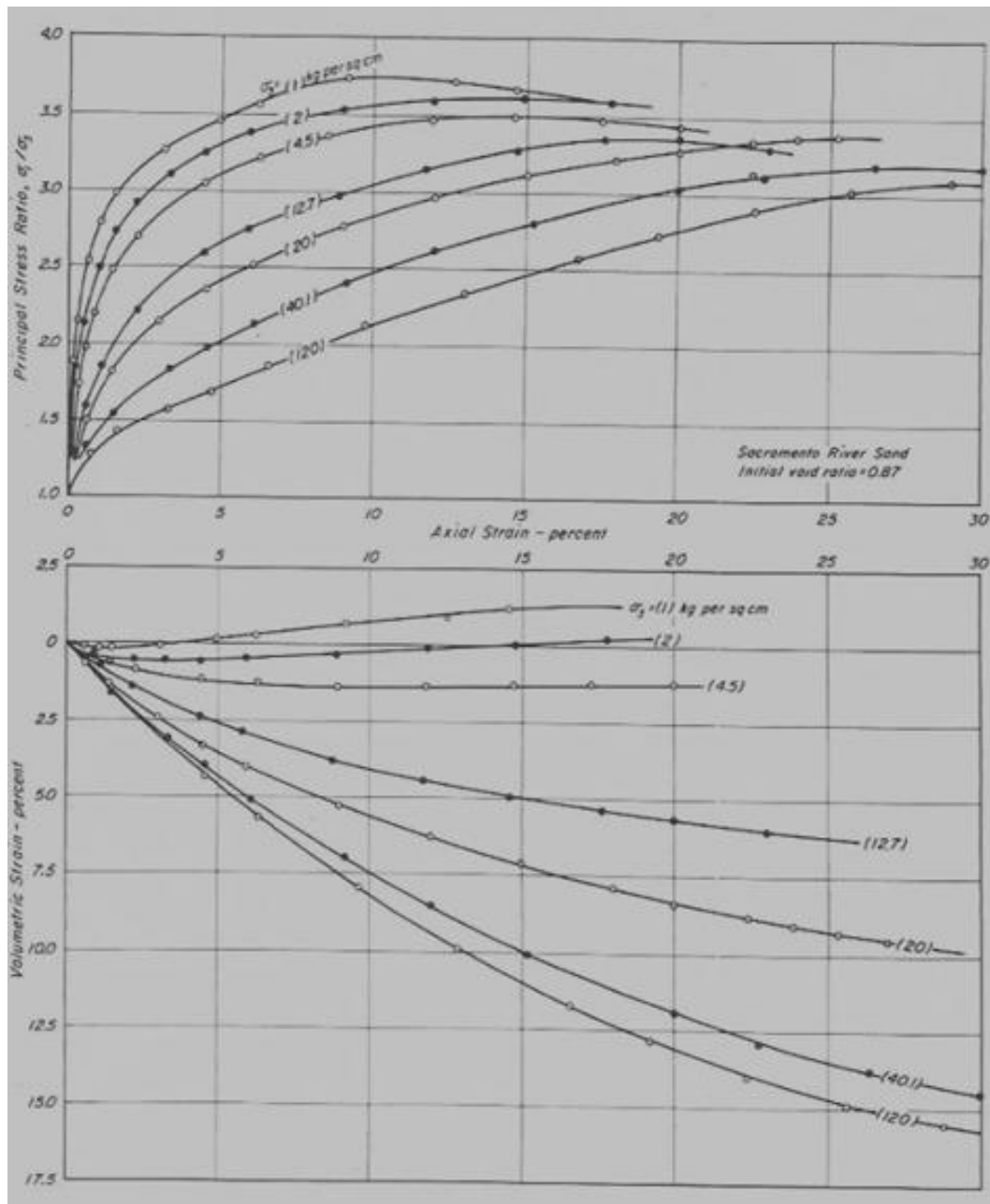


Figura 18 – Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica específica de corpos de prova de areia com CR = 38 % submetido a ensaios triaxiais CIDc (Lee & Seed, 1967)

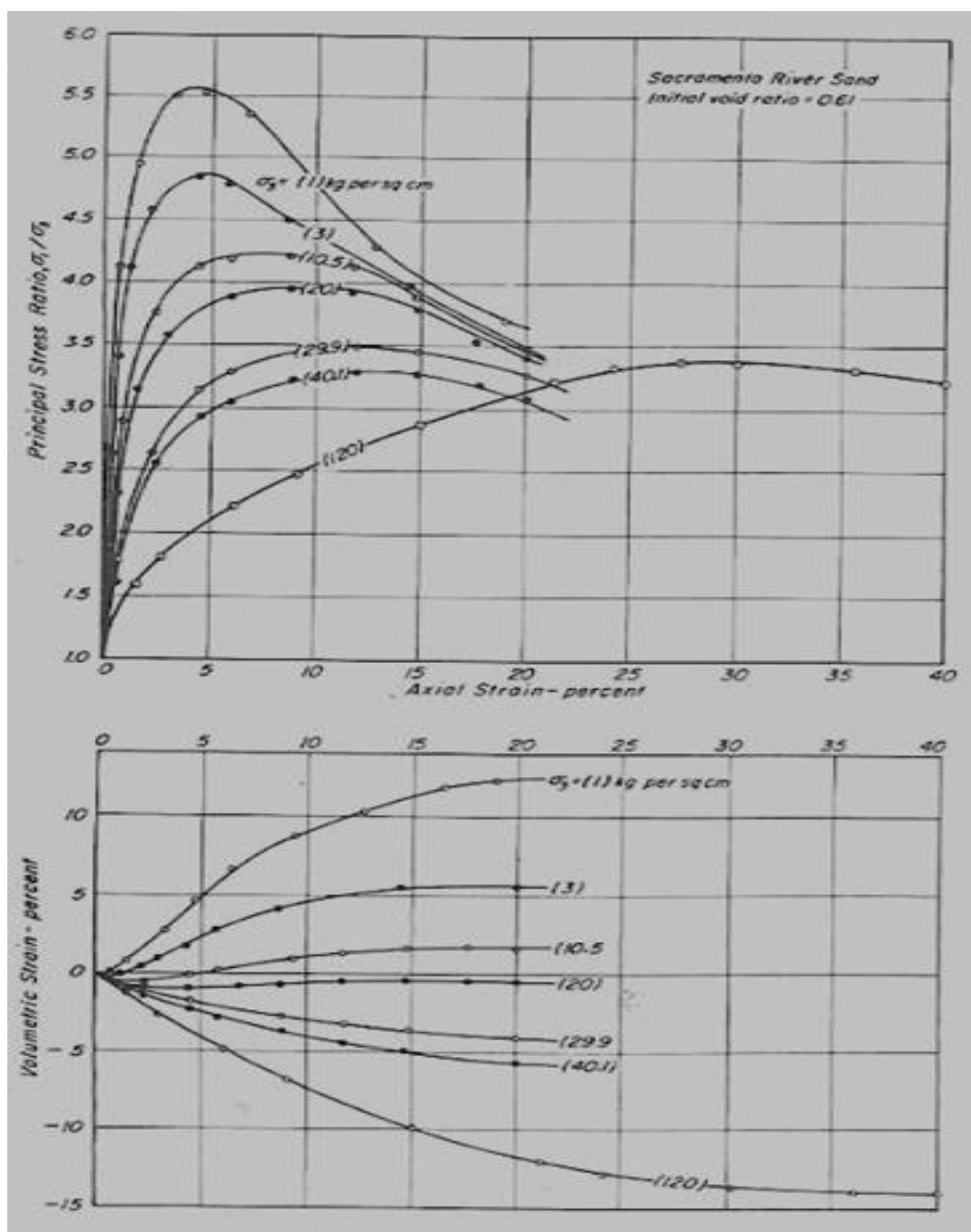


Figura 19 – Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica específica de corpos de prova de areia com CR = 100 % submetido a ensaios triaxiais CIDc (Lee & Seed, 1967)

A Figura 20 apresentada por Lee & Seed (1967) reúne resultados obtidos de uma série de ensaios triaxiais CIDc realizados em corpos de prova compactos, com aproximadamente o mesmo índice de vazios inicial ( $e_0$ ), igual a 0,61, que corresponde à compactidade relativa (CR) de 100 %, submetidos a diferentes tensões de confinamento ( $\sigma_3$ ). A Figura 20(a) apresenta as tensões desviadoras na ruptura, a Figura 20(b) os índices de vazios ao final da etapa de adensamento (início

do cisalhamento) e a Figura 20(c) as deformações volumétricas específicas na ruptura, sendo todos os três gráficos plotados *versus* as tensões de confinamento impostas nos ensaios. Enfatiza-se que o que Lee & Seed (1967) chama de “*Void Ratio at Start of Test*” na Figura 20(b) trata-se, na realidade, do índice de vazios ao final da etapa de adensamento, isto é, início da etapa de cisalhamento.

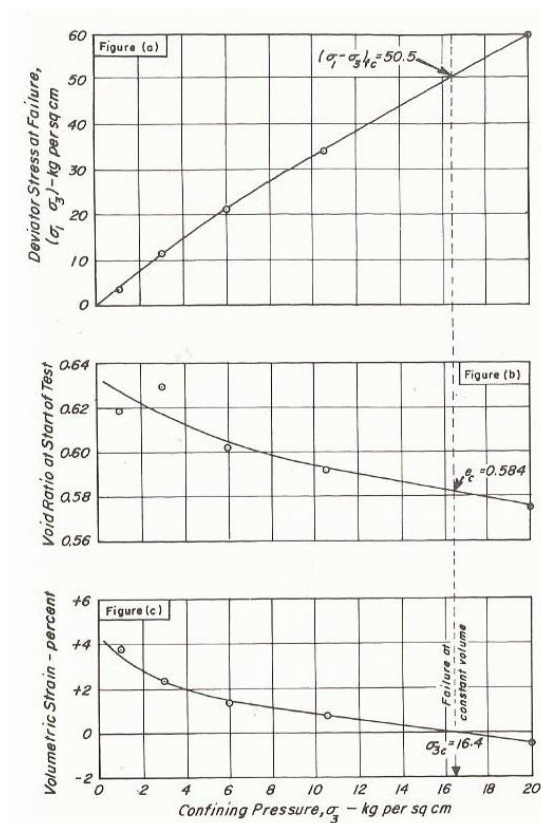


Figura 20 – Características na ruptura de corpos de prova compactos da Areia do Rio Sacramento (Lee & Seed, 1967)

Segundo Lee & Seed (1967), a curva da Figura 20(c) indica que se fosse realizado um ensaio triaxial CIDc em um corpo de prova com  $e_0$  aproximadamente igual a 0,61 sob tensão confinante de 16,4 kgf/cm<sup>2</sup>, a deformação volumétrica específica na ruptura seria nula. Esta tensão confinante é, portanto, a tensão confinante crítica desse conjunto de ensaios, e o índice de vazios após o adensamento igual a 0,584, obtido da Figura 20(b), é o índice de vazios crítico associado a essa tensão confinante.

Lee & Seed (1967) fizeram o mesmo procedimento para os outros três grupos de corpos de prova, sendo cada grupo composto por corpos de prova com índice de vazios iniciais semelhantes da ordem de 0,87, 0,78 e 0,71, e determinaram seus

respectivos pares de tensão confinante crítica e índice de vazios crítico. Em seguida, apresentaram a relação entre o índice de vazios crítico e a tensão confinante crítica para a areia do Rio Sacramento, conforme ilustrado na Figura 21.

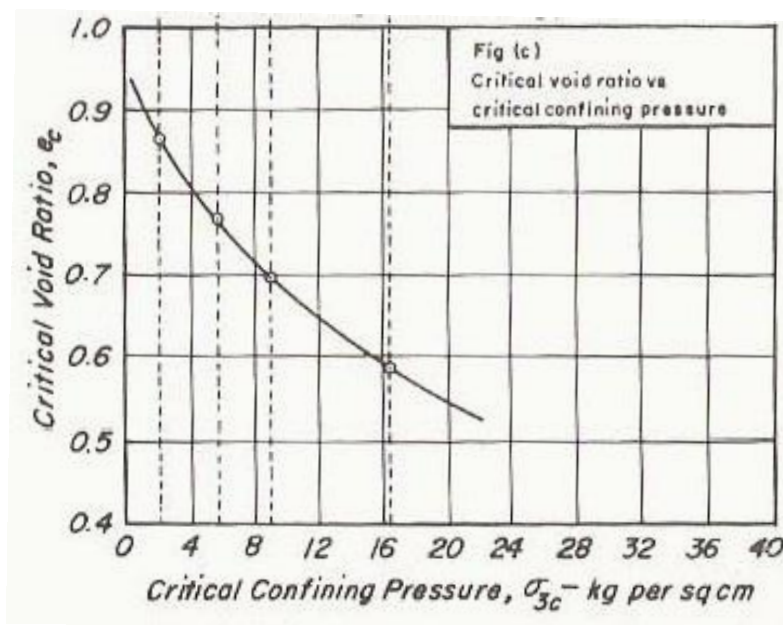


Figura 21 – Linha ( $\sigma_{cr}$ ,  $e_{cr}$ ) definida em ensaios triaxiais drenados CIDc (Lee & Seed, 1967)

Com o objetivo de detalhar ainda mais o estudo da relação entre o índice de vazios crítico e a tensão confinante crítica, Lee & Seed (1967) agruparam os resultados de todos os ensaios de cisalhamento e obtiveram o gráfico ilustrado na Figura 22, que mostra o efeito tanto da tensão confinante quanto do índice de vazios do corpo de prova ao final do adensamento na deformação volumétrica específica na ruptura. Na Figura 22, cada reta interpolada representa uma tensão confinante. Da Figura 22 observa-se então que quanto maior a tensão confinante, menor o índice de vazios crítico a ela associada, sendo o índice de vazios crítico aquele para o qual a deformação volumétrica específica na ruptura é igual a zero.

Lee & Seed (1967) plotaram ainda curvas deformação volumétrica específica na ruptura *versus* tensão de confinamento, cada qual para um índice de vazios no fim do adensamento igual a 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 e 0,9, por interpolação dos dados apresentados na Figura 22. Da Figura 23, observa-se que quanto menor o índice de vazios no fim do adensamento, maior a tensão confinante crítica a ele associado, que é aquela sob a qual o corpo de prova irá apresentar deformação volumétrica específica na ruptura igual a zero.

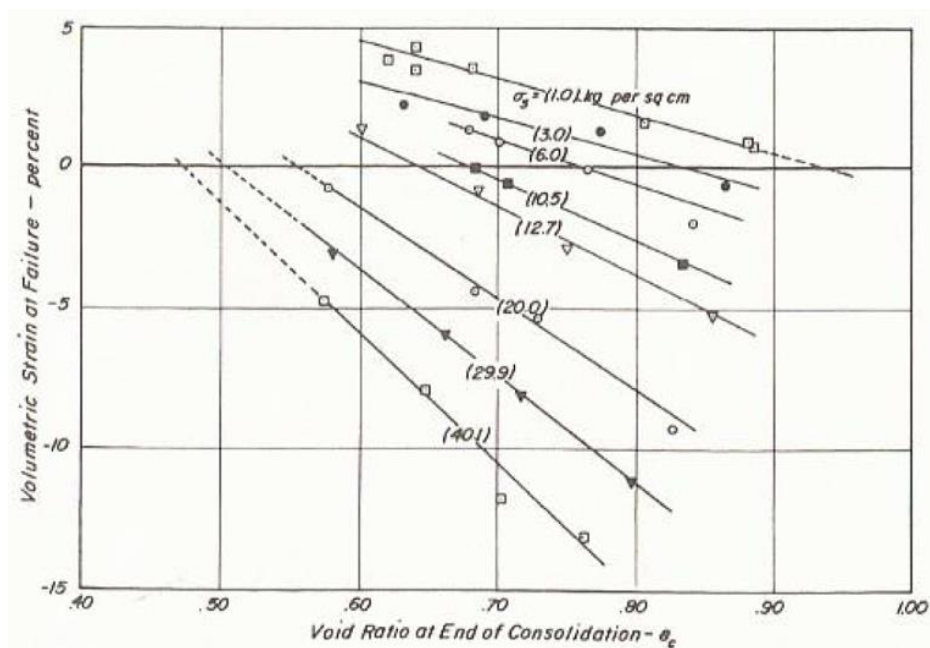


Figura 22 - Deformação volumétrica específica na ruptura para tensões confinantes de até 40 kgf/cm<sup>2</sup> (Lee & Seed, 1967).

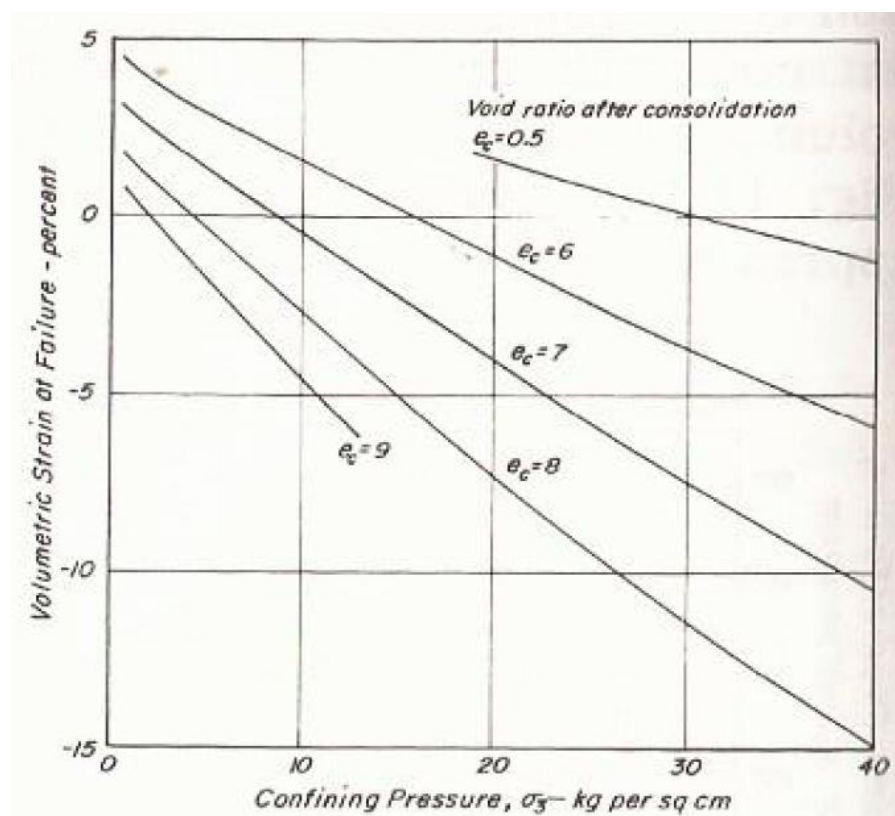


Figura 23 – Deformação volumétrica específica na ruptura para diferentes índices de vazios após o adensamento (Lee & Seed, 1967).

Por fim, analisando os pares tensão confinante x índice de vazios para os quais se observou deformação volumétrica nula na ruptura, obtidos das Figuras 23 e 24,

Lee & Seed (1967) definiram a curva crítica interligando os pontos críticos, conforme ilustrado na Figura 24.

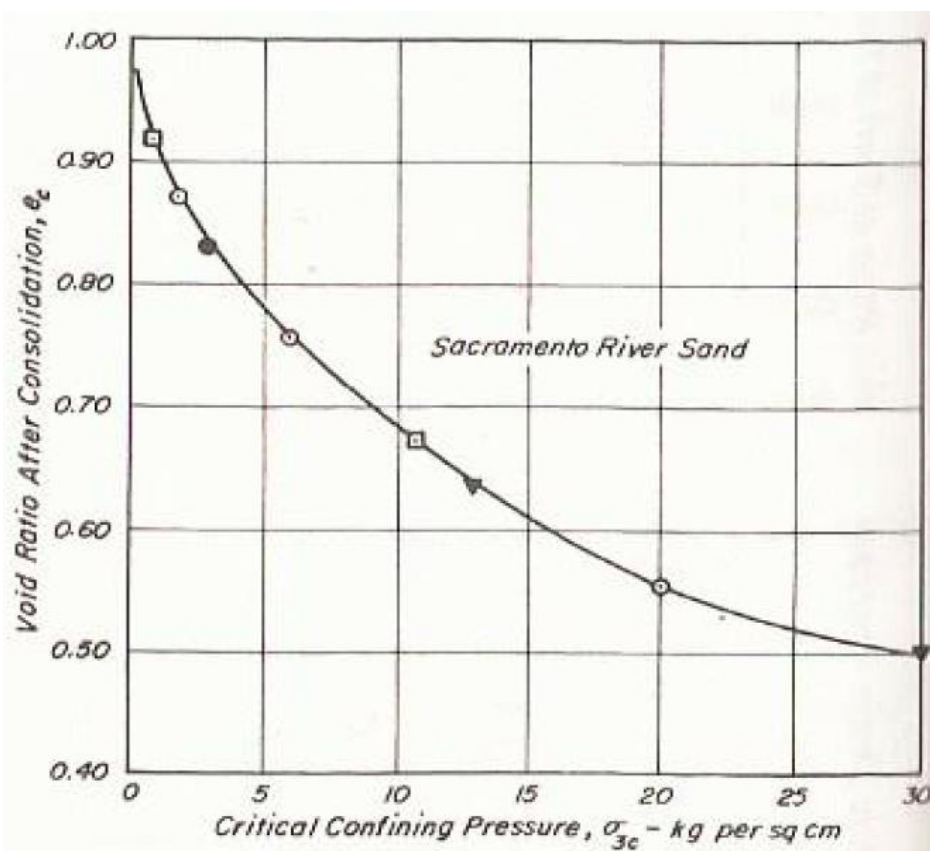


Figura 24 – Linha ( $\sigma_{cr}$ ,  $e_{cr}$ ) definida em ensaios triaxiais CIDc da areia do Rio Sacramento (Lee & Seed, 1967)

Lee & Seed (1967) concluíram, portanto, que o índice de vazios crítico de uma areia depende da tensão confinante à qual ela está submetida e, portanto, não é uma característica inerente ao material. Dos resultados obtidos experimentalmente, Lee & Seed (1967) mostraram que o comportamento de dilatação, contração ou nenhuma variação volumétrica na ruptura, é função do par de valores (índice de vazios, tensão confinante) sob o qual corpo de prova encontra-se antes do cisalhamento. Assim, o par de valores para o qual a deformação volumétrica é nula na ruptura é chamado de crítico e a ligação de diferentes pares críticos permite definir a curva crítica. Esta curva indica como deve ser o comportamento de um corpo de prova com um dado índice de vazios sob uma dada tensão confinante, se dilatante ou contrátil, quando cisalhado de forma drenada, conforme ilustrado na Figura 25, modificado de Lee & Seed (1967) por Simões (2015).



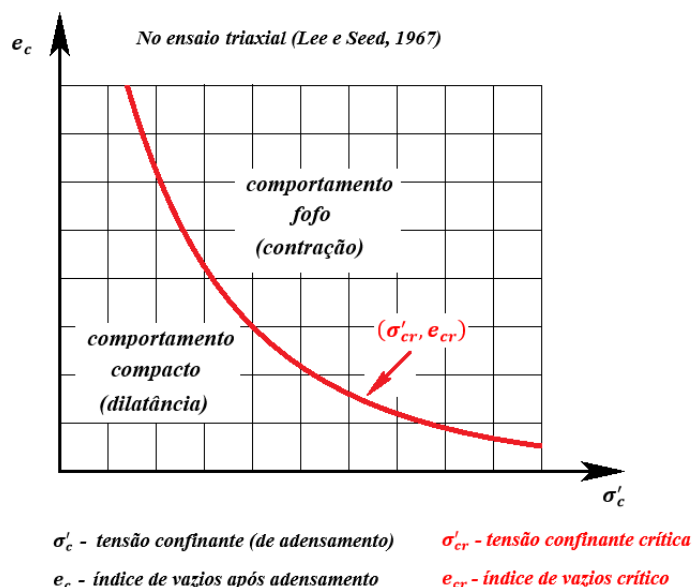


Figura 25 - Linha  $(\sigma'_{cr}, e_{cr})$  definida em ensaios triaxiais CIDc (adaptado por Simões, 2015 a partir de Lee & Seed, 1967).

Da Figura 25 nota-se, portanto, que para cada índice de vazios, existe uma tensão confinante crítica, sob a qual o corpo de prova apresenta deformação volumétrica nula na ruptura em um ensaio triaxial CIDc. Neste caso, um corpo de prova com um determinado índice de vazios ao ser ensaiado sob uma tensão confinante menor do que a tensão confinante crítica associada àquele índice de vazios, estará à esquerda da curva crítica e apresentará comportamento dilatante. O mesmo corpo de prova, com o mesmo índice de vazios, ao ser ensaiado sob tensão confinante maior do que a tensão confinante crítica associada àquele índice de vazios, estará à direita da curva crítica e apresentará comportamento contrátil.

Fixando agora a tensão confinante imposta, se o corpo de prova estiver com um índice de vazios no início do cisalhamento menor do que o índice de vazios crítico associado àquela tensão confinante, ele estará abaixo da curva crítica e apresentará comportamento dilatante. Por outro lado, se o corpo de prova estiver com um índice de vazios no início do cisalhamento maior do que o índice de vazios crítico associado àquela tensão confinante, ele estará acima da curva crítica e apresentará comportamento contrátil.

Estando uma areia saturada com índice de vazios abaixo ou acima do índice de vazios crítico correspondente a uma dada tensão confinante, o comportamento da areia submetida a um carregamento não drenado será extremamente distinto no que tange à resistência ao cisalhamento (Pinto, 2006).



Segundo Pinto (2006), no caso de uma areia com índice de vazios inferior ao índice de vazios crítico para uma dada tensão confinante, que tende a sofrer aumento de volume (dilatância) ao ser cisalhada, não havendo possibilidade de drenagem, ocorre geração de excesso de poropressão negativo, tendo como consequência o aumento da tensão confinante efetiva e, portanto, aumento da resistência ao cisalhamento.

Já uma areia com índice de vazios superior ao índice de vazios crítico para uma dada tensão confinante, tende a diminuir de volume (contrair) quando cisalhada. Neste caso, o impedimento da drenagem gera excesso de poropressão positivo e, por conseguinte, diminuição da tensão confinante efetiva, resultando na diminuição da resistência ao cisalhamento. Daí a importância em conhecer a curva índice de vazios crítico *versus* tensão confinante crítica de uma dada areia (Pinto, 2006).

Pinto (2006) apresentou ainda uma forma de determinar um ponto da curva tensão confinante crítica *versus* índice de vazios crítico de uma areia pela interpolação dos resultados de uma série de ensaios triaxiais CIDc realizados em corpos de prova com diferentes índices de vazios iniciais, submetidos a mesma tensão confinante, conforme ilustrado na Figura 26. Para isso, traça-se o gráfico da deformação volumétrica específica na ruptura *versus* o índice de vazios do corpo de prova no fim do adensamento e, para aquela tensão confinante, o índice de vazios crítico é aquele associado à deformação volumétrica nula na ruptura. Determina-se, desta maneira, um ponto ( $\sigma'_{cr}, e_{cr}$ ) da curva crítica. Repetindo o mesmo procedimento para um número suficientemente de tensões confinantes, é possível obter vários pontos ( $\sigma'_{cr}, e_{cr}$ ) e plotar a curva tensão confinante crítica *versus* índice de vazios crítico da areia.

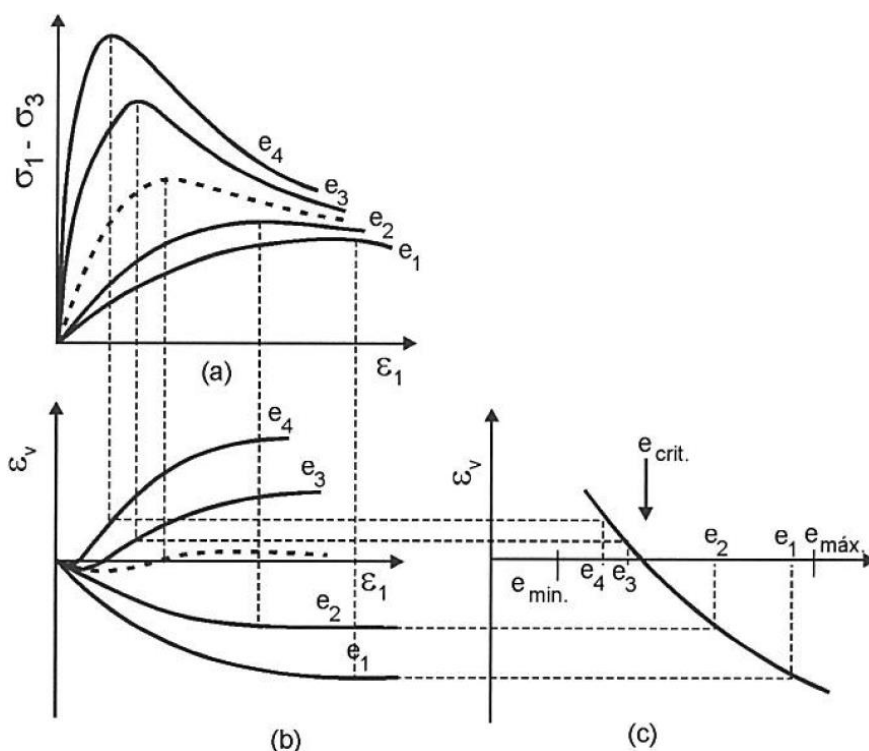


Figura 26 - Método de obtenção do índice de vazios crítico a partir de ensaios triaxiais CIDc submetidos a mesma tensão confinante (Pinto, 2006).

De forma semelhante à apresentada por Pinto (2006), a curva representativa dos pontos de tensão confinante crítica *versus* índice de vazios crítico sugerida por Lee & Seed (1967) também pode ser determinada a partir de ensaios de cisalhamento direto. Neste caso, a tensão confinante é substituída pela tensão normal aplicada no corpo de prova e a deformação volumétrica específica é substituída pelo deslocamento vertical do corpo de prova.

### 2.1.5. Ensaio de cisalhamento direto

Existem vários métodos de ensaios para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos em laboratório, a saber: o ensaio triaxial, o ensaio de cisalhamento direto, o ensaio de cisalhamento simples (*direct simple shear*), entre outros.

Neste item, descreve-se brevemente o ensaio de cisalhamento direto, que é o ensaio mais simples dentre aqueles normalmente empregados em laboratório para determinar a resistência ao cisalhamento de areias sob condições drenadas e que vem a ser ensaio utilizado nesta pesquisa.

O ensaio de cisalhamento direto é a forma mais antiga e mais simples empregada para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos em laboratório. O ensaio é realizado basicamente em duas etapas, a saber: a etapa de aplicação da tensão vertical (normal) que, em um corpo de prova ensaiado na condição inundada (ou submersa), corresponde à etapa de adensamento, e a etapa de cisalhamento.

O equipamento de ensaio, ilustrado esquematicamente na Figura 27, consiste basicamente em uma caixa metálica interna de seção quadrada em planta e seção transversal retangular, dividida em duas metades no plano horizontal, chamada de caixa de cisalhamento. Normalmente, para ensaios em solos, a caixa possui largura interna que varia de 5 cm a 10 cm e altura interna de cerca de 5 cm, com o corpo de prova tendo uma altura inicial de cerca de 2 cm. O interior da caixa abriga o corpo de prova de solo a ser ensaiado e, sobre o corpo de prova, é colocado um *top cap*, no qual atua uma força vertical, normal ao plano horizontal de ruptura imposto na etapa de cisalhamento. A caixa interna que abriga o corpo de prova é acondicionada dentro de uma caixa metálica externa, chamada de “carrinho” na Figura 27, que, na fase de cisalhamento, desloca-se horizontalmente sobre trilhos com esferas de aço. A caixa externa é enchida com água em ensaios realizados com o corpo de prova na condição submersa (ou inundada).

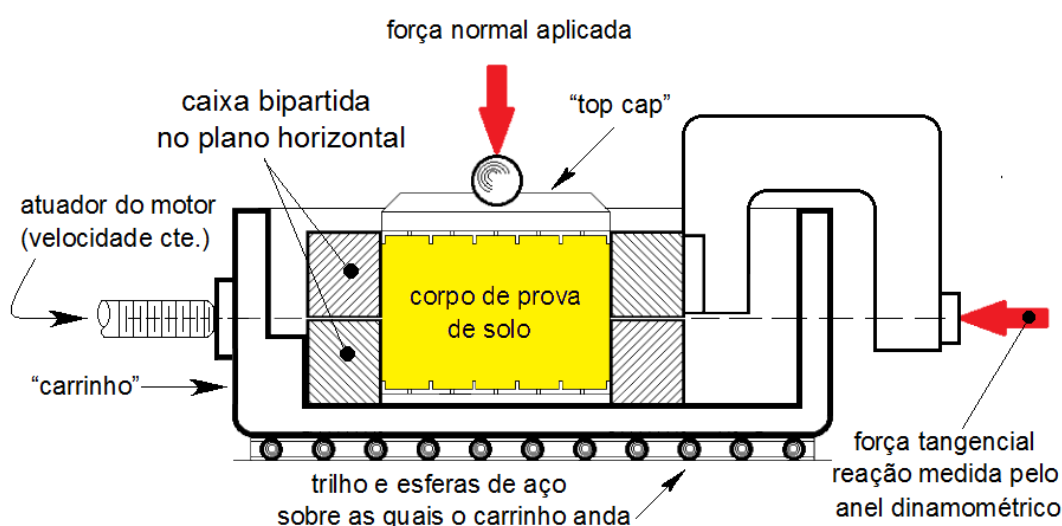


Figura 27 - Esquema do Equipamento do Ensaio de Cisalhamento Direto (Simões, 2015).

Após a moldagem do corpo de prova e montagem do ensaio, o procedimento do ensaio tem início na fase de aplicação da tensão vertical (normal) nominal ( $\sigma$ )

ao corpo de prova e medição de suas deformações verticais ao longo do tempo. Em corpos de prova ensaiados na condição submersa, esta etapa deve durar até pelo menos o “fim” do chamado adensamento primário. Enquanto em areias esta etapa ocorre em poucos minutos ou até em segundos, devido a seu elevado coeficiente de adensamento, em argilas moles, que possuem baixo coeficiente de adensamento, a fase de adensamento pode levar muitas horas. Observa-se que, pelo fato do corpo de prova estar confinado lateralmente dentro da caixa de cisalhamento, o adensamento ocorre sob condições edométricas, sendo aplicável a interpretação pela Teoria do Adensamento de Terzaghi & Frohlich (1936), principalmente para o caso de solos argilosos. Para areias secas, como é o caso da presente pesquisa, a deformação vertical do corpo de prova decorrente da aplicação da tensão vertical (normal) nominal ocorre quase que instantaneamente.

Em seguida, na fase de cisalhamento, mantendo-se o carregamento vertical nominal aplicado sobre o corpo de prova, impõe-se à caixa externa (carrinho) uma velocidade de deslocamento horizontal constante mediante o atuador do motor (ver Figura 27). Por conseguinte, a parte inferior da caixa metálica dividida em duas metades segundo um plano horizontal desloca-se solidariamente à caixa externa e desliza em relação à metade superior, uma vez que esta tem seu deslocamento horizontal impedido por um anel dinamométrico ou uma célula de carga, conforme ilustrado na Figura 27. O anel dinamométrico ou a célula de carga, por sua vez, acusa a força horizontal que a metade superior da caixa dividida em duas metades exerce no mesmo. Com disso, pela 3ª Lei de Newton, o corpo de prova é solicitado, no plano horizontal de ruptura, por uma força cisalhante ( $T$ ) de igual magnitude exercida e medida pelo anel dinamométrico ou pela célula de carga. A força cisalhante  $T$  que provoca a ruptura do corpo de prova atua no plano horizontal de contato entre as partes cisalhantes do corpo de prova.

Durante o cisalhamento, além da força cisalhante ( $T$ ) medida por um anel dinamométrico ou por uma célula de carga, os deslocamentos horizontais da caixa metálica externa são registrados por um extensômetro analógico ou digital ou por um transdutor de deslocamento do tipo LVDT. Os deslocamentos horizontais da caixa metálica externa correspondem aos deslocamentos horizontais relativos entre as partes inferior e superior do corpo de prova. Ademais, os deslocamentos verticais do *top cap* também são registrados por um extensômetro analógico ou digital ou por um LVDT, indicando se houve comportamento de expansão ou contração do

corpo de prova durante o cisalhamento. É bom que se diga que embora seja possível identificar a expansão ou a contração do corpo de prova, o ensaio de cisalhamento direto não permite medir as deformações volumétricas do corpo de prova durante o cisalhamento, como é feito, por exemplo, nos ensaios triaxiais.

Para cada tensão vertical nominal aplicada, são obtidos como resultados as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )”, conforme as curvas apresentadas na Figura 17. De posse dessas curvas, identifica-se a razão  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$ , que corresponde à ruptura do corpo de prova. A realização de diversos ensaios com corpos prova provenientes do mesmo material sob diferentes tensões verticais nominais leva a obtenção da envoltória de resistência do material, gráfico  $\tau \times \sigma$ .

Segundo Taylor (1948), a acurácia dos resultados obtidos em ensaios de cisalhamento direto é menor do que a acurácia dos resultados obtidos em ensaios mais complexos, como os ensaios triaxiais. Apesar disso, a simplicidade do entendimento e da realização do ensaio de cisalhamento direto são grandes vantagens e devem ser consideradas no momento da escolha do ensaio a ser executado.

Além da simplicidade, outras vantagens como o baixo custo, devido à pequena quantidade de materiais necessários para a moldagem dos corpos de prova, aliado à rapidez na execução em solos arenosos fazem do ensaio de cisalhamento direto um dos mais utilizados para determinação da resistência ao cisalhamento deste tipo de solo, ainda nos dias atuais.

Simões (2015) aponta que o pré-estabelecimento de um plano de cisalhamento à amostra, que condiciona a ruptura a ocorrer no plano horizontal, permite conhecer apenas as tensões atuantes neste plano e não o estado de tensões no corpo de prova como um todo. Por outro lado, a imposição de um plano de ruptura pode transformar-se em uma vantagem do ensaio quando se quer conhecer, por exemplo, os parâmetros de resistência ao longo de estratificações, fissuras e direções de anisotropia de um depósito de solo.

Entre as limitações do ensaio, destacam-se ainda a impossibilidade do controle das condições de drenagem e ausência de medição da poro-pressão, sendo, portanto, os resultados dos ensaios dados em termos de tensões totais. No entanto,

no caso de corpos de prova de areias ensaiados na condição submersa, onde os excessos de poro-pressão decorrentes das deformações cisalhantes são rapidamente dissipados, o cisalhamento pode ser assumido como realizado sob condições drenadas e, conseqüentemente, as tensões efetivas podem ser assumidas como iguais às tensões totais.

Destaca-se ainda que o ensaio de cisalhamento direto não é um ensaio adequado para a determinação de parâmetros de deformabilidade do solo, como o módulo de cisalhamento ( $G$ ) por exemplo, pelo fato de não ser possível calcular a distorção ( $\gamma$ ), além do fato das distribuições das tensões e das deformações ao longo do plano de ruptura não serem uniformes.

Outro problema que frequentemente ocorre em ensaios de cisalhamento direto, destacado por Simões (2015), diz respeito ao adernamento do *top cap*, que é a rotação sofrida pelo *top cap* durante o cisalhamento, ilustrada na Figura 28.

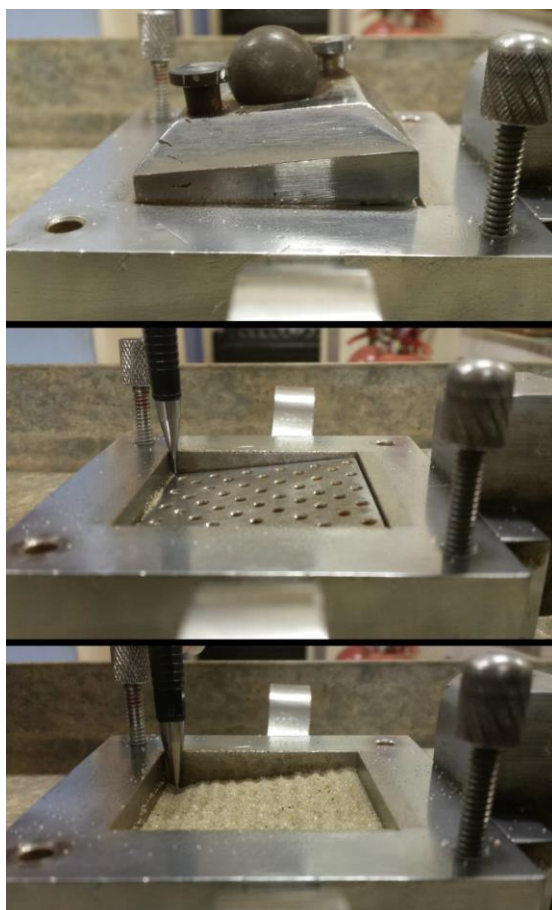


Figura 28 - Efeito do adernamento do *top cap* após um ensaio de cisalhamento direto (Simões, 2015).

### 2.1.6. Estudo da Resistência ao cisalhamento da Areia da Praia de Ipanema realizado por Simões (2015)

Simões (2015) determinou a distribuição granulométrica da Areia da Praia de Ipanema, conforme apresentada na Figura 29, concluindo que se trata de uma areia média, uniforme e mal graduada, com diâmetros de grão compreendidos entre 0,15 mm e 0,70 mm.

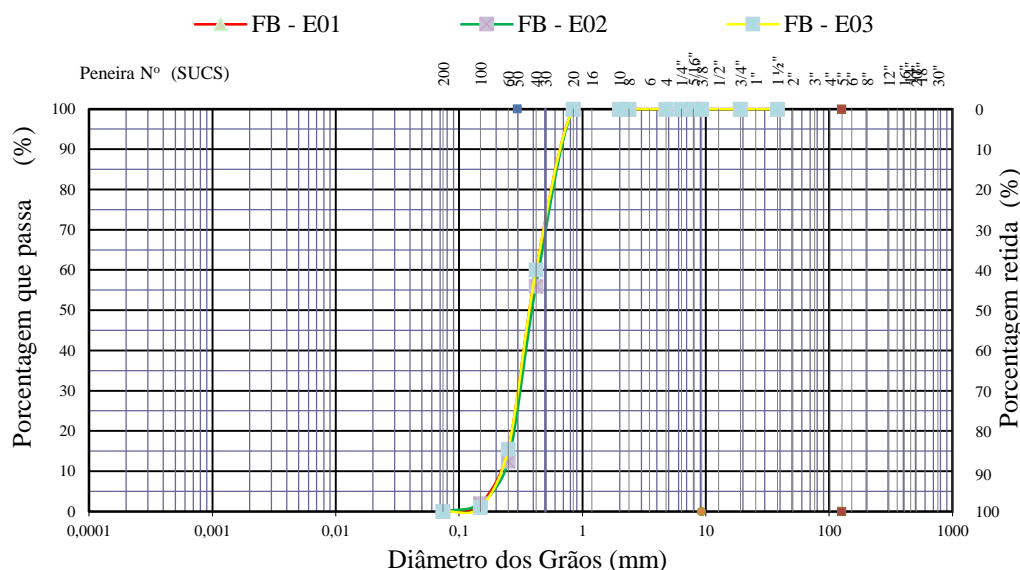


Figura 29 – Curvas granulométricas determinadas em três ensaios (Simões, 2015)

No que se refere à densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ), Simões (2015) obteve um valor igual a 2,659. Tal resultado aliado à ausência de reação química em presença de ácido clorídrico e à inspeção microscópica levou a conclusão de que a Areia da Praia de Ipanema é constituída basicamente de grãos de quartzo. Segundo Simões (2015), os formatos dos grãos variam de subangular a arredondado.

Simões (2015) comparou diferentes métodos para a obtenção dos índices de vazios mínimo e máximo da Areia da Praia de Ipanema. O índice de vazios máximo foi encontrado segundo o método proposto por Kolbuszewski (1948), obtendo o valor de 0,732. O índice de vazios mínimo foi obtido pelo método de pluviação sobre peneiras (Miura & Toki, 1982) utilizando um funil de 10 mm, obtendo o valor de 0,461.

Simões (2015) realizou ensaios de cisalhamento direto na Areia da Praia de Ipanema, em corpos de prova moldados em três diferentes domínios de

compacidade relativa (CR), identificados como domínio fofo ( $CR_{\text{médio}} = 32\%$ ), domínio medianamente compacto ( $CR_{\text{médio}} = 60\%$ ) e domínio compacto ( $CR_{\text{médio}} = 88\%$ ). Os ensaios foram realizados com dez diferentes tensões normais nominais aplicadas, compreendidas entre 25 e 1250 kPa.

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam, para os corpos de prova moldados nos domínios fofo, medianamente compacto e compacto, respectivamente, os valores dos índices de vazios de moldagem e após a aplicação da tensão normal (antes do cisalhamento), dos deslocamentos horizontais relativos na ruptura, das tensões normais ( $\sigma_{ff}$ ) e cisalhantes ( $\tau_{ff}$ ) no plano de ruptura, na ruptura, dos coeficientes de atrito e dos ângulos de atrito. Esses valores obtidos por Simões (2015) serão comparados mais adiante com os resultados obtidos nos ensaios desta pesquisa.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova fofos (Simões, 2015)

índice de vazios de moldagem	índice de vazios após aplic. tensão normal	Deslocamento $\delta_x$ na ruptura (mm)	$\sigma_{ff}$ (kPa)	$\tau_{ff}$ (kPa)	$\left(\frac{\tau_{ff}}{\sigma_{ff}}\right) = \tan\phi$	$\phi$ (°)
0,656	0,656	2,40	25	16,0	0,64	32,7
0,638	0,637	1,90	50	30,5	0,61	31,4
0,635	0,625	2,40	75	43,5	0,58	30,3
0,642	0,635	2,20	100	57,7	0,58	30,0
0,658	0,646	2,80	150	86,6	0,58	30,0
0,641	0,627	2,20	300	162	0,54	28,5
0,643	0,630	2,40	500	280	0,56	29,0
0,658	0,638	1,90	750	383	0,51	27,1
0,654	0,624	2,80	1000	520	0,52	27,5
0,652	0,625	2,00	1250	675	0,54	28,5



Tabela 2 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova med. Compactos  
(Simões, 2015)

índice de vazios de moldagem	índice de vazios após aplic. tensão normal	Deslocamento $\delta_x$ na ruptura (mm)	$\sigma_{ff}$ (kPa)	$\tau_{ff}$ (kPa)	$\left(\frac{\tau_{ff}}{\sigma_{ff}}\right) = \tan\phi$	$\phi$ (°)
0,561	0,561	0,95	25	20,3	0,81	39,1
0,566	0,566	0,80	50	37,3	0,74	36,7
0,576	0,571	1,30	75	50,3	0,67	33,7
0,568	0,561	1,20	100	65,1	0,65	33,1
0,572	0,559	0,75	150	99,0	0,66	33,4
0,564	0,552	1,60	300	195	0,65	32,9
0,562	0,545	1,10	500	310	0,62	31,7
0,566	0,539	1,00	750	480	0,64	32,7
0,559	0,539	1,00	1000	640	0,64	32,6
0,569	0,543	1,60	1250	775	0,62	31,6

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova compactos (Simões, 2015)

índice de vazios de moldagem	índice de vazios após aplic. tensão normal	Deslocamento $\delta_x$ na ruptura (mm)	$\sigma_{ff}$ (kPa)	$\tau_{ff}$ (kPa)	$\left(\frac{\tau_{ff}}{\sigma_{ff}}\right) = \tan\phi$	$\phi$ (°)
0,493	0,493	0,75	25	23,8	0,95	43,5
0,496	0,494	0,55	50	42,5	0,85	40,5
0,495	0,485	0,80	75	63,8	0,85	40,3
0,494	0,485	0,82	100	82,0	0,82	39,3
0,491	0,482	0,75	150	122	0,81	39,0
0,491	0,479	0,70	300	237	0,79	38,3
0,490	0,470	0,95	500	395	0,79	38,2
0,493	0,472	1,00	750	578	0,77	37,7
0,488	0,459	1,20	1000	770	0,77	37,6
0,495	0,466	1,20	1250	975	0,78	37,9

Ao analisar os resultados obtidos dos ensaios de cisalhamento direto, Simões (2015) destacou que quanto menor o índice de vazios (ou maior a compacidade relativa) e quanto menor a tensão normal nominal aplicada, maior o ângulo de atrito do corpo de prova e maior a dilatação por ele sofrido, revelada nas curvas “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta_v$ ) versus deslocamento horizontal relativo

( $\delta h$ )”, e denunciada também por picos de resistência mais nítidos e acentuados nas curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )”. Simões (2015) também observou que, para um mesmo domínio de compacidade relativa, o aumento da tensão normal nominal, além de diminuir o ângulo de atrito e inibir a dilatação, faz com que o deslocamento relativo horizontal na ruptura aumente.

Simões (2015, p.52) relatou não ter conseguido determinar a curva “tensão normal crítica ( $\sigma'_{cr}$ ) *versus* índice de vazios crítico ( $e_{cr}$ )” para a Areia da Praia de Ipanema, similar à curva “tensão confinante crítica *versus* índice de vazios crítico” obtida a partir de ensaios triaxiais CIDc proposta por Lee & Seed (1967), devido ao fato dos três domínios de compacidade relativa não terem sido o bastante para a obtenção, por interpolação, do índice de vazios crítico associado a cada uma das tensões normais nominais aplicadas. Por esta razão, Simões (2015, p.71) sugeriu como trabalhos futuros a realização de ensaios de cisalhamento em corpos de prova da Areia da Praia de Ipanema com compacidades relativas de 45% e 75%, com o intuito de determinar a curva  $\sigma'_{cr} \times e_{cr}$ .

Dito isso, a presente pesquisa propõe-se a obter o índice de vazios crítico associado a cada uma das dez tensões normais nominais aplicadas por Simões (2015), realizando, para isso, ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova moldados em um número maior de diferentes domínios de compacidade relativa. Desta forma, pretende-se obter a curva “tensão normal crítica ( $\sigma'_{cr}$ ) *versus* índice de vazios crítico ( $e_{cr}$ )” da Areia da Praia de Ipanema.

Simões (2015) suspeitou que, para os corpos de prova moldados no domínio fofo, nos quais as rupturas ocorreram para deslocamentos horizontais relativamente altos, em geral maiores do que 2 mm, o adernamento do *top cap* tenha afetado os resultados dos ensaios, mais propriamente o ângulo de atrito. Por esta razão, Simões (2015, pp.71) sugeriu como trabalhos futuros um estudo mais detalhado do problema do adernamento do *top cap* e sua influência sobre os resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados em corpos de prova fofos.

Sendo assim, a presente pesquisa também visa testar a eficácia de um dispositivo implementado no equipamento de cisalhamento direto, idealizado para impedir o adernamento do *top cap*. Uma vez comprovada a eficácia do funcionamento do dispositivo, investiga-se a influência do impedimento do

adernamento do *top cap* nos resultados obtidos, comparando-os com aqueles obtidos por Simões (2015).

### 3 Programa Experimental

#### 3.1. Considerações Iniciais

O programa de ensaios de laboratório foi planejado tendo como principal objetivo a determinação da curva “tensão vertical (normal) crítica ( $\sigma'_{cr}$ ) *versus* índice de vazios crítico ( $e_{cr}$ )” da Areia da Praia de Ipanema por intermédio de ensaios de cisalhamento direto, complementando o trabalho iniciado por Simões (2015). O programa experimental pode ser dividido nas três etapas a seguir sucintamente descritas.

Inicialmente, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização na amostra da Areia da Praia de Ipanema: análise granulométrica, análise microscópica, densidade relativa dos grãos e índices de vazios máximo e mínimo. Embora os resultados dos ensaios de caracterização tenham sido apresentados por Costa (2020), é importante que seja aqui registrado que o autor desta pesquisa realizou todos estes ensaios em conjunto com aquele autor. Devido à importância destes resultados também para a presente pesquisa, estes são aqui brevemente reapresentados e comparados com aqueles obtidos por Simões (2015).

A segunda etapa envolveu a calibração de todos os instrumentos de medição utilizados nos ensaios de cisalhamento direto, assim como o desenvolvimento do dispositivo utilizado para evitar o adernamento (rotação) do *top cap*, seguido da verificação de seu funcionamento.

Finalmente, a terceira etapa consistiu na realização dos ensaios de cisalhamento direto sob dez diferentes tensões verticais (normais) iniciais, sendo que, para cada uma dessas tensões, foram ensaiados corpos de prova preparados em seis diferentes domínios de compacidades relativas.

Todas as etapas do programa experimental foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Estas etapas são detalhadas nos itens a seguir.

### 3.2.

#### Coleta da amostra da Areia da Praia de Ipanema

A amostra da Areia da Praia de Ipanema utilizada nesta pesquisa foi a mesma amostra utilizada por Costa (2020). A amostra foi coletada no dia 19/02/2019, em frente ao edifício nº 272 da Avenida Vieira Souto, bairro de Ipanema, a uma distância de aproximadamente 50 metros do calçadão, conforme ilustrado na Figura 30. A escolha deste local justifica-se pelo fato de ter sido o mesmo local de coleta da amostra utilizada por Simões (2015).

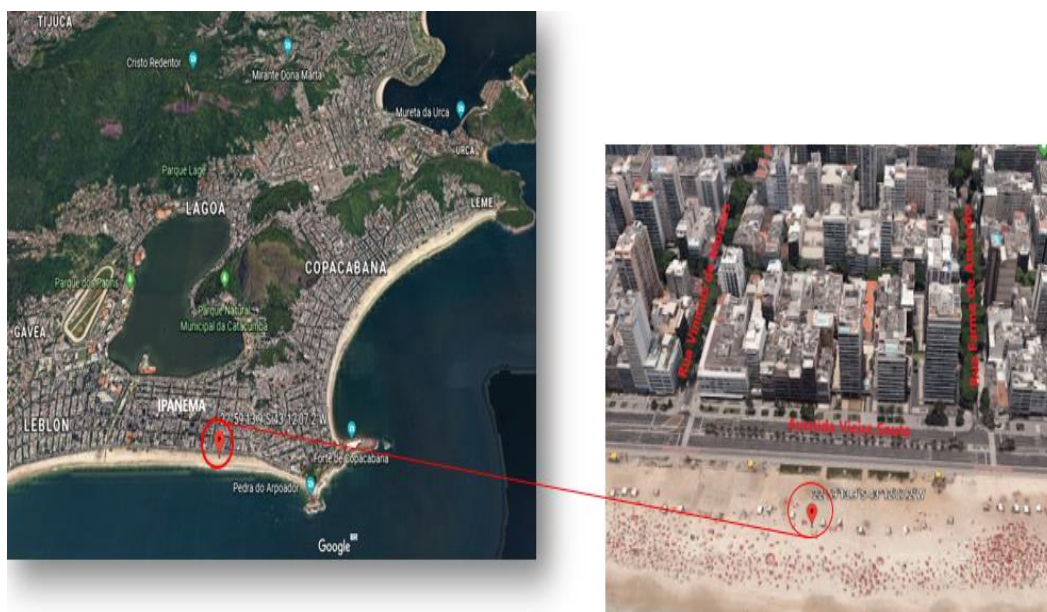


Figura 30 - Amostra coletada da Areia da Praia de Ipanema/RJ (Costa, 2020).

Com o objetivo de minimizar a presença de impurezas, a amostra foi coletada entre as profundidades de 20 e 50 cm da superfície do terreno, aproximadamente. A amostra foi transportada em baldes para o Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

### 3.3.

#### Métodos de ensaio

##### 3.3.1. Lavagem da amostra

No laboratório, a amostra foi inicialmente passada na peneira nº 10 (abertura de malha igual a 2,0 mm), com o objetivo de retirar as impurezas mais grossas, como galhos, folhas, plásticos e bicos de cigarro. Nesta etapa, foi observado que

nenhuma partícula de solo ficava retida na peneira nº 10. Em seguida, a amostra foi colocada em uma estufa com temperatura de 60 °C, com a finalidade de retirar parte de sua umidade natural, já que a amostra encontrava-se bastante úmida por ter sido coletada após um ou dois dias de chuva.

Observado previamente a ausência de partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm, que é abertura da malha da peneira nº 200, com o objetivo de reduzir a concentração de sais na amostra, esta foi lavada em água corrente sobre essa peneira. Em seguida, a amostra foi colocada em recipientes plásticos com tampa, dentro dos quais foi mantida submersa por 24 horas. Durante este período, a amostra era revolvida e a água era trocada a cada 8 horas para retirada de impurezas com peso específico inferior ao peso específico da água, bem como para redução ainda maior da concentração de sais.

Posteriormente, a amostra lavada foi espalhada em bandejas metálicas e colocada novamente na estufa de 60 °C para uma segunda secagem parcial, conforme ilustrado na Figura 31, onde permaneceu por cerca de dois dias. Finalmente, a amostra foi novamente transferida para os recipientes plásticos com tampa para impedir a sua contaminação com as impurezas presentes no ar.



Figura 31 – Amostra colocada na estufa com temperatura de 60 °C (Costa, 2020)

### 3.3.2. Quarteamento da amostra

Antes de qualquer ensaio, parte da areia armazenada em um recipiente era quarteada manualmente com o objetivo de obter uma maior homogeneidade entre as porções extraídas para a realização dos ensaios, garantindo uma melhor representatividade de toda a amostra. Neste processo, uma grande quantidade da amostra era disposta em formato de cone sobre uma bancada previamente limpa e dividida em quatro partes visualmente iguais. Em seguida, duas partes opostas quaisquer eram devolvidas ao recipiente de onde foram retiradas e os outros dois quartos eram juntados para um novo quarteamento. Este processo era repetido até que fosse obtida a quantidade de material próxima do necessário para a realização do ensaio. A Figura 32 ilustra o processo de quarteamento realizado antes de um dos ensaios.



Figura 32 – Quarteamento da amostra (Costa, 2020)

### 3.3.3. Caracterização da amostra

Os seguintes ensaios de caracterização foram realizados na amostra da Areia da Praia de Ipanema:

- Granulometria por peneiramento
- Microscopia eletrônica
- Densidade relativa dos grãos
- Índice de vazios máximo e mínimo.



### 3.3.3.1. Granulometria por peneiramento

A granulometria por peneiramento seguiu as diretrizes da norma ABNT-NBR-7181 - *Solo - Análise Granulométrica*, de setembro de 2016.

A Figura 33 mostra as vinte curvas de distribuição granulométrica obtidas por Costa (2020). Na mesma figura, também constam as três curvas de distribuição granulométrica obtidas por Simões (2015), nomeadas de FB-E01, FB-E02 e FB-E03, e a curva de distribuição granulométrica obtida por Ratton (1993), nomeada de R-01.

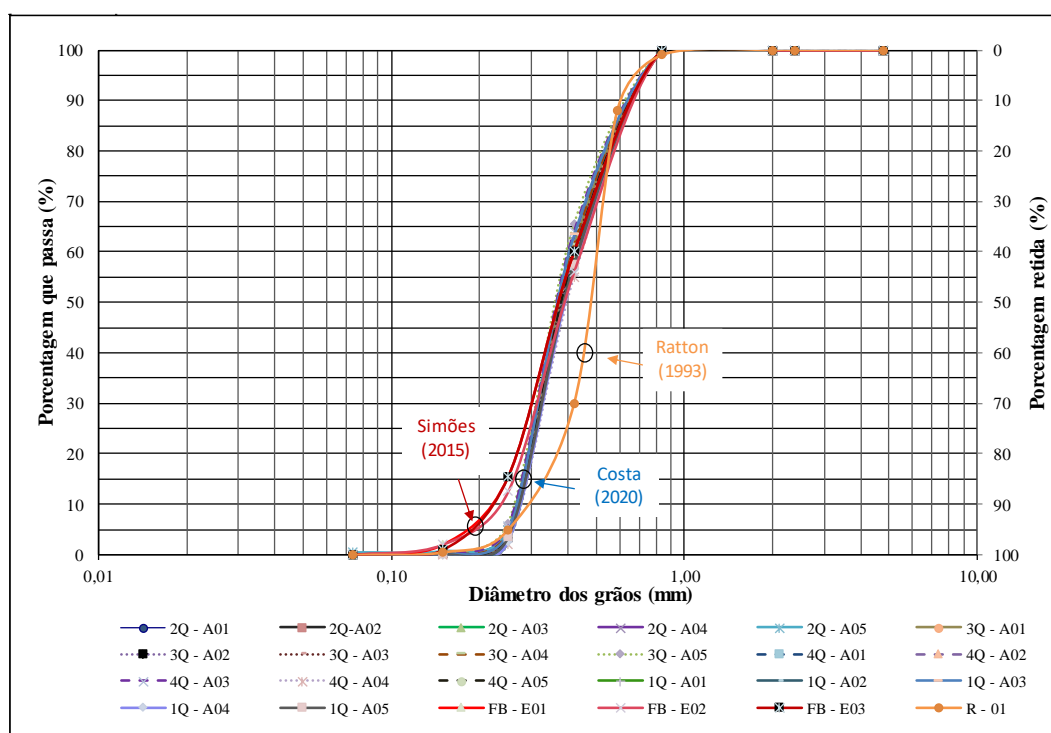


Figura 33 - Granulometria da Areia da Praia de Ipanema (Costa, 2020).

Da Figura 33, observa-se que as vinte curvas granulométricas obtidas por Costa (2020) apresentam boa repetibilidade entre si e são muito próximas das curvas obtidas por Simões (2015), exceto no trecho inferior, onde os dois conjuntos possuem uma divergência na peneira nº 60, cuja abertura de malha é igual a 0,25 mm. Comparado à curva obtida por Ratton (1993), as curvas obtidas por Costa (2020) divergem significativamente daquela na peneira nº 40, cuja abertura de malha é igual a 0,42 mm.



A norma norte-americana ASTM-D2487-17 - *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, de dezembro de 2017, estabelece a seguinte subclassificação dentro da faixa granulométrica areia: a) areia grossa: diâmetros equivalentes compreendidos entre 4,75 mm (peneira nº 4) e 2,00 mm (peneira nº 10); b) areia média: diâmetros equivalentes compreendidos entre 2,00 mm (peneira nº 10) e 0,425 mm (peneira nº 40); c) areia fina: diâmetros equivalentes compreendidos entre 0,425 mm (peneira nº 40) e 0,075 mm (peneira nº 200).

Assim, de acordo com a referida norma, assumindo uma curva granulométrica média representativa das vinte curvas granulométricas obtidas por Costa (2020), a Areia da Praia de Ipanema é composta por 60% de areia fina e 4 % de areia média.

O diâmetro  $D_{60}$  é igual a 0,42 mm, o diâmetro  $D_{50}$  é igual a 0,38 mm, o diâmetro  $D_{30}$  é igual a 0,32 mm e o diâmetro  $D_{10}$  é igual a 0,27 mm, sendo que  $D_{60}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{10}$  são os diâmetros abaixo dos quais se situam 60%, 50%, 30% e 10% em peso dos grãos da amostra.

De posse desses valores, o coeficiente de curvatura ( $C_c$ ), definido pela norma ASTM-D2487-17 como  $(D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ , é igual a 0,90 ao passo que o coeficiente de não uniformidade ( $C_{nu}$ ), definido pela mesma norma como  $D_{60} / D_{10}$ , é igual a 1,56.

Vale ressaltar que embora a razão  $D_{60} / D_{10}$  seja definida pela norma ASTM-D2487-17 e pela norma ABNT-NBR-6502-Rochas e Solos, de setembro de 1995, como “coeficiente de uniformidade” ( $C_u$ ), sabendo-se que quanto maior o valor deste parâmetro mais desuniforme é a areia, o autor desta pesquisa considera que é mais apropriado chamá-lo de “coeficiente de não uniformidade” ( $C_{nu}$ ), conforme denominado também por Pinto (2006).

De acordo com a norma ASTM-D2487-17, para que uma areia seja classificada como “bem graduada” duas condições devem ser atendidas, a saber:  $C_{nu} \geq 6,0$  e  $1,0 \leq C_c \leq 3,0$ . Por outro lado, se  $C_{nu} < 6,0$  e/ou [ $C_c < 1,0$  ou  $C_c > 3,0$ ] então a areia é classificada como “mal graduada”. Assim, de acordo com a norma ASTM-D2487-17 (*Table 1*), a amostra da Areia da Praia de Ipanema analisada por Costa (2020) é simplesmente classificada como *Poorly Graded Sand* (SP), isto é, “Areia mal graduada”.

Uma areia “mal graduada” pode ser classificada ainda como “uniforme” ou “não uniforme” a depender do valor de  $C_{nu}$ . De acordo com Pinto (2006), se uma

areia possui  $C_{nu} < 2,0$  então a areia é dita “uniforme”, caso contrário ( $C_{nu} \geq 2,0$ ) a areia é dita “não uniforme”. Já segundo a norma ABNT-NBR-6502, se  $C_{nu} < 5,0$ , a areia é “uniforme”, se  $5,0 \leq C_{nu} \leq 15,0$ , a areia é “medianamente uniforme” e, se  $C_{nu} > 15,0$ , a areia é “desuniforme”. Baseando-se em qualquer um desses critérios, pode-se dizer que a amostra da Areia da Praia de Ipanema analisada por Costa (2020) é uma areia fina (60 %) e média (40 %), mal graduada e uniforme.

Embora as curvas granulométricas obtidas por Costa (2020) sejam bastante semelhantes às obtidas por Simões (2015), este último autor classificou a Areia da Praia de Ipanema como “areia média, mal graduada e uniforme” simplesmente pelo fato de ter utilizado um outro critério para subclassificar a fração areia. Embora não mencionado por Simões (2015), o critério utilizado deve ter sido o da norma ABNT-NBR-6502, que estabelece que a faixa areia grossa é constituída por grãos com diâmetros equivalentes compreendidos entre 2,00 mm e 0,60 mm, a faixa areia média é constituída por grãos com diâmetros equivalentes compreendidos entre 0,60 mm e 0,20 mm e a faixa areia fina é constituída por grãos com diâmetros equivalentes compreendidos entre 0,20 mm e 0,06 mm.

### 3.3.3.2. Densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) do solo

A densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) é definida como a razão entre o peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) e o peso específico da água destilada ( $\gamma_w$ ) na temperatura de 4 °C. Esta grandeza foi determinada pelo ensaio de picnômetro, seguindo o que preconiza a norma ABNT-NBR 6508 - *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação de massa específica*, de outubro de 1984. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos por Costa (2020), utilizando picnômetros de 500 ml.

Tabela 4 – Densidade relativa dos grãos (Costa, 2020).

Picnômetro n <sup>o</sup>	1	2	3	4	5
Volume nominal do frasco (cm <sup>3</sup> , ml)	500	500	500	500	500
Temperatura (°C)	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
Peso específico da água na temperatura do ensaio (gf/cm <sup>3</sup> )	0,9975	0,9975	0,9975	0,9975	0,9975
Peso <sub>picnômetro + água</sub> (gf)	638,80	638,62	639,98	661,92	643,27
Peso seca do solo (gf)	60,02	60,19	60,11	60,00	60,04
Peso <sub>picnômetro + água + solo</sub> (gf)	676,24	676,19	677,57	699,32	680,82
Peso de água deslocada - M <sub>wd</sub> (gf)	22,58	22,62	22,52	22,60	22,49
Volume de água deslocada - V <sub>wd</sub> (cm <sup>3</sup> )	22,64	22,68	22,58	22,66	22,55
Volume de solo seco - V <sub>s</sub> (cm <sup>3</sup> )	22,64	22,68	22,58	22,66	22,55
Peso específico dos grãos - $\rho_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	2,651	2,654	2,662	2,648	2,663
<b>Média do peso específico dos grãos - <math>\rho_s</math> média (gf/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,656</b>				
Densidade relativa dos grãos (G <sub>s</sub> )	2,651	2,654	2,662	2,648	2,663
<b>Média da densidade relativa dos grãos (G<sub>s</sub> médio)</b>	<b>2,656</b>				

Da Tabela 4, observa-se que o valor da densidade relativa dos grãos obtido por Costa (2020) é igual a 2,656. Este valor é muito próximo do valor obtido por Simões (2015), igual a 2,659. Ambos os valores são muito próximos da densidade relativa do quartzo, igual a 2,65 (ver Lambe & Whitman, 1979, p. 30).

### 3.3.3.3. Microscopia eletrônica e formato dos grãos

Da inspeção visual por meio de microscópio eletrônico, Costa (2020) observou que a Areia da Praia de Ipanema é composta majoritariamente por grãos de quartzo, conforme mostram as imagens microscópicas apresentadas na Figura 34. Na amostra analisada, foi possível observar também a presença de algumas partículas de biotita e feldspato, bem como algumas conchas.

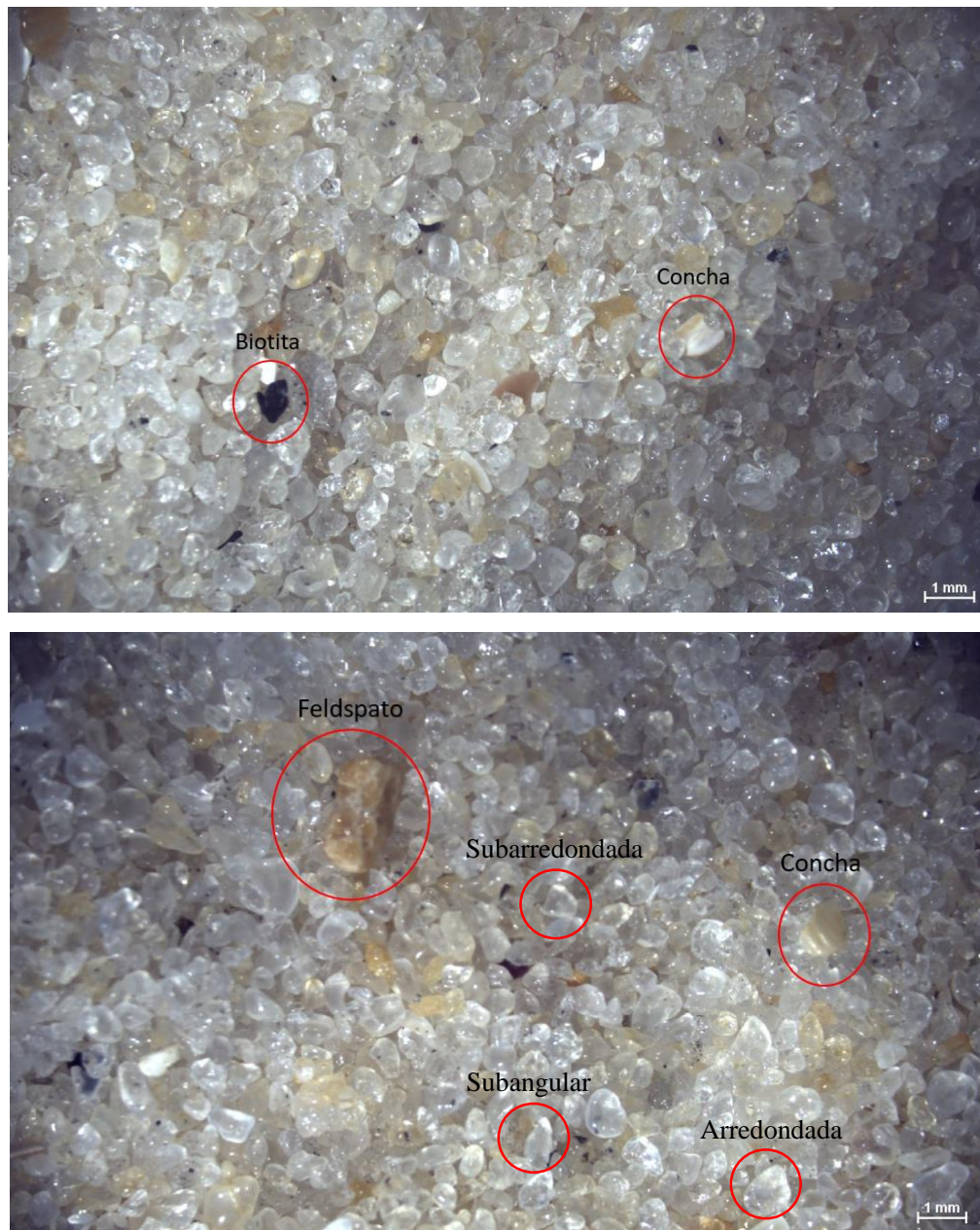


Figura 34 - Imagens microscópicas da Areia da Praia de Ipanema (Costa, 2020).

Da imagem microscópica (Figura 34), observa-se que a Areia da Praia de Ipanema tem predominância de partículas subangulares, subarredondadas e arredondadas, com base na classificação proposta por Pettijohn (1949) *apud* Lambe & Whitman (1979, p. 45). Esta análise está em consonância com a análise feita por Simões (2015).

De acordo com o ábaco proposto por Krumbein & Slurry (1963) *apud* Cho et al. (2006), a esfericidade (S) e o arredondamento (R) parecem ser iguais a 0,7 e 0,5, respectivamente.

### 3.3.3.4. Índice de Vazios Máximo

Para a determinação do índice de vazios máximo da Areia da Praia de Ipanema foram adotadas e avaliados os resultados de quatro metodologias, descritas sucintamente a seguir. Todos os procedimentos encontram-se detalhadamente descritos em Costa (2020).

A primeira metodologia empregada para a avaliação do índice de vazios máximo correspondeu ao método “A” da norma ASTM-D4254-16 - *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*, de março de 2016.

O método consiste na pluviação direta do solo dentro de um molde cilíndrico com o auxílio de um funil. O volume do funil deve ser, no mínimo, 1,5 vezes o volume do molde dentro do qual o solo é depositado. A norma indica que o funil deve ter um tubo acoplado à sua boca com comprimento de cerca de 15 cm e, pelo fato do diâmetro máximo dos grãos da amostra da Areia da Praia de Ipanema ser menor do que 4,8 mm, diâmetro igual a 1,3 cm, conforme ilustrado na Figura 35. O solo deve ser depositado no molde mantendo um afastamento entre a extremidade inferior do tubo e o topo do solo depositado de cerca de 13 mm, de forma a garantir um fluxo ininterrupto das partículas do solo, realizando um movimento ascendente e helicoidal do funil, das bordas para o centro do molde (Figura 35). Um colarinho é posicionado sobre o molde para posterior arrasamento do solo junto ao topo do molde.

O ensaio foi realizado utilizando dois cilindros de volumes diferentes como molde, sendo que um era o cilindro Proctor Normal, com volume de 1000,08 cm<sup>3</sup>, ao passo que o outro tinha um volume de 3234,82 cm<sup>3</sup> (Costa, 2020).

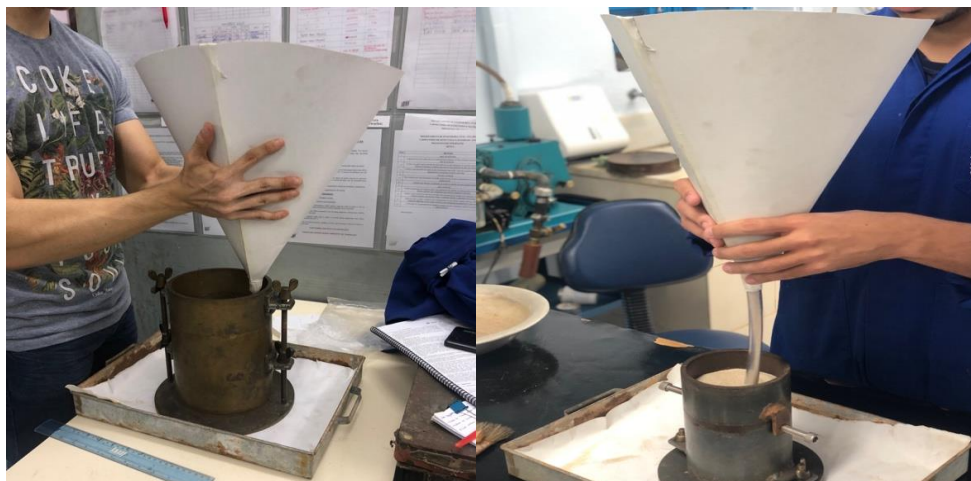


Figura 35 - Execução do método “A” da norma ASTM-D4254-16 para determinação do índice de vazios máximo (Costa, 2020).

A Tabela 5 apresenta os valores de índices de vazios (e) obtidos por Costa (2020) em dez determinações efetuadas com cada um dos moldes seguindo o método A da norma ASTM-D4254-16.

O valor médio de índice de vazios (e) obtido com o cilindro Proctor Normal (volume igual  $1000,08 \text{ cm}^3$ ) foi igual 0,662, sendo o maior valor obtido igual a 0,684 (em negrito na Tabela 5).

Já o valor médio de índice de vazios (e) obtido com o cilindro de volume de  $3234,82 \text{ cm}^3$  foi igual a 0,658, sendo maior o valor obtido igual a 0,670 (em negrito na Tabela 5).

Tabela 5 – Índices de vazios obtidos pelo método “A” da norma ASTM-D4254-16 (Costa, 2020).

Ensaio Nº	Volume do molde	
	$1000,08 \text{ cm}^3$	$3234,82 \text{ cm}^3$
	Índice de vazios (e)	
1	0,682	0,654
2	0,679	<b>0,670</b>
3	<b>0,684</b>	0,654
4	0,658	<b>0,670</b>
5	0,649	0,639
6	0,639	0,654
7	0,660	<b>0,670</b>
8	0,654	0,639
9	0,658	<b>0,670</b>
10	0,653	0,654
Média	0,662	0,658



O índice de vazios máximo do material também foi avaliado de acordo com a método “B” da norma ASTM-D4254-16.

Este método consiste no preenchimento de um tubo de parede delgada com solo posicionado no interior do molde (cilindro Proctor Normal) e sua rápida extração, fazendo com que o solo preencha completamente o molde, conforme ilustrado na Figura 36. Segundo a referida norma, o diâmetro interno do tubo deve ser 0,7 vezes o diâmetro do molde e o seu volume deve ser de 1,25 a 1,30 vezes o volume do molde.

Neste método, foi utilizado como molde um cilindro Proctor Normal, com volume igual a 1000,08 cm<sup>3</sup>, e um tubo de PVC com 75 mm de diâmetro interno e 314,9 mm de comprimento (Costa, 2020).



Figura 36 - Execução do método “B” da norma ASTM-D4254-16 para determinação do índice de vazios máximo (Costa, 2020).

A Tabela 6 apresenta os valores de índices de vazios (e) obtidos por Costa (2020) em dez determinações seguindo o método “B” da norma ASTM-D4254-16.

O valor médio de índice de vazios (e) obtido foi igual a 0,751, enquanto que o maior valor obtido foi igual a 0,760 (em negrito na Tabela 6).

Tabela 6 - Índices de vazios obtidos pelo método “B” da norma ASTM-D4254-16 (Costa, 2020).

Ensaio Nº	Índice de vazios (e)
1	<b>0,760</b>
2	0,755
3	0,754
4	0,751
5	0,749
6	0,749
7	0,746
8	0,749
9	0,747
10	0,745
Média	0,751

Costa (2020) também avaliou o índice de vazios máximo segundo o método “C” da norma ASTM-D-4254-16.

Este método consiste na colocação de um peso de 1000 gf (peso = 9,81 N) de areia seca ao ar no interior de uma proveta graduada com volume de 2000 ml. Em seguida, tampa-se a boca da proveta, vira-se a proveta rapidamente de cabeça para baixo e volta-se a proveta à posição inicial, conforme ilustrado na Figura 37.

Costa (2020) também avaliou o índice de vazios máximo seguindo esta mesma metodologia, porém utilizando uma proveta graduada de 1000 ml.



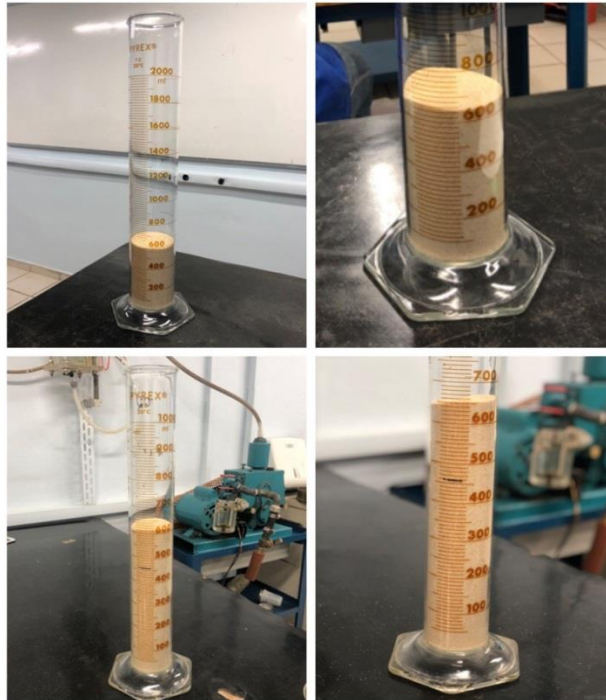


Figura 37 - Execução do método “C” da norma ASTM-D4254-16 para determinação do índice de vazios máximo (Costa, 2020).

A Tabela 7 apresenta os valores de índice de vazios ( $e$ ) obtidos por Costa (2020) em dez determinações efetuadas com cada uma das duas provetas utilizadas, a de volume de 1000 ml e a de volume de 2000 ml.

O valor médio de índice de vazios ( $e$ ) obtido com a proveta de 1000 ml foi igual 0,720, sendo o maior valor obtido igual a 0,741 (em negrito na Tabela 7).

Já o valor médio de índice de vazios ( $e$ ) obtido com a proveta de 2000 ml foi igual a 0,746, sendo o maior valor obtido igual a 0,754 (em negrito na Tabela 7).

Tabela 7 - Índices de vazios obtidos pelo método “C” da ASTM-D4254-16 (Costa, 2020).

Ensaio Nº	Volume da proveta	
	1000 ml	2000 ml
	Índice de vazios (e)	
1	0,701	<b>0,754</b>
2	0,701	0,728
3	0,714	<b>0,754</b>
4	0,701	<b>0,754</b>
5	0,714	0,728
6	0,728	<b>0,754</b>
7	<b>0,741</b>	0,727
8	<b>0,741</b>	<b>0,754</b>
9	0,728	<b>0,754</b>
10	0,728	<b>0,754</b>
Média	0,720	0,746

Na tentativa de obter índices de vazios ainda maiores do que aqueles obtidos pelos métodos “A”, “B” e “C” da norma ASTM-D4254-16, Costa (2020) realizou ainda o método da queda livre idealizado por Simões (2015), inspirado em um dos métodos descritos por Kolbuszewski (1948).

O método da queda livre idealizado por Simões (2015) consiste na pluviação do solo sobre um molde (cilindro Proctor Normal) posicionado 6 cm abaixo de um funil de onde o solo cai em queda livre, conforme ilustrado no esquema da Figura 38.

Primeiramente, o funil é preenchido com solo tendo a sua extremidade inferior tampada com uma placa rígida. Em seguida, retira-se a placa realizando um movimento horizontal rápido, permitindo que a areia caia em queda livre sobre o molde, preenchendo-o totalmente, conforme ilustrado na Figura 39. Após a deposição do material no molde, este é arrasado junto ao topo do molde para a obtenção do índice de vazios.

Costa (2020) realizou este procedimento utilizando três funis com abertura inferior de diferentes diâmetros iguais a 80 mm, 90 mm e 100 mm.

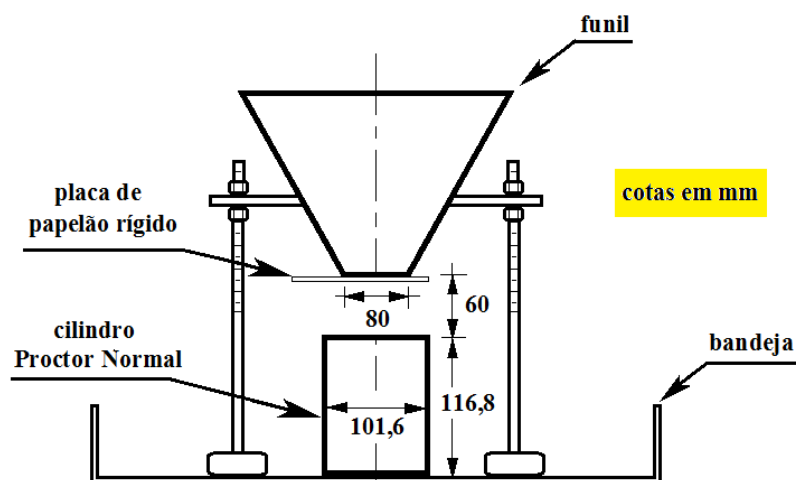


Figura 38 – Esquema da determinação do índice de vazios máximo pelo método da queda livre idealizado por Simões (2015) (Simões, 2015).



Figura 39 - Execução do método da queda livre idealizado por Simões (2015) para obtenção do índice de vazios máximo (Costa, 2020).

A Tabela 8 apresenta os valores dos índices de vazios ( $e$ ) obtidos por Costa (2020) em dez determinações realizadas para cada um dos três funis utilizados, com diâmetros da abertura inferior iguais a 80 mm, 90 mm e 100 mm.

O valor médio de índice de vazios ( $e$ ) obtido com o funil de 80 mm foi igual a 0,733, sendo o maior valor obtido igual a 0,736 (em negrito na Tabela 8).

O valor médio de índice de vazios obtido com o funil de 90 mm foi igual a 0,726, sendo o maior valor obtido igual a 0,732 (em negrito na Tabela 8).

O valor médio de índice de vazios obtido com o funil de 100 mm foi igual a 0,713, sendo o maior valor máximo igual a 0,719 (em negrito na Tabela 8).

Tabela 8 - Índices de vazios obtidos pelo método da queda livre idealizado por Simões (2015)  
(Costa, 2020).

Ensaio Nº	Abertura do funil		
	80 mm	90 mm	100 mm
	Índice de vazios (e)		
1	0,728	<b>0,732</b>	0,705
2	<b>0,736</b>	0,724	0,710
3	0,730	0,724	<b>0,719</b>
4	0,734	0,725	0,714
5	0,733	0,729	0,708
6	0,735	0,731	<b>0,719</b>
7	0,733	0,721	0,718
8	0,735	0,731	0,715
9	0,733	0,724	0,713
10	0,732	0,723	0,713
Média	0,733	0,726	0,713

Com base em todos os valores de índice de vazios obtidos de todas as determinações efetuadas segundo os quatro métodos avaliados por Costa (2020), assume-se que o valor de índice de vazios máximo ( $e_{\text{máx}}$ ) da amostra da Areia da Praia de Ipanema estudada nesta pesquisa é igual a 0,760, que corresponde ao maior valor determinado segundo o método “B” da norma ASTM-D4254-16 (Tabela 6). Assim sendo, este valor é o adotado como índice de vazios máximo ( $e_{\text{máx}}$ ) para o cálculo das compacidades relativas (CR) dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto desta pesquisa.

Vale ressaltar ainda que este valor é superior ao valor de índice de vazios máximo determinado por Simões (2015), igual a 0,732.

### 3.3.3.5. Índice de Vazios Mínimo e Índice de Vazios Intermediários

Para a determinação do índice de vazios mínimo da amostra da Areia da Praia de Ipanema foram realizadas três metodologias e comparados os resultados das mesmas, descritas sucintamente a seguir. Todos os procedimentos adotados encontram-se detalhadamente descritos por Costa (2020).

A primeira das metodologias adotadas foi o método da pluviação sobre peneiras, idealizado por Miura & Toki (1982). Este método consiste na pluviação da amostra de areia sobre um molde, passando por uma determinada sequência de peneiras, o que provoca um fluxo uniforme com a aparência de uma “chuva de areia”, conforme ilustrado na Figura 40.

Nos ensaios realizados por Costa (2020), o funil era preenchido com a areia seca ao ar em quantidade suficiente para o total preenchimento de um cilindro Proctor Normal (molde) com colarinho, tendo a sua extremidade inferior tampada com uma placa rígida. Em seguida, retirava-se a placa realizando um movimento horizontal rápido, permitindo que a areia caísse, passando pela sequência de peneiras, e preenchesse o cilindro. Após a deposição do solo no cilindro, o colarinho era retirado, o topo da areia era arrasado junto ao topo do molde e o conjunto cilindro mais solo era pesado para o cálculo do índice de vazios obtido.

Seguindo esta metodologia, Costa (2020) obteve também índices de vazios intermediários, entre o índice de vazios mínimo e o índice de vazios máximo, variando o diâmetro da abertura inferior dos funis, tal como fora realizado por Simões (2015).



Figura 40 – Execução do método da pluviação sobre peneiras (Miura & Toki, 1982) para obtenção do índice de vazios mínimo e intermediários (Costa, 2020).

A Tabela 9 apresenta os valores dos índices de vazios ( $e$ ) obtidos por Costa (2020) em dez determinações realizadas para cada um dos onze funis utilizados, com diâmetros de abertura inferior variando de 5 mm a 100 mm. Estes valores são apresentados em círculos vermelhos na Figura 41. A Tabela 9 apresenta também, para cada abertura de funil, a média dos valores de índice de vazios obtidos nas dez determinações realizadas.

A Figura 41 apresenta a curva “índice de vazios *versus* diâmetro da abertura do funil” traçada por Costa (2020) a partir dos dados da Tabela 9. A curva passa pelo valor médio de índices de vazios de cada abertura de funil. A fim de comparação, a Figura 42 também apresenta a curva “índice de vazios *versus* diâmetro da abertura do funil” traçada por Simões (2015) seguindo o mesmo critério.

Da Tabela 9 e das curvas obtidas por Costa (2020) e Simões (2015), apresentadas na Figura 41, nota-se que quanto menor o diâmetro da abertura do funil, menor o índice de vazios obtido. A propósito, o menor valor de índice de vazios obtidos por Costa (2020) seguindo esta metodologia foi igual a 0,459 (destacado em negrito na Tabela 9), obtido em cinco determinações com o funil de diâmetro de 5 mm, sendo que o valor médio de todas as determinações realizadas

com este funil foi igual a 0,460. Já com o funil de abertura de diâmetro igual a 10 mm, o valor médio obtido foi de 0,465, com valor mínimo igual a 0,464, obtido em três determinações.

Da Figura 41, destaca-se também a semelhança entre as curvas obtidas pelos dois autores supracitados, o que revela uma boa reprodutibilidade dos resultados dos ensaios, os quais foram realizados com amostras diferentes (retiradas do mesmo local), em laboratórios (equipamentos) diferentes e por operadores diferentes.

Vale frisar ainda que os dois conjuntos de resultados revelam que a dispersão dos índices de vazios obtidos para cada abertura de funil foi maior para maiores diâmetros de abertura do funil.

Tabela 9 - Índices de vazios obtidos pelo método da pluviação sobre peneiras (Costa, 2020).

Ensaio Nº	Diâmetro da abertura do funil (mm)										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	0,464	0,468	0,474	0,489	0,518	0,574	0,599	0,651	0,680	0,681	0,690
2	0,462	0,465	0,474	0,487	0,516	0,577	0,609	0,639	0,679	0,683	0,679
3	0,461	0,464	0,474	0,488	0,519	0,564	0,610	0,645	0,685	0,688	0,695
4	0,460	0,465	0,473	0,493	0,521	0,575	0,606	0,649	0,687	0,691	0,687
5	0,460	0,464	0,473	0,489	0,522	0,562	0,614	0,647	0,686	0,680	0,689
6	<b>0,459</b>	0,465	0,473	0,491	0,516	0,568	0,600	0,686	0,683	0,688	0,673
7	<b>0,459</b>	0,465	0,473	0,493	0,524	0,560	0,606	0,671	0,683	0,683	0,690
8	<b>0,459</b>	0,465	0,473	0,489	0,521	0,564	0,609	0,644	0,691	0,682	0,686
9	<b>0,459</b>	0,465	0,473	0,488	0,522	0,571	0,613	0,652	0,689	0,681	0,679
10	<b>0,459</b>	0,464	0,473	0,490	0,517	0,588	0,606	0,647	0,683	0,688	0,686
Média	0,460	0,465	0,473	0,490	0,520	0,570	0,607	0,653	0,684	0,684	0,685

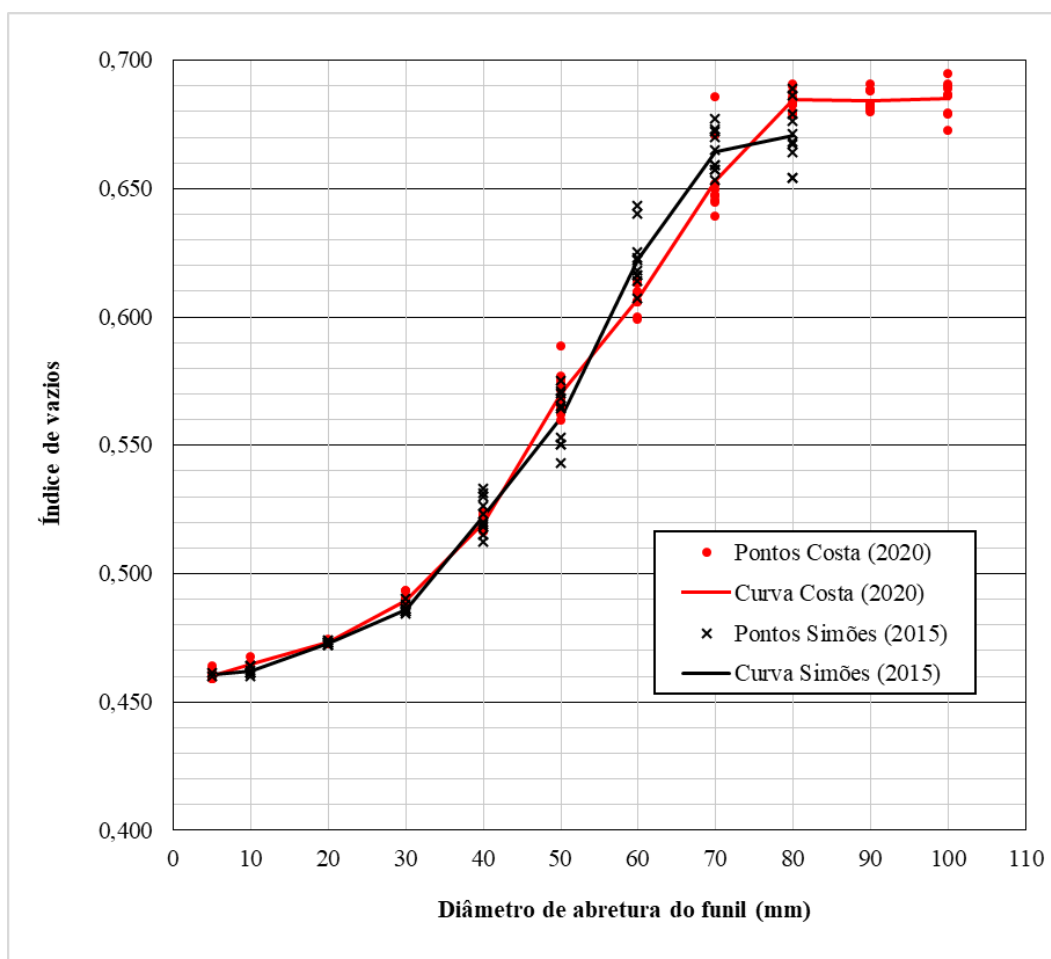


Figura 41 – Curvas “índice de vazios *versus* diâmetro da abertura do funil” obtidas pelo método de pluviação sobre peneiras por Costa (2020) e por Simões (2015), utilizando como molde o cilindro Proctor Normal (modificado de Costa, 2020).

Costa (2020) realizou ainda a determinação de índices de vazios pelo método da pluviação sobre peneiras com um outro molde cilíndrico de menores dimensões, a saber, altura de 108,3 mm, diâmetro de 38,3 mm, e, portanto, volume igual a 124,75 cm<sup>3</sup>. Estas eram as mesmas dimensões dos corpos de prova dos ensaios de permeabilidade realizados por Costa (2020) em um permeâmetro de parede flexível.

A Tabela 10 apresenta os valores dos índices de vazios (*e*) obtidos por Costa (2020) em dez determinações realizadas para cada um dos dez funis utilizados, com diâmetros de abertura inferior variando de 10 mm a 100 mm. Para este molde não foi utilizado o funil de abertura com diâmetro de 5 mm.

O menor valor de índice de vazios obtidos por Costa (2020) seguindo esta metodologia foi igual a 0,435 (destacado em negrito na Tabela 10), obtido em uma determinação com o funil de diâmetro de 10 mm, sendo que o valor médio de todas as determinações realizadas com este funil foi igual a 0,439.



Tabela 10 - Índices de vazios obtidos pelo método da pluviação sobre peneiras com molde cilíndrico de volume 124,75 cm<sup>3</sup> (Costa, 2020).

Ensaio N°	Diâmetro da abertura do funil (mm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	0,440	0,449	0,458	0,481	0,523	0,544	0,584	0,617	0,623	0,615
2	0,441	0,449	0,466	0,476	0,509	0,567	0,575	0,615	0,619	0,613
3	0,441	0,448	0,463	0,487	0,525	0,543	0,573	0,615	0,615	0,612
4	0,442	0,452	0,459	0,484	0,511	0,546	0,581	0,618	0,620	0,612
5	0,438	0,451	0,461	0,486	0,529	0,556	0,583	0,618	0,619	0,618
6	0,436	0,449	0,460	0,479	0,531	0,569	0,577	0,597	0,613	0,612
7	<b>0,435</b>	0,448	0,459	0,482	0,516	0,565	0,581	0,614	0,606	0,617
8	0,436	0,449	0,461	0,488	0,508	0,551	0,576	0,598	0,601	0,614
9	0,440	0,450	0,458	0,475	0,507	0,548	0,584	0,601	0,609	0,615
10	0,436	0,447	0,457	0,474	0,528	0,550	0,572	0,603	0,621	0,610
<b>Média</b>	<b>0,439</b>	<b>0,449</b>	<b>0,460</b>	<b>0,481</b>	<b>0,519</b>	<b>0,554</b>	<b>0,579</b>	<b>0,610</b>	<b>0,615</b>	<b>0,614</b>

O índice de vazios mínimo da Areia da Praia de Ipanema também foi avaliado por Costa (2020) seguindo um procedimento baseado no método *Geolabs in-house*, idealizado por Blaker *et al.* (2015), porém com uma série de modificações.

O método adotado por Costa (2020) consistiu em preencher com a amostra de areia seca ao ar o cilindro Proctor Normal (molde) com colarinho, segundo o método de pluviação sobre peneiras (Miura & Toki, 1982), descrito acima. Para isso, Costa (2020) utilizou funis com aberturas de diâmetro de 5 e 10 mm.

Em seguida, na tentativa de reduzir ainda mais os índices de vazios obtidos no método de pluviação sobre peneiras, Costa (2020) aplicava uma tensão vertical uniformemente distribuída estática de 12,5 kPa sobre a areia e vibrava o conjunto no agitador de peneiras mantendo a tensão vertical aplicada, conforme ilustrado na Figura 42. A vibração tende a propiciar uma melhor acomodação das partículas da areia no molde, reduzindo o índice de vazios. Após a vibração do conjunto, o colarinho era retirado e o solo era arrasado junto ao topo do molde para pesagem do conjunto e posterior cálculo do índice de vazios.

Para manter a carga vertical aplicada na areia durante a vibração, o travessão do agitador de peneiras era minimamente forçado contra os pesos colocados sobre a amostra (Figura 42), o que deve ter acrescido levemente a tensão aplicada.

Costa (2020) utilizava sempre a mesma frequência de vibração que, embora não tenha sido medida, correspondia ao valor 1 da escala de 1 a 10 no agitador da *Solotest*, sem saber a correspondência da escala em Hertz, e um tempo de vibração de 10 minutos.



Figura 42 - Execução do método baseado no *Geolabs in-house* (Blaker *et al.*, 2015), porém com uma série de modificações, para obtenção do índice de vazios mínimo (Costa, 2020).

A Tabela 11 apresenta os valores dos índices de vazios ( $e$ ) obtidos por Costa (2020) em dez determinações realizadas para cada um dos dois funis utilizados na moldagem inicial do corpo de prova pelo método de pluviação sobre peneiras, sendo um com diâmetro de abertura de 5 mm e outro com 10 mm.

O valor médio de índice de vazios ( $e$ ) obtido com os corpos de prova moldados inicialmente com o funil de 5 mm foi igual 0,456, sendo o menor valor igual a 0,454 (em negrito na Tabela 11), obtido em uma determinação.

Já o valor médio de índice de vazios obtido com os corpos de prova moldados inicialmente com o funil de 10 mm foi igual a 0,459, sendo o menor valor igual a 0,457 (em negrito na Tabela 11), obtido em duas determinações.

Comparando-se os dados da Tabela 11 com os da Tabela 9, conclui-se, portanto, que para ambos os funis (com diâmetros de 5 mm e de 10 mm), o método de aplicar uma tensão vertical sobre a amostra e vibrá-la após a pluviação sobre peneiras propiciou de fato uma redução no índice de vazios.

Tabela 11 - Índices de vazios obtidos pelo método baseado no *Geolabs in-house*, porém com uma série de modificações (Costa, 2020).

Ensaio N°	Diâmetro da abertura do funil	
	5 mm	10 mm
	Índice de vazios (e)	
1	0,457	0,463
2	0,456	0,460
3	0,460	0,458
4	<b>0,454</b>	0,460
5	0,456	0,459
6	0,456	0,458
7	0,456	0,460
8	0,455	<b>0,457</b>
9	0,456	<b>0,457</b>
10	0,455	0,458
Média	0,456	0,459

Costa (2020) aplicou ainda uma terceira metodologia para avaliação do índice de vazios mínimo, conhecida por método NGI (*Norwegian Geotechnical Institute*), também idealizado por Blaker *et al.* (2015).

Seguindo o que preconiza o método, a areia era depositada em camadas de pequenas espessuras em um cilindro Proctor Normal (molde) até que o topo da última camada ultrapassasse a base do colarinho posicionado sobre o cilindro. Após a deposição de cada camada, o conjunto cilindro mais solo era vibrado no agitador de peneiras sob uma tensão vertical uniformemente distribuída estática de 4,2 kPa, por um intervalo de 30 segundos, promovendo a compactação do material, conforme ilustrado na Figura 43. Ao ultrapassar a base do colarinho, este era retirado e o solo era arrasado junto ao topo do molde para pesagem do conjunto e posterior cálculo do índice de vazios.

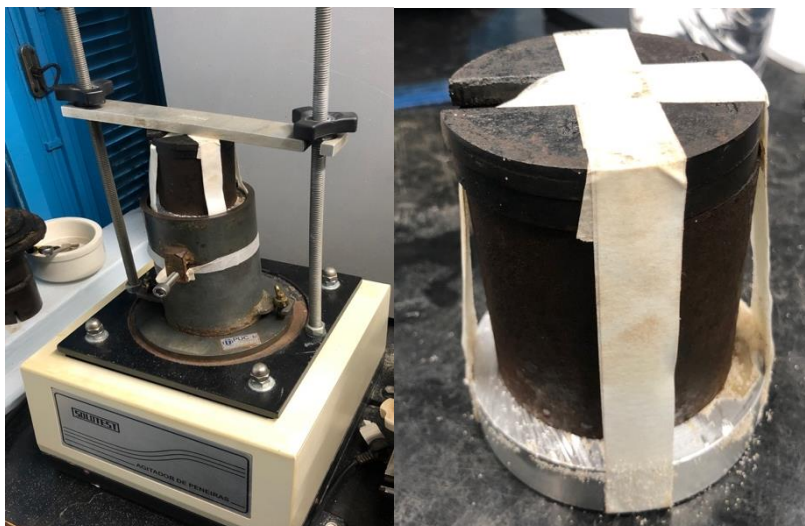


Figura 43 – Execução do método NGI (Blaker *et al.*, 2015) para obtenção do índice de vazios mínimo (Costa, 2020).

A Tabela 12 apresenta os valores de índices de vazios ( $e$ ) obtidos por Costa (2020) em dez determinações seguindo o método NGI.

O valor médio obtido para o índice de vazios ( $e$ ) foi igual a 0,520, enquanto que o menor valor obtido foi igual a 0,498, destacado em negrito na Tabela 12.

Tabela 12 - Índices de vazios obtidos pelo método NGI (Costa, 2020).

Ensaio Nº	Índice de vazios ( $e$ )
1	0,572
2	0,566
3	0,514
4	0,513
5	<b>0,498</b>
6	0,505
7	0,512
8	0,513
9	0,501
10	0,500
Média	0,520

Com base em todos os valores de índice de vazios obtidos de todas as determinações efetuadas nos métodos avaliados por Costa (2020), assume-se que o valor de índice de vazios mínimo ( $e_{\min}$ ) da Areia da Praia de Ipanema é igual a 0,435, que corresponde ao menor valor determinado segundo o método da

pluviação sobre peneiras utilizando um cilindro de 124,75 cm<sup>3</sup> como molde. Portanto, este valor é o adotado como índice de vazios mínimo ( $e_{\min}$ ) para o cálculo das compacidade relativas (CR) dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto desta pesquisa.

Vale ressaltar ainda que este valor é inferior ao valor de índice de vazios mínimo determinado por Simões (2015), igual a 0,461.

### 3.3.4. Ensaios de Cisalhamento Direto

Não existe uma norma brasileira que normatize o ensaio de cisalhamento direto. De uma forma geral, os ensaios realizados nesta pesquisa foram executados seguindo as diretrizes da Norma ASTM - D3080/D3080M-11 - *Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions*.

Todos os ensaios foram executados no mesmo equipamento, no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

As Figuras 44 e 45 apresentam o equipamento utilizado, que era composto pelos seguintes itens:

- **Motor**, que empurrava a caixa externa com velocidade de deslocamento constante;
- **Caixa externa**, que se deslocava sobre esferas de aço posicionadas sobre dois trilhos paralelos;
- **Caixa interna (caixa de cisalhamento)**, com dimensões internas de 5,08 cm de comprimento, 5,08 cm de largura e 4,62 cm de altura, dividida em duas metades segundo um plano horizontal, uma superior e outra inferior, posicionada dentro da caixa externa e dentro da qual era moldado o corpo de prova;
- Duas **placas ranhuradas e perfuradas**, uma posicionada na base da caixa interna, sobre a qual era moldado o corpo de prova, e outra posicionada sobre o topo do corpo de prova moldado;
- **Top cap**, posicionado sobre a placa ranhurada posicionada sobre o topo do corpo de prova;
- **Dispositivo de bloqueio da rotação do top cap**, fixado no topo da metade superior da caixa interna, idealizado por Domingos (2019) e confeccionado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

- **Pistão**, fixado no *top cap*, e **bilha de aço**, posicionada sobre o pistão;
- **Pendural**, com **braço de alavanca**, pratos e pesos, apoiado sobre a bilha do pistão do *top cap*, para aplicação da força normal (vertical) ao corpo de prova;

A Figura 44 mostra a instrumentação utilizada no equipamento, composta por:

- **Transdutor de deslocamento vertical**, para medição do deslocamento vertical do *top cap*;
- **Transdutor de deslocamento horizontal**, para medição do deslocamento horizontal da caixa externa;
- **Anel dinanométrico**, instrumentado com *strain gauges*, para medição da força horizontal estabelecida entre as metades cisalhadas do corpo de prova;
- **Sistema de aquisição de dados**, composto por módulo, microcomputador e *software* de aquisição de dados.

Não foram utilizadas pedras porosas nos ensaios de cisalhamento direto.

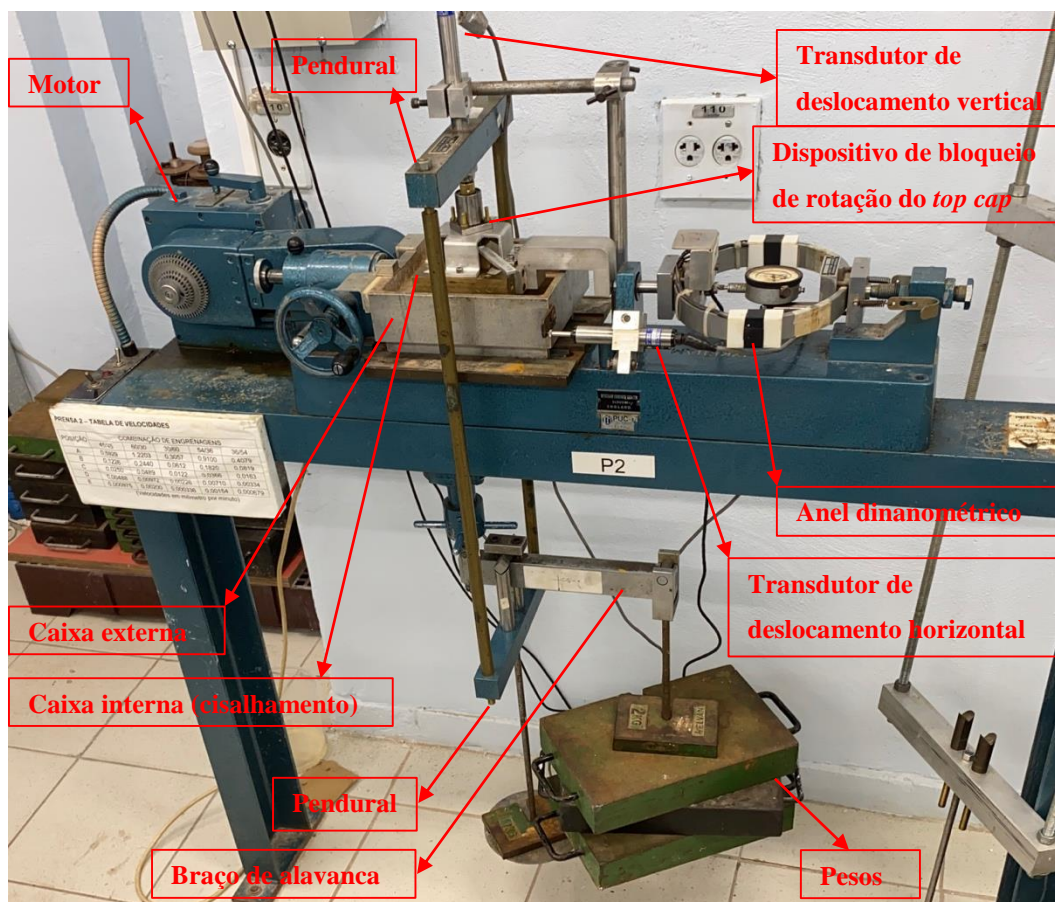


Figura 44 – Equipamento de cisalhamento direto montado no LGMA da PUC-Rio



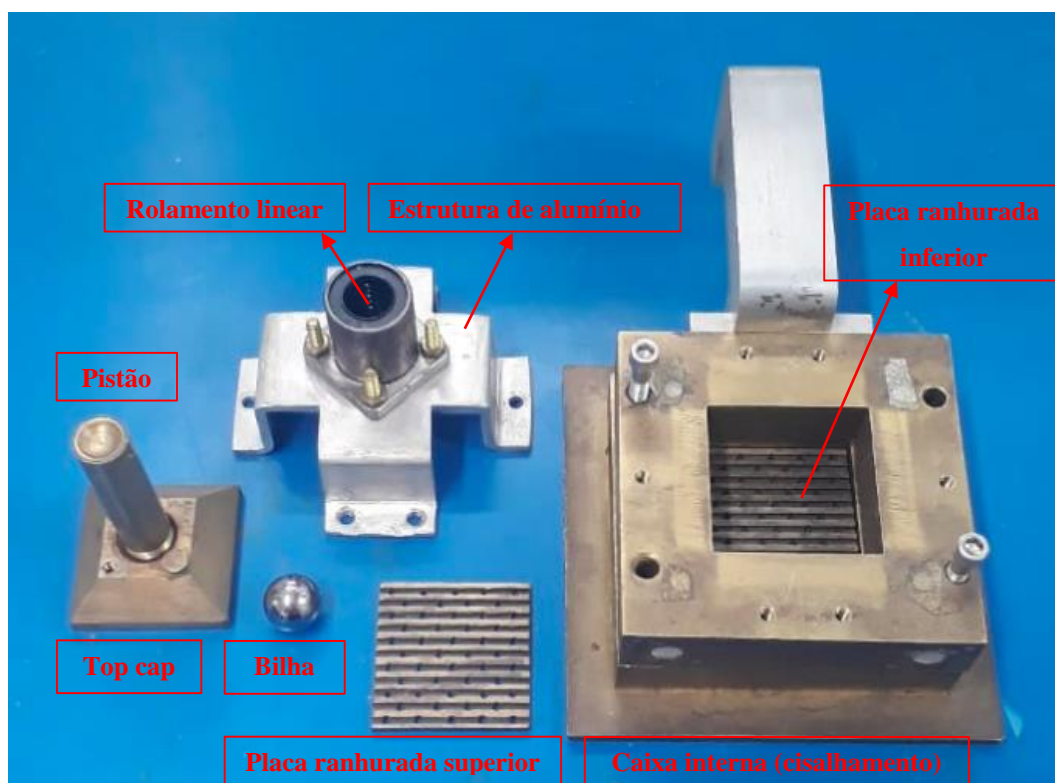


Figura 45 – Itens utilizados no equipamento de cisalhamento direto

O princípio de funcionamento do ensaio de cisalhamento direto encontra-se detalhadamente explicado no item 2.1.5. Primeiramente, aplica-se a tensão normal (vertical) nominal ao corpo de prova para, em seguida, promover o cisalhamento do mesmo. Para cisalhar o corpo de prova, o motor empurra a caixa externa na direção horizontal com velocidade de deslocamento constante. A metade inferior da caixa interna desloca-se solidariamente à caixa externa, ao passo que a metade superior da caixa interna reage contra o anel dinamométrico, permanecendo parada. Desta forma, o deslocamento horizontal relativo entre as duas metades da caixa interna cisalha o corpo de prova nela contido. Ademais, a magnitude da força horizontal registrada pelo anel dinamométrico corresponde à magnitude da força cisalhante estabelecida entre as partes superior e inferior do corpo de prova.

Durante o cisalhamento, em diferentes instantes de tempo, registram-se leituras do anel dinamométrico, do transdutor de deslocamento vertical e do transdutor de deslocamento horizontal para cálculo da força cisalhante horizontal, do deslocamento vertical do *top cap* e do deslocamento horizontal relativo entre as partes cisalhadas do corpo de prova, respectivamente.

De posse dessas leituras, são traçadas as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )”.

Os ensaios de cisalhamento direto desta pesquisa foram realizados em corpos de prova preparados em seis diferentes domínios de compacidade relativa (CR). Para cada domínio de compacidade relativa, foram realizados ensaios de cisalhamento direto com os seguintes valores de tensão normal (vertical) nominal (em kPa): 25, 50, 75, 100, 150, 300, 500, 750, 1000 e 1250. Essas tensões normais nominais foram as mesmas aplicadas por Simões (2015). Em razão de alguns ajustes de peso, para algumas das tensões, foram aplicadas tensões verticais levemente diferentes. A Tabela 13 apresenta as tensões (kPa) aplicadas aos corpos de prova e as respectivas forças verticais (kgf) utilizadas para os cálculos feitos neste trabalho.

Tabela 13 – Tensões e forças verticais aplicadas aos corpos de prova durante os ensaios de cisalhamento direto.

<b>Tensão Vertical (kPa)</b>	<b>Força Vertical (kgf)</b>
25,16	6,62
50	13,2
75	19,7
100,3	26,4
150	39,5
300,2	79,0
500	132
750	197
1000	263
1250	329

Em todos os ensaios de cisalhamento direto foi empregada uma velocidade de deslocamento da caixa externa igual a 0,1226 mm/min, ajustada nas engrenagens do motor do equipamento de cisalhamento direto.

O dispositivo confeccionado para impedir a rotação (adernamento) do *top cap* consistia em um rolamento linear flangeado da marca 4Hobby, de diâmetro interno de 16 mm, aparafusado em uma estrutura de alumínio em forma de cruz, que, por sua vez, era aparafusada na metade superior da caixa interna na montagem de cada



ensaio de cisalhamento direto, conforme mostra a Figura 46. O pistão era previamente rosqueado no *top cap* e passava por dentro do rolamento linear quando a estrutura de alumínio era aparafusada na metade superior da caixa interna. Sobre o pistão era colocada a bilha de aço e sobre a bilha era apoiado o pendural.

Desta forma, a eventual rotação do *top cap* durante a fase de cisalhamento do ensaio era impedida pelo dispositivo fixado na metade superior da caixa interna, garantindo, portanto, que o movimento do *top cap* fosse exclusivamente vertical.

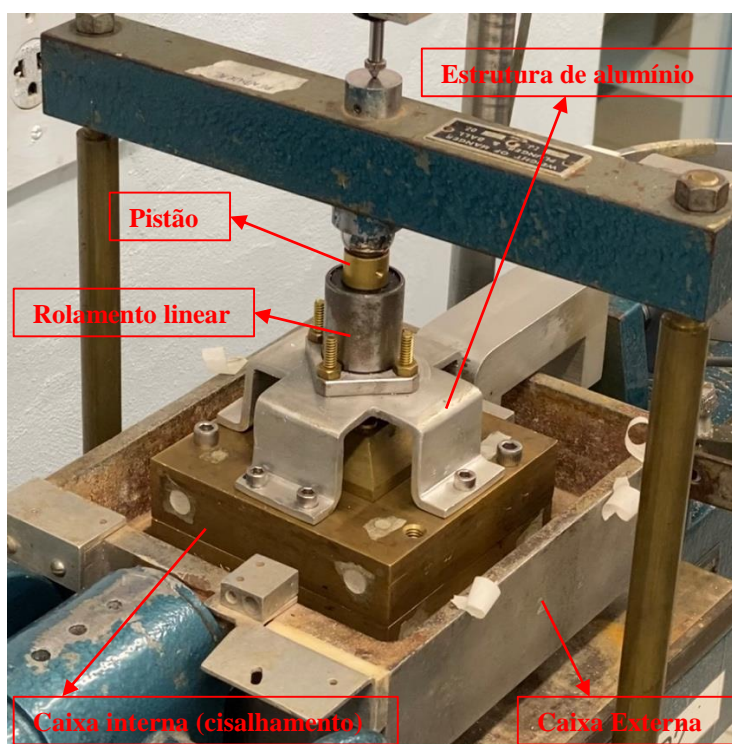


Figura 46 – Dispositivo fixado na metade superior da caixa interna desenvolvido para impedir o adernamento do *top cap*.

### Quantificação do atrito entre o pistão do *top cap* e o rolamento linear

Antes da realização dos ensaios de cisalhamento direto, alguns testes foram realizados para quantificar o atrito estático e dinâmico entre o pistão do *top cap* e o rolamento linear.

Para isso, uma célula de carga submersível de capacidade de 1,0 kN, utilizada em ensaios triaxiais e previamente calibrada, foi posicionada sobre o prato de uma prensa triaxial, conforme mostra a Figura 47a. Um adaptador foi confeccionado para acoplar o pistão do *top cap* à célula de carga. Assim, o pistão foi fixado sobre

a célula de carga, a bilha de aço sobre o pistão e um pendural com peso de cerca de 6,0 kgf sobre a bilha. A partir de então, com a prato da prensa parado, foram aplicados quatro incrementos de carga de 20 kgf ao pendural, registrando-se as correspondentes leituras de força da célula de carga no sistema de aquisição de dados. Cada carga era mantida durante cerca de 10 minutos. Estes valores são apresentados na primeira coluna (à direita) da Tabela 14.

Em seguida, exatamente o mesmo procedimento foi repetido, porém com o pistão passando por dentro do rolamento linear aparafusado na estrutura de alumínio em cruz, que, por sua vez, era aparafusada sobre uma viga de alumínio fixada nas hastes verticais da prensa triaxial, conforme mostra a Figura 47b. As leituras das forças registradas pela célula de carga constam na segunda coluna (coluna do meio) da Tabela 14.

A terceira coluna da Tabela 14 apresenta os percentuais do carregamento resistido por atrito estático entre o pistão e o rolamento linear em relação às forças lidas pela célula de carga sem o rolamento.

Tabela 14 – Quantificação do atrito estático entre o pistão do *top cap* e o rolamento linear.

<b>Força lida na célula de carga (kgf)</b>		<b>Atrito (%)</b>
<b>Sem rolamento</b>	<b>Com rolamento</b>	
26,44	26,14	1,13
46,50	46,12	0,81
66,51	66,12	0,58
86,54	86,11	0,49

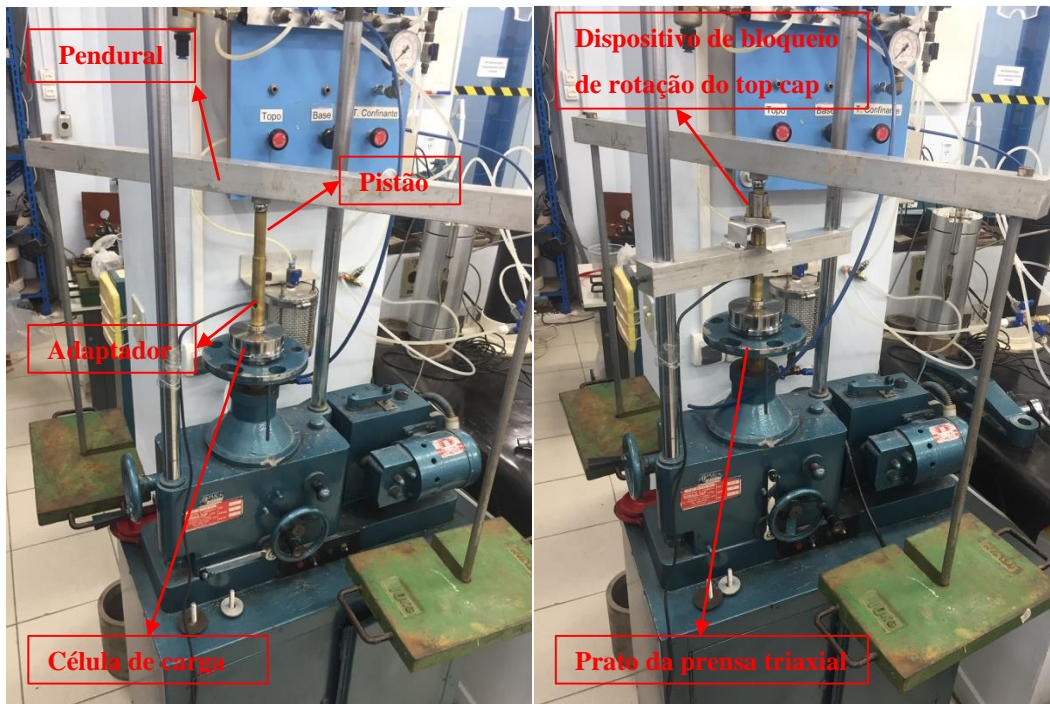


Figura 47 – Quantificação do atrito estático e dinâmico entre o pistão e o rolamento linear; (a) aplicação de força à célula de carga sem o rolamento linear; (b) com o rolamento linear.

Para a quantificação do atrito dinâmico, o rolamento linear permanecia imóvel, fixado na viga de alumínio, enquanto o prato da prensa, a célula de carga e o pistão deslocavam-se na direção vertical, de baixo para cima, com uma velocidade constante ajustada no motor da prensa.

Nesta etapa, foram aplicados somente dois carregamentos, que permaneciam atuando por um período de 30 minutos cada. Foram determinadas as parcelas do carregamento resistidas por atrito dinâmico entre o pistão e o rolamento linear para duas velocidades de deslocamento do prato da prensa ( $v$ ), a saber: 0,0163 mm/min e 0,1219 mm/min.

A Tabela 15 apresenta os percentuais de carregamento resistido por atrito dinâmico entre o pistão e o rolamento linear em relação às forças lidas pela célula de carga sem o rolamento, para ambas as velocidades testadas.

Tabela 15 – Quantificação do atrito dinâmico entre o pistão do *top cap* e o rolamento linear.

<b>v = 0,0163 mm/min</b>		
<b>Força lida na célula de carga (kgf)</b>		
<b>Sem rolamento</b>	<b>Com rolamento</b>	<b>Atrito (%)</b>
<b>46,48</b>	46,24	0,51
<b>86,55</b>	86,02	0,61
<b>v = 0,1219 mm/min</b>		
<b>Força lida na célula de carga (kgf)</b>		
<b>Sem rolamento</b>	<b>Com rolamento</b>	<b>Atrito (%)</b>
<b>46,52</b>	46,36	0,35
<b>86,63</b>	86,61	0,02

Das Tabelas 14 e 15, observa-se que, como era esperado, o atrito estático é maior que o atrito dinâmico. Ademais, observa-se que a maior perda percentual de carregamento por atrito medida correspondeu ao atrito estático do carregamento de 26,44 kgf, igual a 1,13 %, notando-se, ainda, que há uma tendência de aumento da perda percentual por atrito estático com a diminuição do carregamento (Tabela 14). A menor carga vertical nominal aplicada nos ensaios de cisalhamento direto foi de cerca de 6,37 kgf, correspondente a uma tensão normal nominal de 25 kPa (0,2549 kgf/cm<sup>2</sup>) aplicada numa área de corpo de prova de cerca de 25 cm<sup>2</sup> (5 cm x 5 cm). Embora não se tenha medido o atrito estático para este carregamento (que corresponderia praticamente ao peso do próprio pendural), fazendo-se uma retro-extrapolação dos dados da Tabela 14, estima-se uma perda percentual por atrito estático de cerca de 1,45 % sob este carregamento, que ainda assim é bastante pequena. Assim, os resultados mostram que o dispositivo elaborado para impedir a rotação do *top cap* no ensaio de cisalhamento direto pode ser utilizado sem perda da confiabilidade da carga vertical nominal aplicada ao corpo de prova.

### Calibração dos instrumentos de medição

As calibrações de todos os instrumentos de medição utilizados no equipamento de cisalhamento direto foram realizadas sob a mesma temperatura dos ensaios de cisalhamento, igual a  $21 \pm 2$  °C, e com o mesmo sistema de aquisição de

dados (módulo, microcomputador e *software*) utilizados nos ensaios de cisalhamento direto, tendo sempre todos os transdutores conectados ao módulo.

Foi utilizado um módulo da marca HBM, modelo Quantum X, MX 840B, conectado a um microcomputador. Durante todos os procedimentos de calibração, as leituras eletrônicas dos transdutores eram registradas no *software CatmanAP V5.02*.

A Tabela 16 apresenta um resumo das características e funções dos instrumentos de medição utilizados no equipamento do ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 16 – Características e funções dos instrumentos de medição.

Instrumento de medição	Marca / identificação	Capacidade	Grandeza medida
Transdutor de deslocamento	Wykeham Farrance / HS25-5625	25 mm	Deslocamento horizontal da caixa externa
Transdutor de deslocamento	Wykeham Farrance / HS25-5630	25 mm	Deslocamento vertical do <i>top cap</i>
Anel dinamométrico (*)	Wykeham Farrance / 5429	500 kgf	Força horizontal exercida pela metade superior da caixa interna no anel dinamométrico
Anel dinamométrico (*)	Wykeham Farrance / 5371	150 kgf	

(\*) Em alguns ensaios foi utilizado o anel de 500 kgf, enquanto que em outros foi utilizado o anel de 150 kgf.

#### a) Transdutores de deslocamento

A calibração dos transdutores de deslocamento foi feita com um micrômetro analógico com resolução de 0,001 polegada (0,0254 mm), posicionando frente a frente com o transdutor de deslocamento, conforme mostra a Figura 48. A cada deslocamento imposto ao curso do transdutor e medido no micrômetro, era registrada a leitura eletrônica do transdutor, em mV/V, lida no sistema de aquisição de dados. Para a calibração de cada transdutor, foram realizados três ciclos de extensão/compressão do curso do transdutor.

As Figuras 49 e 50 mostram os pontos obtidos nos três ciclos de calibração dos transdutores de deslocamento horizontal e vertical, respectivamente, assim

como as curvas de calibração obtidas por regressão linear dos pontos efetuada no programa *Excel*, com suas respectivas equações e coeficientes de determinação,  $R^2$ . Das Figuras 49 e 50, observa-se a excelente repetibilidade de ambos os transdutores de deslocamento.

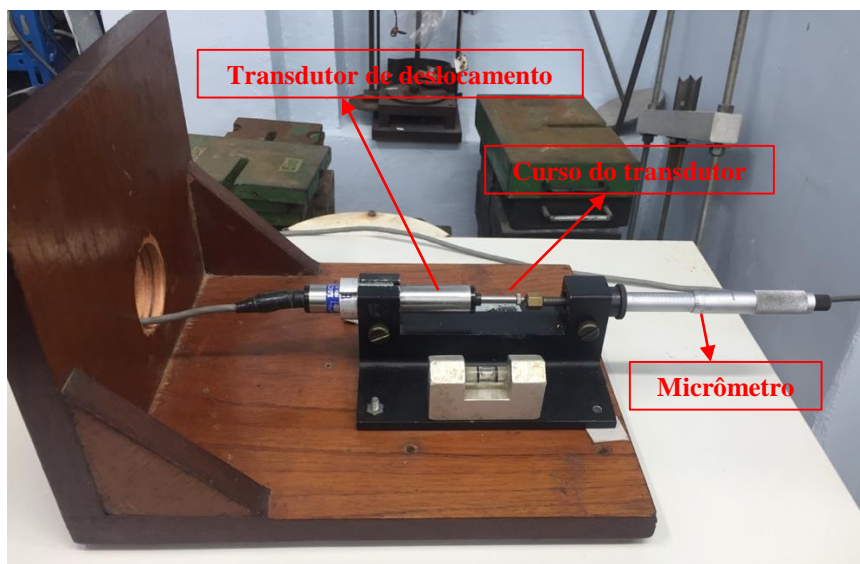


Figura 48 – Calibração dos transdutores de deslocamento.

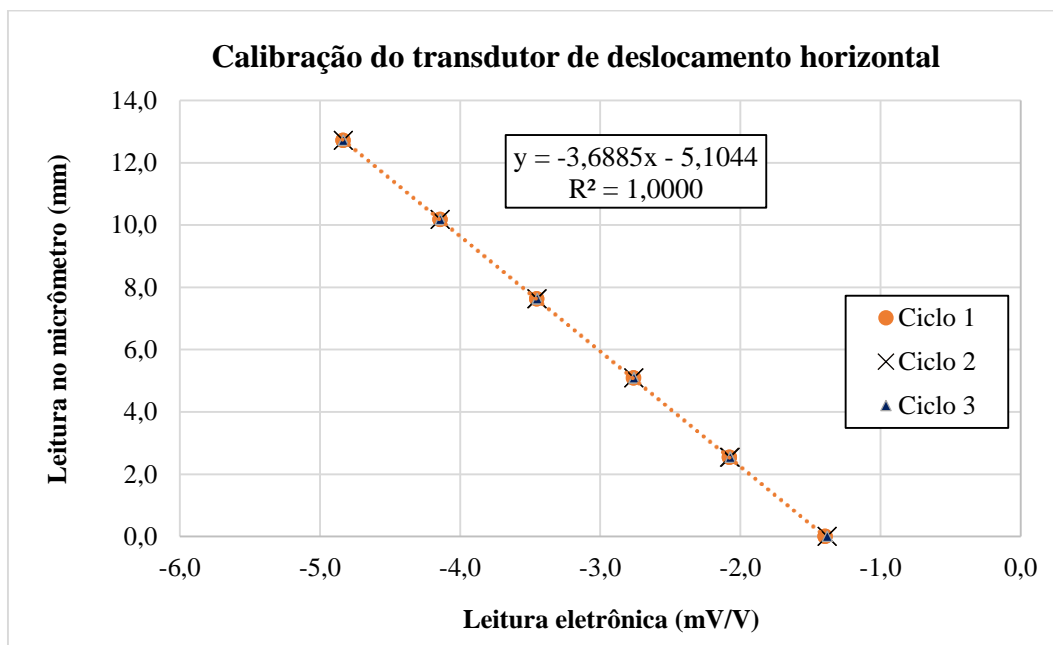


Figura 49 – Curva de calibração do transdutor de deslocamento horizontal.

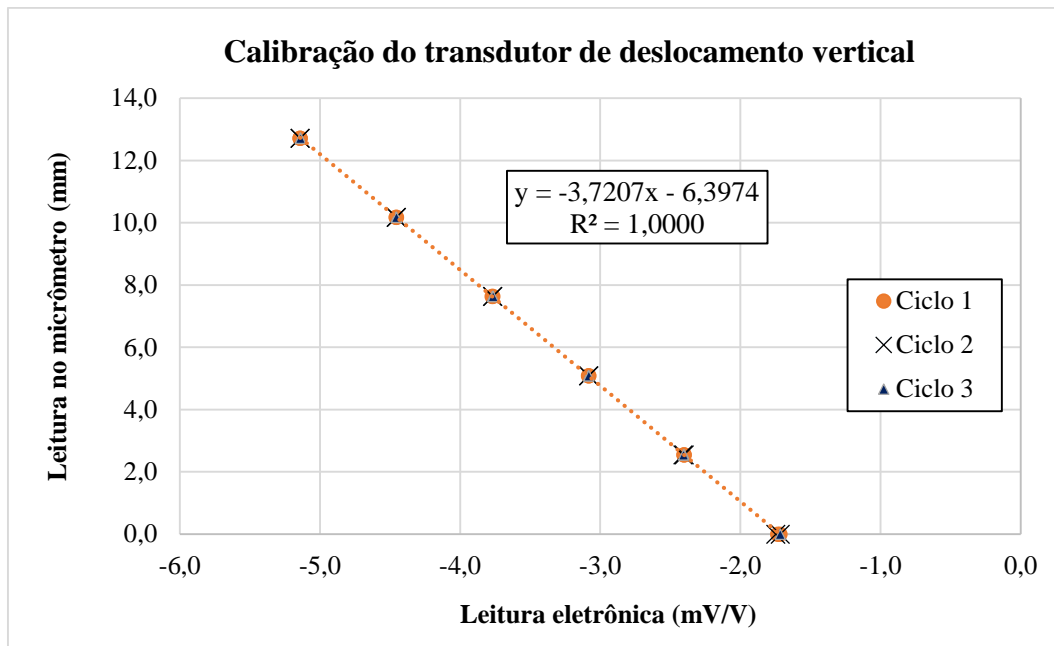


Figura 50 – Curva de calibração do transdutor de deslocamento vertical.

## b) Anel dinanométrico

Devido à grande amplitude das tensões normais nominais aplicadas na campanha de ensaios de cisalhamento direto, de 25 kPa a 1250 kPa, foram utilizados dois anéis dinanométricos com capacidades diferentes na campanha, sendo um de 150 kgf e outro de 500 kgf, a fim de fazer um uso mais amplo do fundo de escala de cada anel, permitindo medir a força cisalhante com maior acurácia. O anel de capacidade de 150 kgf foi utilizado nos ensaios com tensão normal nominal de 25 kPa a 500 kPa, inclusive. Nos demais ensaios, foi utilizado o anel dinanométrico com capacidade de 500 kgf.

Os anéis dinanométricos eram instrumentados com *strain gauges* instalados em posições diametralmente opostas, conforme mostra a Figura 51. Para a calibração do anel de 150 kgf, inicialmente o anel era posicionado na posição vertical e era efetuada a leitura zero (leitura eletrônica dos *strain gauges*) no sistema de aquisição de dados, em mV/V, sem nenhuma carga aplicada sobre o anel. Em seguida, aplicava-se a carga da bilha mais o pendural sobre o anel, que correspondia a um peso de 5,75 kgf, e efetuava-se a segunda leitura eletrônica do anel (*strain gauges*). A partir de então, aplicavam-se sucessivos incrementos de carga de 20 kgf,

seguido por um último incremento de 8 kgf, registrando as respectivas leituras eletrônicas no sistema de aquisição de dados.

Já na calibração do anel de 500 kgf, a primeira leitura efetuada no sistema de aquisição de dados, em mV/V, consistia no anel, posicionado na vertical, carregado com a bilha, o pendural, o braço de alavanca e o prato para apoio dos pesos, o que correspondia a uma carga total aplicada ao anel igual a 15,81 kgf. A partir de então, aplicavam-se sucessivos incrementos de carga de 40 kgf, registrando as respectivas leituras eletrônicas no sistema de aquisição de dados.

A carga máxima aplicada no anel de 150 kgf foi de 113,75 kgf, ao passo que no anel de 500 kgf foi de 335,81 kgf. Em seguida, efetuava-se o descarregamento do anel, registrando as leituras eletrônicas após a retirada de cada incremento de carga, retornando para leitura zero, no caso do anel de 150 kgf, e para a primeira leitura, no caso do anel de 500 kgf. Foram realizados três ciclos de carregamento/d Descarregamento para a calibração do anel dinamométrico de 150 kgf e seis ciclos para a calibração do anel dinamométrico de 500 kgf.

As Figuras 52 e 53 mostram os pontos obtidos em todos os ciclos de calibração dos anéis dinamométricos de 150 kgf e de 500 kgf, respectivamente, assim como as curvas de calibração obtidas por regressão linear dos pontos efetuada no programa *Excel*, com suas respectivas equações e coeficientes de determinação,  $R^2$ . Das Figuras 52 e 53, observa-se a excelente repetibilidade de ambos os anéis dinamométricos.



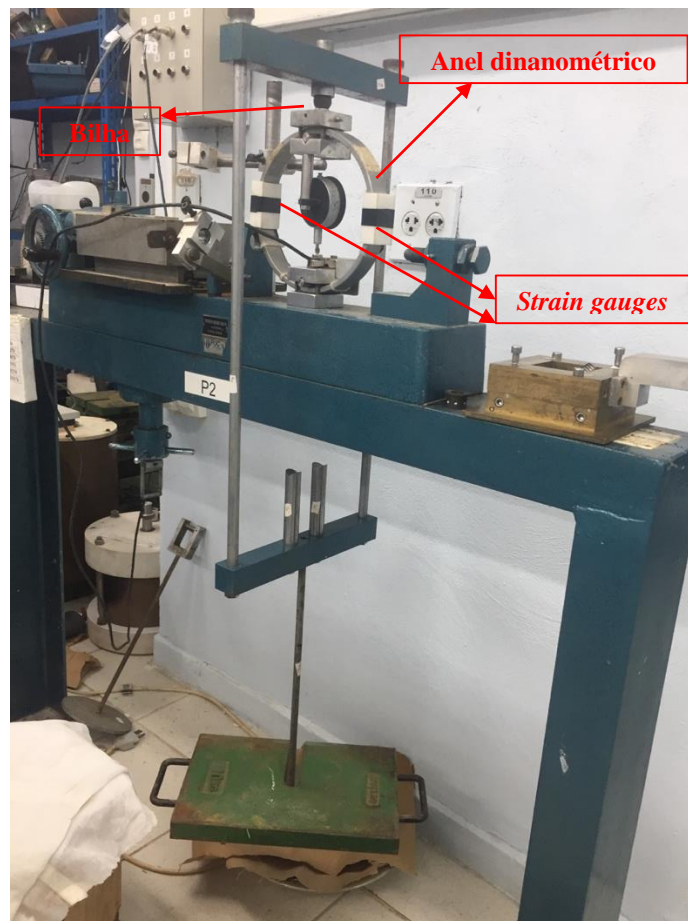


Figura 51 – Calibração do anel dinamométrico de 150 kgf.

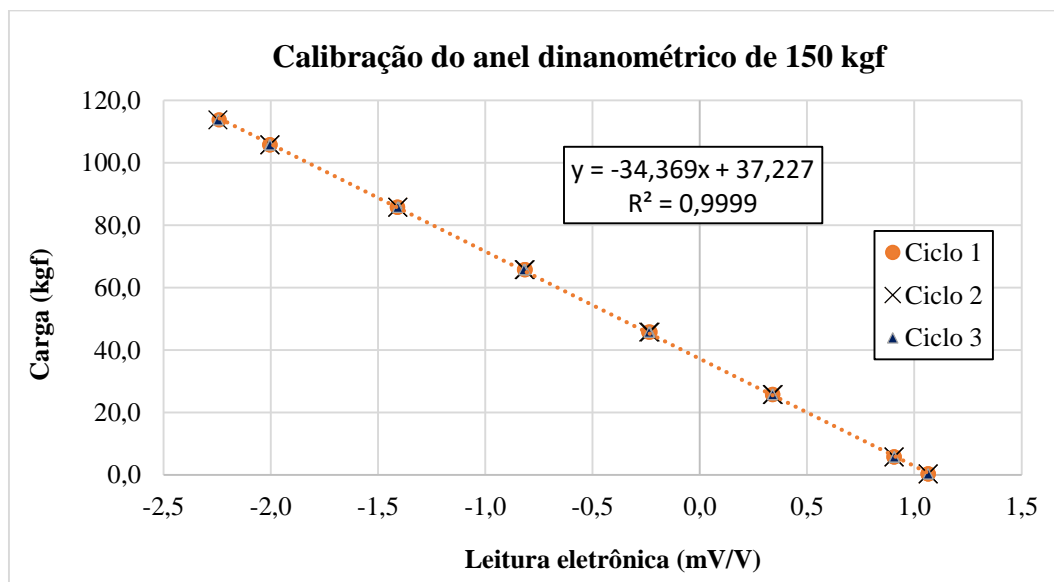


Figura 52 – Curva de calibração do anel dinamométrico de 150 kgf.

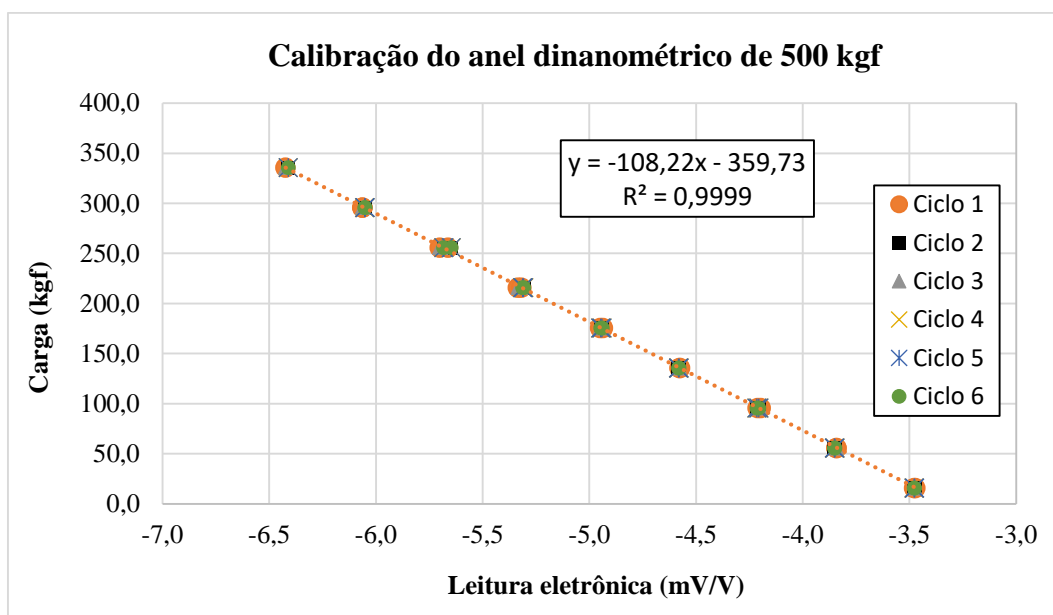


Figura 53 – Curva de calibração do anel dinamométrico de 500 kgf.

### 3.3.5. Preparação dos corpos de prova

A campanha de ensaios de cisalhamento direto foi planejada para ser executada em corpos de prova moldados em seis diferentes domínios de compacidade relativa, variando desde “muito fofo” até “muito compacto”, de acordo com a classificação proposta por Lambe & Whitman (1979, pp. 31, Tabela 3.3), reproduzida na Tabela 17, a seguir.

Tabela 17 – Classificação da compacidade relativa (Lambe & Whitman, 1979)

Compacidade relativa (%)	Classificação de compacidade
0 - 15	Muito fofo
15 - 35	Fofo
35 - 65	Médio
65 - 85	Compacto
85 - 100	Muito compacto

Isto posto, os métodos para preparação dos corpos de prova foram então pré-selecionados com base na experiência adquirida com os diversos métodos aplicados para a obtenção do índice de vazios mínimo, máximo e intermediários da Areia da Praia de Ipanema, descritos nos itens 3.3.3.4 e 3.3.3.5. Não obstante, como já havia

a suspeita de que a forma e o tamanho do molde exerceriam influência no índice de vazios obtido segundo quase todos os métodos aplicados, foi feita uma avaliação dos métodos pré-selecionados usando como molde a caixa interna do equipamento de cisalhamento direto (ou caixa de cisalhamento), local onde os corpos de prova viriam a ser moldados para a realização da campanha de ensaios. Com o objetivo de simular as mesmas condições de moldagem dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto, a placa ranhurada inferior era posicionada no fundo da caixa antes dos ensaios de moldagem. Após a moldagem, o corpo de prova tinha seu topo arrasado com o auxílio de uma placa retilínea de alumínio que possuía um “dente” de 4,5 mm de altura, conforme ilustrado na Figura 58a. Este procedimento resultava em um corpo de prova com as seguintes dimensões: 5,08 cm de comprimento, 5,08 cm de largura e aproximadamente 3,90 cm de altura. A Tabela 18 mostra os resultados obtidos.

Assim, para moldagem de corpos de prova no domínio “muito fofo”, foi utilizado o método B da norma ASTM-D4254-16, descrito no item 3.3.3.4 adotando um tubo de parede delgada com as dimensões apropriadas para a caixa de cisalhamento. Da Tabela 18, observa-se que foram obtidos os valores médios de índice de vazios e de compactação relativa iguais a 0,719 e 13 %, respectivamente. Lembrando que o índice de vazios médio obtido segundo este método, porém com o cilindro Proctor Normal como molde, foi de 0,751.

Para a moldagem dos corpos de prova no domínio “fofo”, o método utilizado foi o de pluviação direta sobre molde, descrito no item 3.3.3.4, utilizando o funil de abertura de diâmetro de 100 mm. Da Tabela 18, observa-se que, em dez determinações, foram obtidos os valores médios de índice de vazios e de compactação relativa iguais a 0,685 e 23 %, respectivamente. Lembrando que o índice de vazios médio obtido segundo este método, porém com o cilindro Proctor Normal como molde, foi de 0,713.

Assim, nos dois métodos acima, a caixa de cisalhamento tende a fornecer um índice de vazios menor do que o cilindro Proctor Normal.

Para a obtenção dos corpos de prova nos domínios médio, compacto e muito compacto, adotou-se o método da pluviação sobre peneiras, descrito no item 3.3.3.5, conforme ilustrado na Figura 54. Fazendo uso dos funis com aberturas de diâmetros iguais a 60 mm, 50 mm, 40 mm e 10 mm, foram obtidos valores médios

de índice de vazios/compacidade relativa iguais a 0,630/40%, 0,590/52%, 0,552/64% e 0,483/85%, respectivamente (ver Tabela 18).

Assim, os seis domínios de compacidade relativa obtidos segundo a aplicação dos métodos descritos acima na caixa de cisalhamento enquadraram-se nas seguintes classificações propostas por Lambe & Whiman (1979):

- um domínio classificado como “muito fofo”;
- um domínio classificado como “fofo”;
- dois domínios classificados como “médio”, nomeados como “médio 1” e “médio 2”;
- um domínio classificado como “compacto”;
- um domínio classificado como “muito compacto”.



Figura 54 – Método de pluviação sobre peneiras sobre a caixa de cisalhamento.

Tabela 18 – Testes para obtenção dos corpos de prova nos seis domínios de compacidade relativa na caixa de cisalhamento.

Tubo de parede delgada			Pluviação direta sobre molde (funil Ø100mm)			Pluviação sobre peneiras (funil Ø60mm)		
Corpo de Prova	$e_0$	$CR_0$ (%)	Corpo de Prova	$e_0$	$CR_0$ (%)	Corpo de Prova	$e_0$	$CR_0$ (%)
1	0,728	10	1	0,692	21	1	0,642	36
2	0,710	15	2	0,698	19	2	0,629	40
3	0,714	14	3	0,697	19	3	0,643	36
4	0,710	15	4	0,679	25	4	0,634	39
5	0,707	16	5	0,683	24	5	0,627	41
6	0,719	13	6	0,701	18	6	0,626	41
7	0,727	10	7	0,683	24	7	0,631	40
8	0,723	12	8	0,686	23	8	0,627	41
9	0,710	15	9	0,683	24	9	0,605	48
10	0,723	12	10	0,673	27	10	0,630	40
11	0,719	13				11	0,639	37
						12	0,634	39
						13	0,625	42
<b>Média</b>	<b>0,719</b>	<b>13</b>	<b>Média</b>	<b>0,685</b>	<b>23</b>	<b>Média</b>	<b>0,630</b>	<b>40</b>

Pluviação sobre peneiras (funil Ø50mm)			Pluviação sobre peneiras (funil Ø40mm)			Pluviação sobre peneiras (funil Ø10mm)		
Corpo de Prova	$e_0$	$CR_0$ (%)	Corpo de Prova	$e_0$	$CR_0$ (%)	Corpo de Prova	$e_0$	$CR_0$ (%)
1	0,597	50	1	0,552	64	1	0,485	85
2	0,609	46	2	0,566	60	2	0,491	83
3	0,599	50	3	0,544	66	3	0,483	85
4	0,592	52	4	0,552	64	4	0,475	88
5	0,581	55	5	0,549	65	5	0,486	84
6	0,577	56	6	0,566	60	6	0,482	85
7	0,586	53	7	0,552	64	7	0,488	84
8	0,581	55	8	0,546	66	8	0,480	86
9	0,581	55	9	0,557	63	9	0,477	87
10	0,592	52	10	0,545	66	10	0,474	88
11	0,598	50	11	0,551	64	11	0,491	83
12	0,583	54	12	0,551	64	12	0,481	86
			13	0,549	65			
<b>Média</b>	<b>0,590</b>	<b>52</b>	<b>Média</b>	<b>0,552</b>	<b>64</b>	<b>Média</b>	<b>0,483</b>	<b>85</b>

A Figura 55 apresenta os valores de índice de vazios obtidos nas dez determinações realizadas para cada abertura de funil segundo o método de pluviação sobre peneiras, utilizando a caixa de cisalhamento como molde (valores apresentados na Tabela 18). A Figura 55 apresenta também a curva “índice de vazios *versus* diâmetro da abertura do funil” passando pelo valor médio de índice de vazios obtido para cada abertura de funil, também indicados na Tabela 18. A fim de comparação, a figura também apresenta as curvas “índice de vazios *versus* diâmetro da abertura do funil” traçadas por Costa (2020) e por Simões (2015) seguindo os mesmos critérios, utilizando, porém, o cilindro Proctor Normal como molde no método de pluviação sobre peneiras, já apresentadas na Figura 41 acima.

Da Figura 55, observa-se que o padrão da curva obtida na caixa de cisalhamento é o mesmo das curvas obtidas por Costa (2020) e por Simões (2015) no cilindro Proctor Normal, isto é, quanto menor a abertura do funil menor o índice de vazios obtido. Todavia, a curva da caixa de cisalhamento situa-se inteiramente acima das curvas do cilindro Proctor Normal até, pelo menos, o funil de abertura de 60 mm. Isto indica que, pelo menos dentro deste domínio, a caixa de cisalhamento tende a fornecer um índice de vazios maior do que o cilindro Proctor Normal no método de pluviação sobre peneiras, para uma mesma abertura de funil.

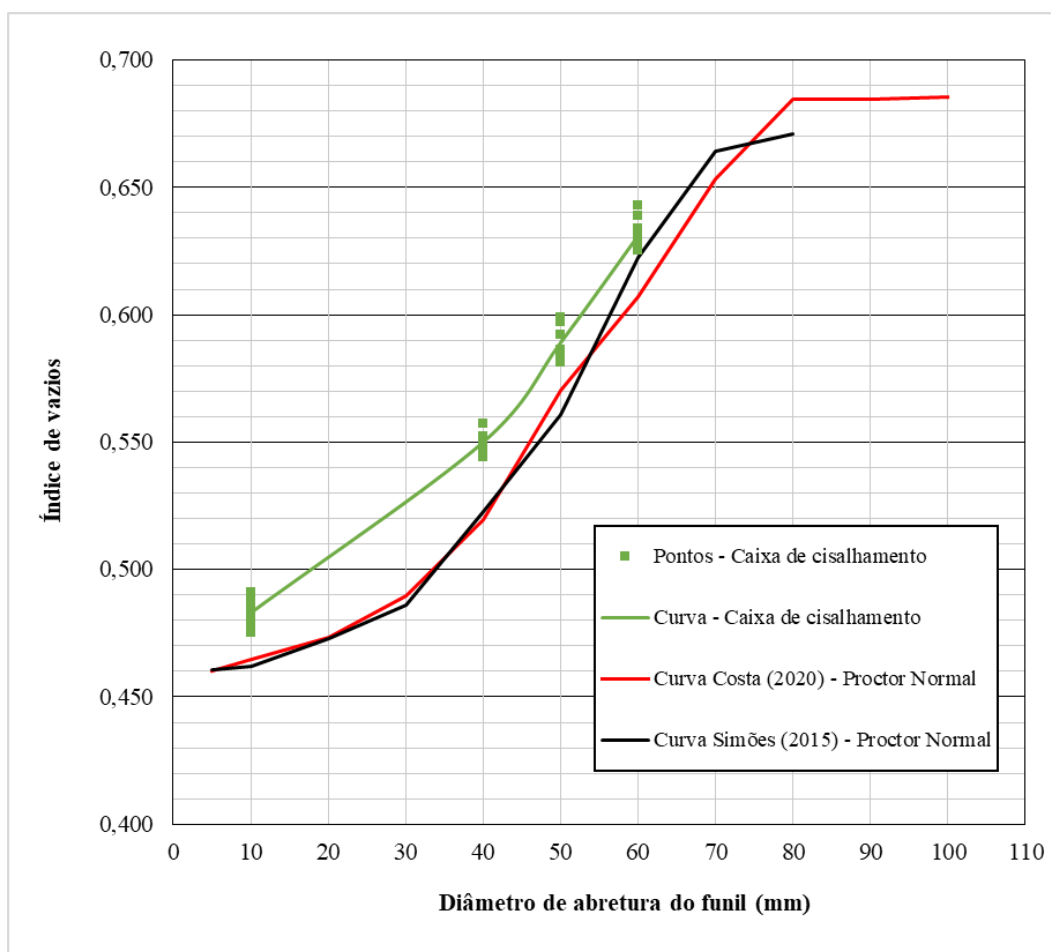


Figura 55 – Curva “índice de vazios *versus* diâmetro da abertura do funil” obtida pelo método de pluviação sobre peneiras na caixa de cisalhamento

### 3.3.6. Procedimento de montagem e execução dos ensaios de cisalhamento direto

Em todos os ensaios de cisalhamento direto, o procedimento seguido desde a moldagem do corpo de prova na caixa de cisalhamento até a finalização do ensaio era seguido etapa por etapa com o auxílio de um *check-list* previamente elaborado, apresentado a seguir com algumas ilustrações dos ensaios realizados nesta dissertação:

✓ Inicialmente, a caixa de cisalhamento era montada, parafusando a parte superior da caixa à parte inferior, e era posicionada no fundo da caixa a placa ranhurada (e perfurada) inferior, de modo que as ranhuras ficassem na direção perpendicular à direção do cisalhamento entre as partes inferior e superior da caixa (Figura 56).

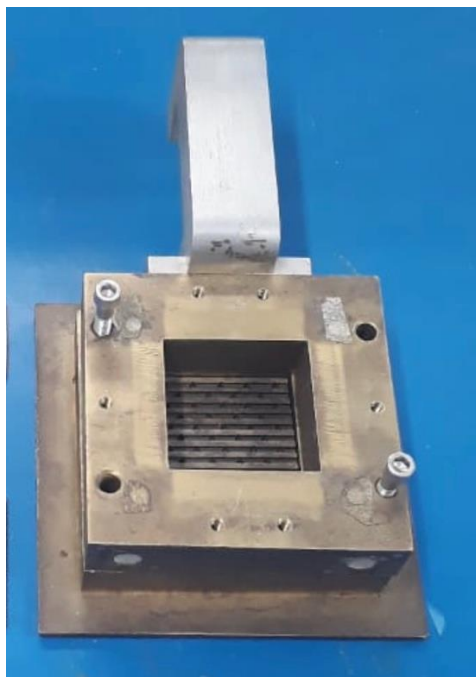


Figura 56 – Montagem da caixa de cisalhamento com o posicionamento da placa ranhurada (e perfurada) inferior.

✓ Em seguida, a areia era depositada dentro da caixa de cisalhamento seguindo um dos procedimentos de moldagem do corpo de prova identificados na Tabela 18 (Figura 57).



Figura 57 – Moldagem do corpo de prova na caixa de cisalhamento.



✓ Após a deposição da areia na caixa de cisalhamento, o corpo de prova tinha o seu topo arrasado com o auxílio de uma placa retilínea de alumínio que possuía um “dente” de 4,5 mm de altura, suficiente para permitir o posicionamento da placa ranhurada (e perfurada) superior sobre o corpo de prova (Figura 58a). Entretanto, antes do posicionamento da placa, toda a superfície externa da caixa de cisalhamento era limpada com o auxílio de um pincel de cerdas macias, para a eliminação de todos os grãos de areia nela presente (Figura 58b). Estes procedimentos, assim como o transporte da caixa com o corpo de prova, eram feitos sempre com bastante cuidado para evitar qualquer perturbação do material que pudesse alterar seu índice de vazios.



Figura 58 – (a) Arrasamento do topo do corpo de prova com placa retilínea; (b) Limpeza da superfície externa da caixa de cisalhamento.

✓ O conjunto “caixa de cisalhamento e corpo de prova” era, então, pesado em uma balança digital para o cálculo do índice de vazios inicial ( $e_0$ ) e da compactidade relativa inicial ( $CR_0$ ) do corpo de prova.

✓ Em seguida, a caixa de cisalhamento era posicionada dentro da caixa externa do equipamento de cisalhamento direto e eram colocados, em sequência, sobre a amostra, a placa ranhurada superior (com as ranhuras perpendiculares à direção do cisalhamento) e o *top cap* mais o pistão, previamente rosqueado no *top cap* (Figura 59).

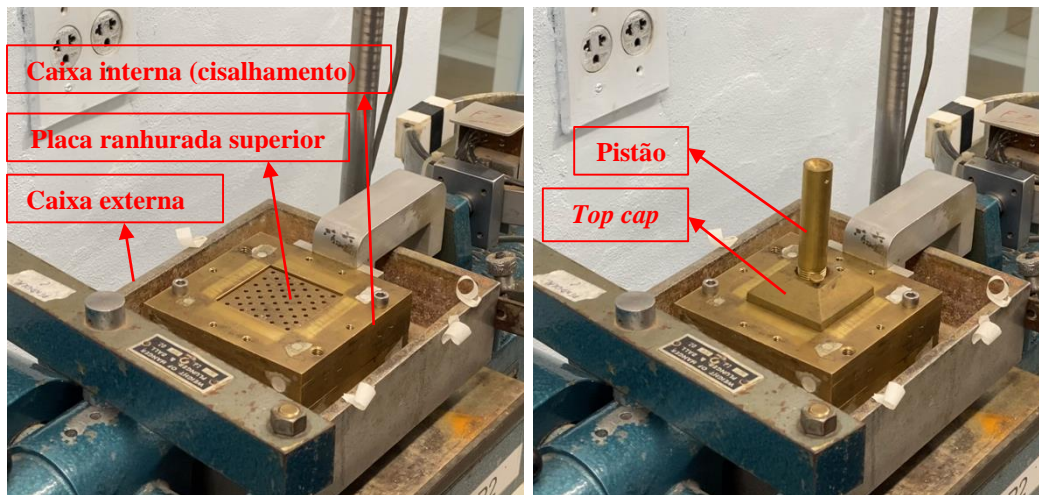


Figura 59 – Posicionamento da placa ranhurada, do *top cap* e do pistão sobre o corpo de prova.

✓ Posteriormente, o rolamento linear era cuidadosamente posicionado e parafusado na parte superior da caixa de cisalhamento, com o pistão do *top cap* passando por dentro do rolamento linear. Em seguida, a bilha era colocada sobre o pistão do *top cap* e o pendural (sem prato, braço de alavanca e pesos) era apoiado sobre a bilha (Figura 60).

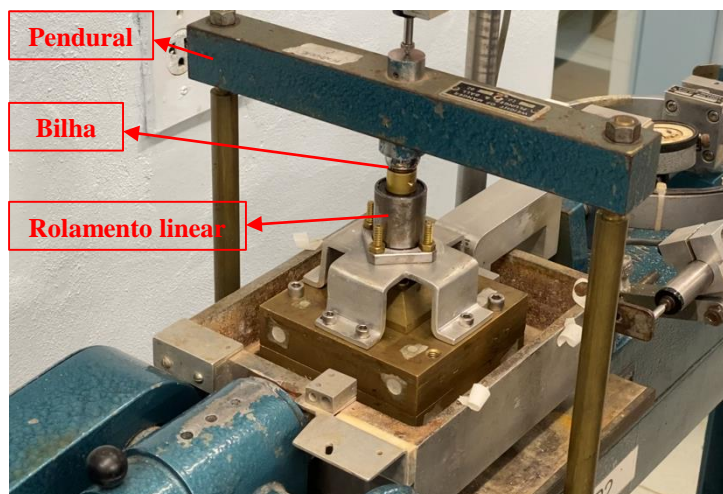


Figura 60 – Instalação do rolamento linear e posicionamento da bilha e do pendural.

✓ Na sequência, era posicionado o transdutor de deslocamento vertical de modo que o seu curso ficasse apoiado sobre o centro do topo do pendural e verificava-se a leitura deste transdutor no sistema de aquisição de dados. O transdutor de deslocamento horizontal também era posicionado (Figura 61a). Feito

isto, executava-se a primeira etapa do ensaio mediante a colocação do prato com pesos no eixo do pendural e, eventualmente, o braço de alavanca com o prato e mais pesos, a fim de atingir o valor da tensão normal nominal especificada para ser aplicada ao corpo de prova no ensaio (Figura 61b). Durante esta etapa, as leituras do transdutor de deslocamento vertical eram registradas no sistema de aquisição de dados.

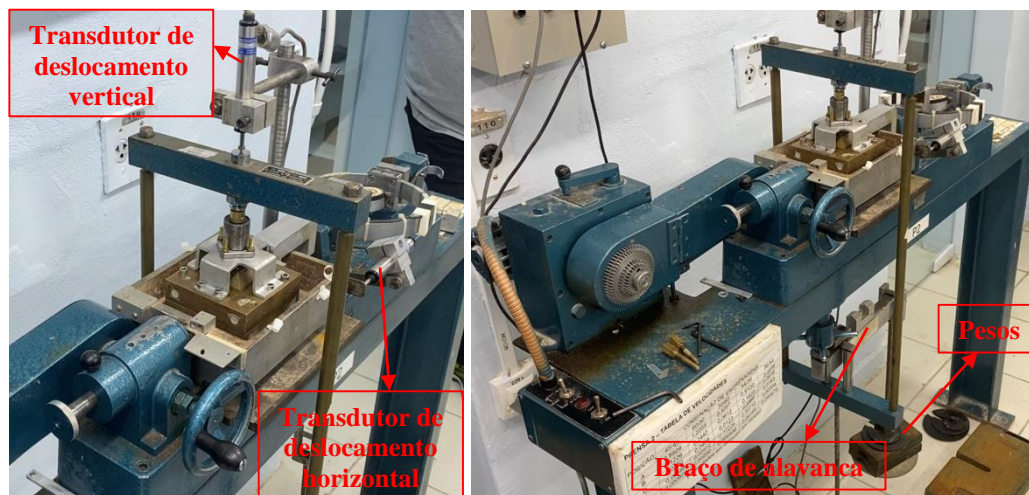


Figura 61 – (a) Posicionamento dos transdutores de deslocamento; (b) Carregamento vertical do corpo de prova;

✓ Após a observação da estabilidade da deformação vertical do corpo de prova no sistema de aquisição de dados, esta era registrada para o cálculo do índice de vazios antes da etapa de cisalhamento ( $e_1$ ). Em seguida, a caixa de cisalhamento era aproximada ao anel dinamométrico via deslocamento horizontal da caixa externa até que o braço da caixa de cisalhamento encostasse no anel dinamométrico, o que era detectado quando ocorria uma pequena variação da leitura do anel observada no sistema de aquisição de dados (Figura 62).



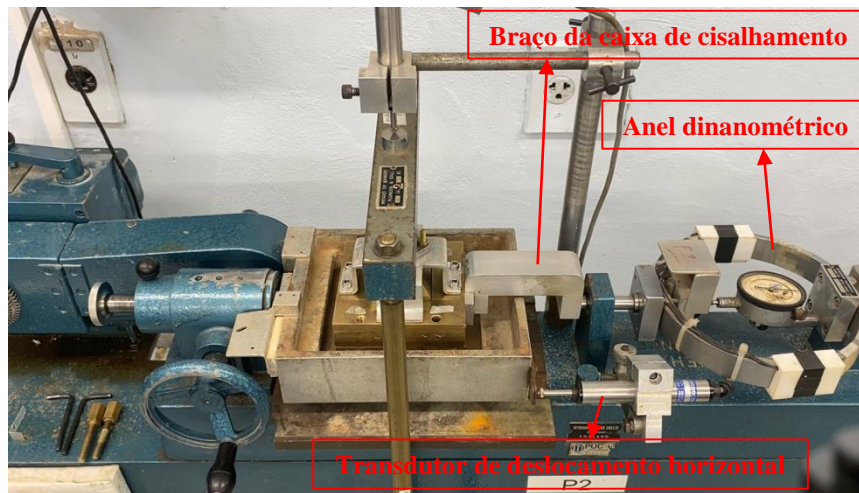


Figura 62 – Aproximação da caixa de cisalhamento ao anel dinamométrico.

✓ Feito isto, os parafusos de fixação das partes superior e inferior da caixa de cisalhamento eram retirados e as partes eram afastadas na direção vertical rosqueando os parafusos de afastamento (Figura 63). Em seguida, os transdutores de deslocamento vertical e horizontal eram reajustados e tinham as suas leituras iniciais verificadas no sistema de aquisição de dados para a execução da segunda fase do ensaio, o cisalhamento do corpo de prova.



Figura 63 – Afastamento vertical das partes superior e inferior da caixa de cisalhamento.

✓ Finalmente, verificava-se a configuração da velocidade de deslocamento da caixa externa nas engrenagens do motor e ligava-se o motor dando início ao cisalhamento do corpo de prova. Durante o cisalhamento, o sistema de aquisição de

dados registrava as leituras dos três instrumentos de medição, a saber, transdutores de deslocamento vertical e horizontal e anel dinamométrico, efetuadas a cada 10 s, aproximadamente (Figura 64).



Figura 64 – Início e acompanhamento do cisalhamento do corpo de prova.

✓ Após um deslocamento relativo horizontal de cerca de 6 mm, encerrava-se o ensaio, desligando-se o motor da prensa. Efetuava-se, em seguida, toda a desmontagem do ensaio e tiravam-se fotografias do corpo de prova rompido. A caixa de cisalhamento e a caixa externa eram limpas para dar início a um novo ensaio.

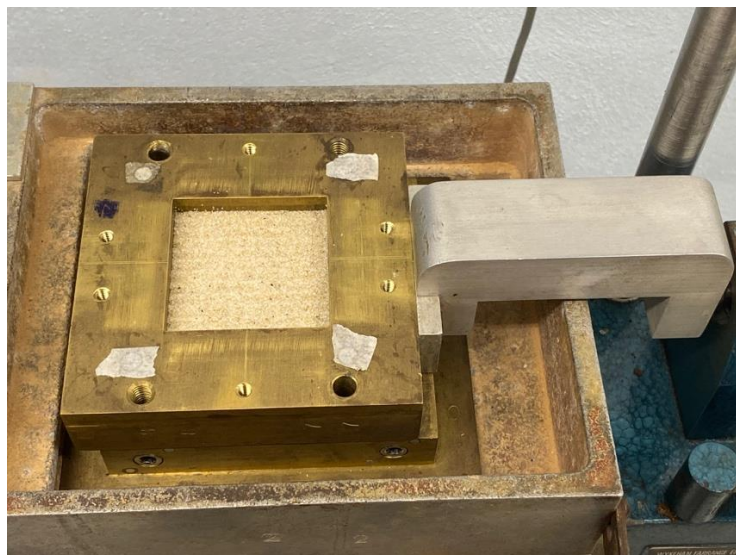


Figura 65 – Corpo de prova rompido.

## 4 Resultados e discussões

### 4.1. Visão geral dos ensaios de cisalhamento direto

Conforme já descrito, os ensaios de cisalhamento direto na amostra da Areia da Praia de Ipanema foram realizados em corpos de prova moldados em seis diferentes domínios de compacidade relativa (CR), sendo que, para cada um desses domínios, foram realizados ensaios sob dez diferentes valores de tensão normal nominal. Os domínios de compacidade relativa dos ensaios são nomeados como: muito fofo, fofo, médio 1, médio 2, compacto e muito compacto. Os dez valores de tensão normal nominal aplicados foram, em kPa: 25, 50, 75, 100, 150, 300, 500, 750, 1000 e 1250, tal como Simões (2015). A Tabela 19 apresenta as combinações “domínio de compacidade relativa/tensão normal nominal” dos ensaios de cisalhamento direto realizados nesta pesquisa.

Para algumas combinações “domínio de compacidade relativa/tensão normal nominal” foi realizado mais de um ensaio de cisalhamento direto simplesmente com o objetivo de confirmar o primeiro resultado obtido para aquela combinação. Por esta razão, foi realizado um total de setenta e um ensaios de cisalhamento direto.

Conforme também já mencionado, os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com uma velocidade de deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ ) de 0,1226 mm/min, com a aquisição de dados dos instrumentos de medição feita a cada 10 s, isto é, uma leitura a cada  $\delta h$  de cerca de 0,02 mm. Vale lembrar ainda que todos os ensaios de cisalhamento direto foram realizados utilizando o dispositivo formado pelo rolamento linear, idealizado para impedir o adernamento do *top cap* durante o cisalhamento.

As curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” estão apresentadas para cada ensaio individualmente no Apêndice 1. Estas curvas são plotadas com todos os pontos

registrados pelo sistema de aquisição de dados, isto é, a cada 10 s (a cada  $\delta h$  de 0,02 mm).

Tabela 19 – Tabela resumo dos ensaios de cisalhamento direto.

<b>Ensaio</b>	<b>Domínio</b>	<b>Tensão Normal Nominal (kPa)</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Domínio</b>	<b>Tensão Normal Nominal (kPa)</b>
<b>1</b>	Muito fofo	25	<b>37 (*)</b>	Médio 2	50
<b>2</b>	Muito fofo	50	<b>38</b>	Médio 2	75
<b>3</b>	Muito fofo	75	<b>39 (*)</b>	Médio 2	75
<b>4 (*)</b>	Muito fofo	75	<b>40</b>	Médio 2	100
<b>5</b>	Muito fofo	100	<b>41</b>	Médio 2	150
<b>6</b>	Muito fofo	150	<b>42</b>	Médio 2	300
<b>7</b>	Muito fofo	300	<b>43</b>	Médio 2	500
<b>8</b>	Muito fofo	500	<b>44</b>	Médio 2	750
<b>9</b>	Muito fofo	750	<b>45</b>	Médio 2	1000
<b>10</b>	Muito fofo	1000	<b>46</b>	Médio 2	1250
<b>11</b>	Muito fofo	1250	<b>47</b>	Compacto	25
<b>12</b>	Fofo	25	<b>48</b>	Compacto	50
<b>13</b>	Fofo	50	<b>49</b>	Compacto	75
<b>14</b>	Fofo	75	<b>50</b>	Compacto	100
<b>15</b>	Fofo	100	<b>51 (*)</b>	Compacto	100
<b>16</b>	Fofo	150	<b>52</b>	Compacto	150
<b>17</b>	Fofo	300	<b>53 (*)</b>	Compacto	150
<b>18</b>	Fofo	500	<b>54</b>	Compacto	300
<b>19</b>	Fofo	750	<b>55</b>	Compacto	500
<b>20</b>	Fofo	1000	<b>56 (*)</b>	Compacto	500
<b>21</b>	Fofo	1250	<b>57</b>	Compacto	750
<b>22</b>	Médio 1	25	<b>58</b>	Compacto	1000
<b>23</b>	Médio 1	50	<b>59</b>	Compacto	1250
<b>24</b>	Médio 1	75	<b>60</b>	Muito compacto	25
<b>25 (*)</b>	Médio 1	75	<b>61</b>	Muito compacto	50
<b>26</b>	Médio 1	100	<b>62</b>	Muito compacto	75
<b>27 (*)</b>	Médio 1	100	<b>63 (*)</b>	Muito compacto	75
<b>28</b>	Médio 1	150	<b>64</b>	Muito compacto	100
<b>29</b>	Médio 1	300	<b>65 (*)</b>	Muito compacto	100
<b>30</b>	Médio 1	500	<b>66</b>	Muito compacto	150
<b>31</b>	Médio 1	750	<b>67</b>	Muito compacto	300
<b>32</b>	Médio 1	1000	<b>68</b>	Muito compacto	500
<b>33</b>	Médio 1	1250	<b>69</b>	Muito compacto	750
<b>34 (*)</b>	Médio 1	1250	<b>70</b>	Muito compacto	1000
<b>35</b>	Médio 2	25	<b>71</b>	Muito compacto	1250
<b>36</b>	Médio 2	50			

(\*) Ensaios repetidos

## 4.2.

### Apresentação e análise dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto agrupados por domínio de compacidade relativa

#### 4.2.1. Considerações iniciais

Neste item 4.2, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto agrupados por domínio de compacidade relativa. Assim, para cada domínio de compacidade relativa, é apresentada uma tabela contendo as seguintes informações:

- 1) O índice de vazios de moldagem ( $e_0$ ) e a respectiva compacidade relativa ( $CR_0$ );
- 2) O índice de vazios após a deformação vertical decorrente da aplicação da tensão normal, isto é, pré-cisalhamento ( $e_c$ ) e a respectiva compacidade relativa ( $CR_c$ );
- 3) A tensão normal nominal aplicada ( $\sigma_n$ ) e a respectiva força normal aplicada ( $N$ );
- 4) As seguintes informações **na ruptura**, definida como o ponto de máximo da curva  $\tau/\sigma \times \delta h$  calculada e plotada com todos os pontos registrados pelo sistema de aquisição de dados, apresentada no Apêndice 1:
  - 4.1) A força de resistência ao cisalhamento ( $T_r$ ), estabelecida entre as partes cisalhadas do corpo de prova;
  - 4.2) O deslocamento horizontal relativo ( $\delta h_r$ ) entre as partes cisalhadas do corpo de prova;
  - 4.3) O deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v_r$ );
  - 4.4) A relação  $(\tau/\sigma)_r$ , calculada como  $T_r / N$ ;
  - 4.5) O ângulo de atrito ( $\phi'$ ), calculado como arcotangente de  $(\tau/\sigma)_r$ .

Para cada domínio de compacidade relativa são apresentadas ainda as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )”, porém não plotadas com todos os pontos coletados pelo sistema de aquisição de dados (isto é, a cada  $\delta t = 10$  s ou a cada  $\delta h$  de 0,02mm), como nas curvas individualizadas apresentadas no Apêndice 1, mas com os pontos filtrados a cada 1 min e 20 segundos, em média, que para uma velocidade de



deslocamento horizontal relativo de 0,1226 mm/min equivale a um ponto a cada 0,16 mm de deslocamento horizontal relativo, aproximadamente. A filtragem foi feita para facilitar a visualização e comparação entre as curvas agrupadas.

Finalmente, apresentam-se também os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal”, “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* tensão normal nominal” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal” determinados nos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compactidade relativa em análise.

A análise deste item é feita com base no que foi discutido no item 2.1.4 da revisão bibliográfica, principalmente nos itens 2.1.4.2 e 2.1.4.3 com base em Pinto (2006) e no item 2.1.4.5 com base em Lee & Seed (1967).

#### 4.2.2. Domínio Muito Fofo

A Tabela 20 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compactidade relativa **muito fofo**. A média do índice de vazios ( $e$ ) de moldagem desses corpos de prova é igual a 0,719, o que corresponde a uma compactidade relativa (CR) de 13 %.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito fofo.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	$\sigma_n$ (kPa)	N (kgf)	Na ruptura				
						T <sub>r</sub> (kgf)	$\delta h_r$ (mm)	$\delta v_r$ (mm)	$(\tau/\sigma)_r$	$\phi'$ (°)
0,728	10	0,728	10	25	6,62	6,41	3,60	-0,03	0,97	44,1
0,710	15	0,703	18	50	13,2	10,4	2,93	0,04	0,79	38,2
0,714	14	0,702	18	75	19,7	14,9	4,78	-0,02	0,76	37,1
0,710	15	0,688	22	75	19,7	15,4	4,39	0,01	0,78	38,0
0,707	16	0,693	21	100	26,4	18,9	3,07	-0,01	0,72	35,6
0,719	13	0,700	18	150	39,5	26,5	4,79	-0,06	0,67	33,9
0,727	10	0,707	16	300	79,0	51,6	3,86	0,00	0,65	33,2
0,723	12	0,700	18	500	132	80,4	3,21	-0,04	0,61	31,3
0,710	15	0,680	25	750	197	119	6,52	-0,13	0,60	31,1
0,723	12	0,684	23	1000	263	156	5,17	-0,12	0,59	30,7
0,719	13	0,682	24	1250	329	193	6,72	-0,16	0,59	30,4

A Figura 66 mostra as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” obtidas dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compactidade relativa **muito fofo**.

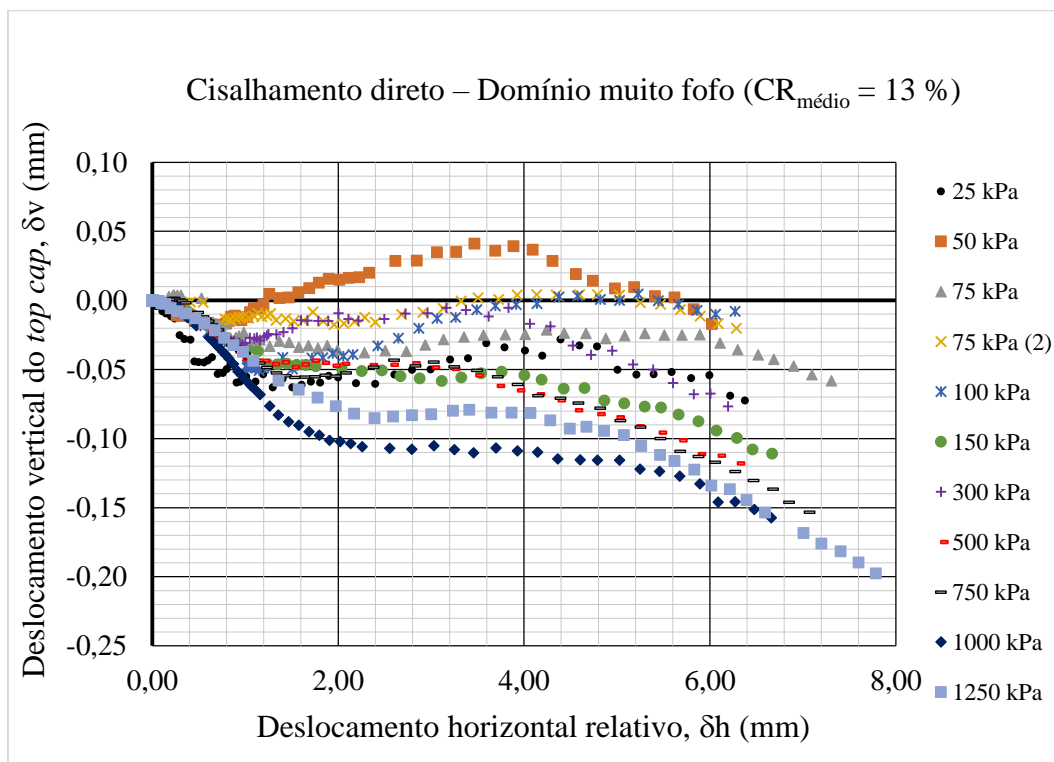
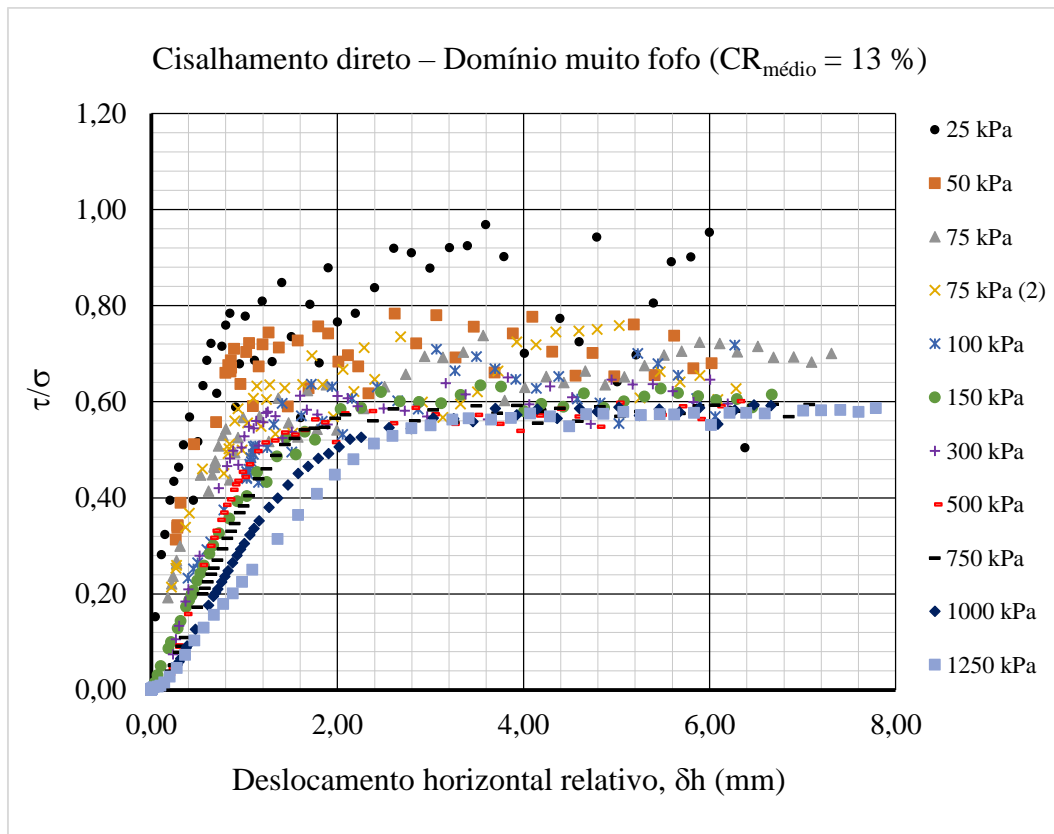


Figura 66 – Curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  e  $\delta v \times \delta h$  dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito fofo.

A Figura 67 mostra os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal”, os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* tensão normal nominal” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **muito fofo**.

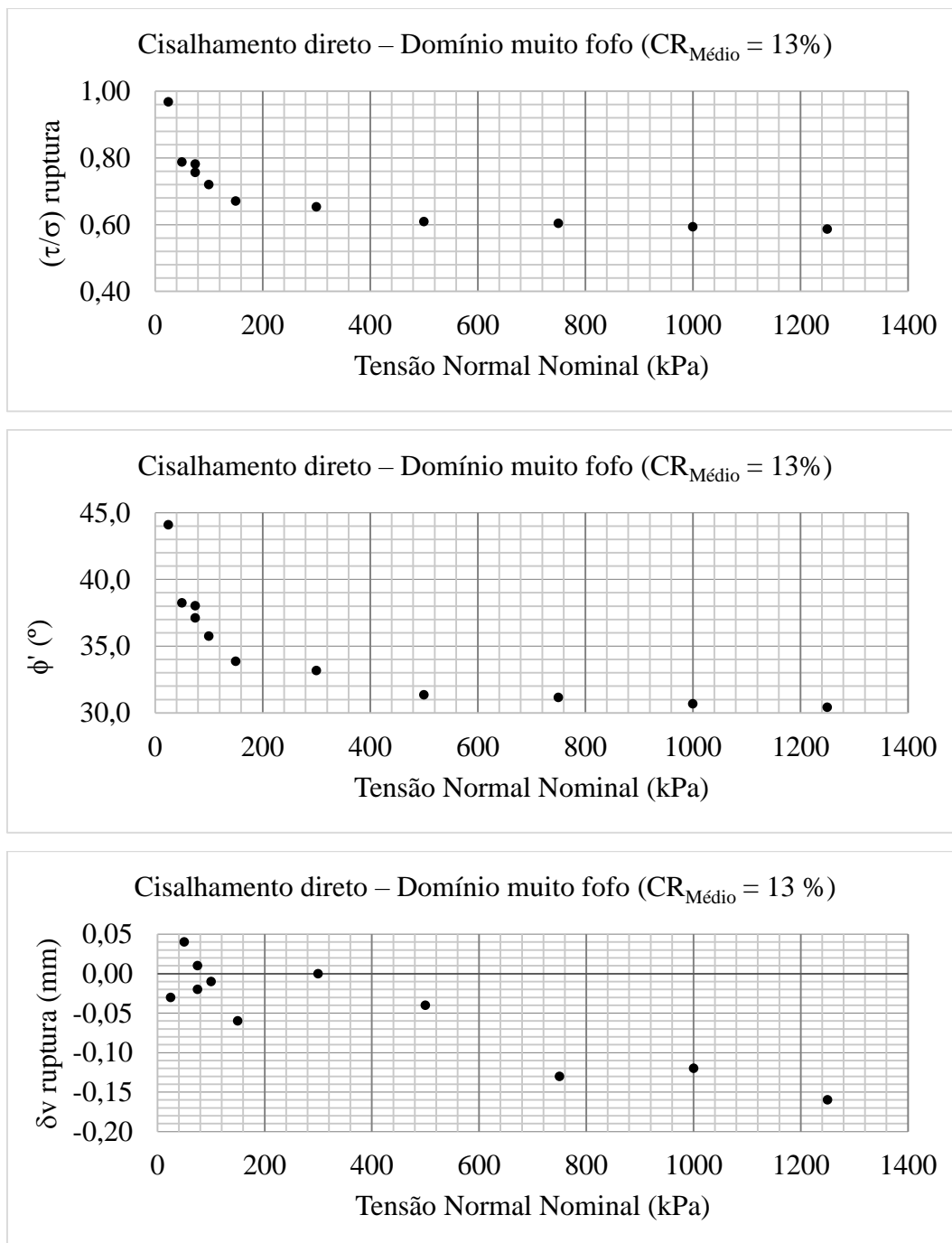


Figura 67 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito fofo

Da Tabela 20, observa-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), maior a resistência ao cisalhamento ( $T_r$ ).

Das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 66), observa-se que nenhum dos corpos de prova apresenta pico e que o aumento de  $\tau/\sigma$  com o  $\delta h$  é gradual, tendendo a ser tanto mais gradual quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ). Ademais, da Tabela 20, das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 66) e principalmente das curvas “ $(\tau/\sigma)_{ruptura} \times \sigma_n$ ” e “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 67), observa-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), menor tende a ser a razão  $(\tau/\sigma)$  na ruptura e, por conseguinte, o ângulo de atrito ( $\phi'$ ). Nota-se que o ângulo de atrito ( $\phi'$ ) varia de  $44,1^\circ$  para  $\sigma_n = 25$  kPa, decrescendo para  $30,4^\circ$  para  $\sigma_n = 1250$  kPa, o que mostra a significativa influência da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) no ângulo de atrito ( $\phi'$ ) medido para uma dada compacidade relativa fixada. Ainda assim, a curva “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 67) mostra que o ângulo de atrito não parece ter atingido um valor constante com o aumento da tensão normal nominal.

Da Tabela 20, observa-se que o deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) variou entre 2,93 mm e 6,72 mm, sendo os três maiores valores observados para as três tensões normais nominais mais elevadas. As curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 66) mostram que há uma tendência de aumento do deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) com o aumento da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ).

Das curvas “ $\delta v \times \delta h$ ” (Figura 66), observa-se que quase todos os corpos de prova contraem durante quase todo o cisalhamento, com exceção para o corpo de prova sob  $\sigma_n = 50$  kPa, que apresenta uma dilatação durante um razoável trecho do domínio de  $\delta h$ . Pode-se dizer ainda que, de uma forma geral, a contração tende a ser tanto maior quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ). As curvas “ $\delta v \times \delta h$ ” (Figura 66) mostram ainda que, para as tensões normais nominais mais elevadas, a contração aumenta com o  $\delta h$  ao longo de todo o cisalhamento. A curva “ $\delta v$  na ruptura  $\times \sigma_n$ ” (Figura 67) mostra que a contração do corpo de prova na ruptura tende a ser tanto maior quanto maior a tensão normal nominal, com uma diferença mais marcante ao aumentar  $\sigma_n$  de 500 para 750 kPa.

### 4.2.3. Domínio Fofo

A Tabela 21 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compactidade relativa **fofo**. A média do índice de vazios ( $e$ ) de moldagem desses corpos de prova é igual a 0,685, o que corresponde a uma compactidade relativa (CR) de 23%.

Tabela 21 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio fofo.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	$\sigma_n$ (kPa)	N (kgf)	Na ruptura				
						T <sub>r</sub> (kgf)	$\delta h_r$ (mm)	$\delta v_r$ (mm)	$(\tau/\sigma)_r$	$\phi'$ (°)
0,692	21	0,692	21	25	6,62	6,28	3,80	-0,01	0,95	43,5
0,698	19	0,696	20	50	13,2	10,9	2,63	0,03	0,83	39,5
0,697	19	0,680	25	75	19,7	15,0	3,42	0,01	0,76	37,3
0,679	25	0,669	28	100	26,4	20,5	5,10	0,03	0,78	37,8
0,683	24	0,664	30	150	39,5	27,5	2,64	-0,01	0,70	34,8
0,701	18	0,682	24	300	79,0	50,5	2,85	-0,02	0,64	32,6
0,683	24	0,660	31	500	132	80,6	3,96	-0,02	0,61	31,4
0,686	23	0,659	31	750	197	118	5,90	-0,11	0,60	30,9
0,683	24	0,646	35	1000	263	158	4,83	-0,09	0,60	31,0
0,673	27	0,637	38	1250	329	194	5,14	-0,11	0,59	30,5

A Figura 68 mostra as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” obtidas dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compactidade relativa **fofo**.

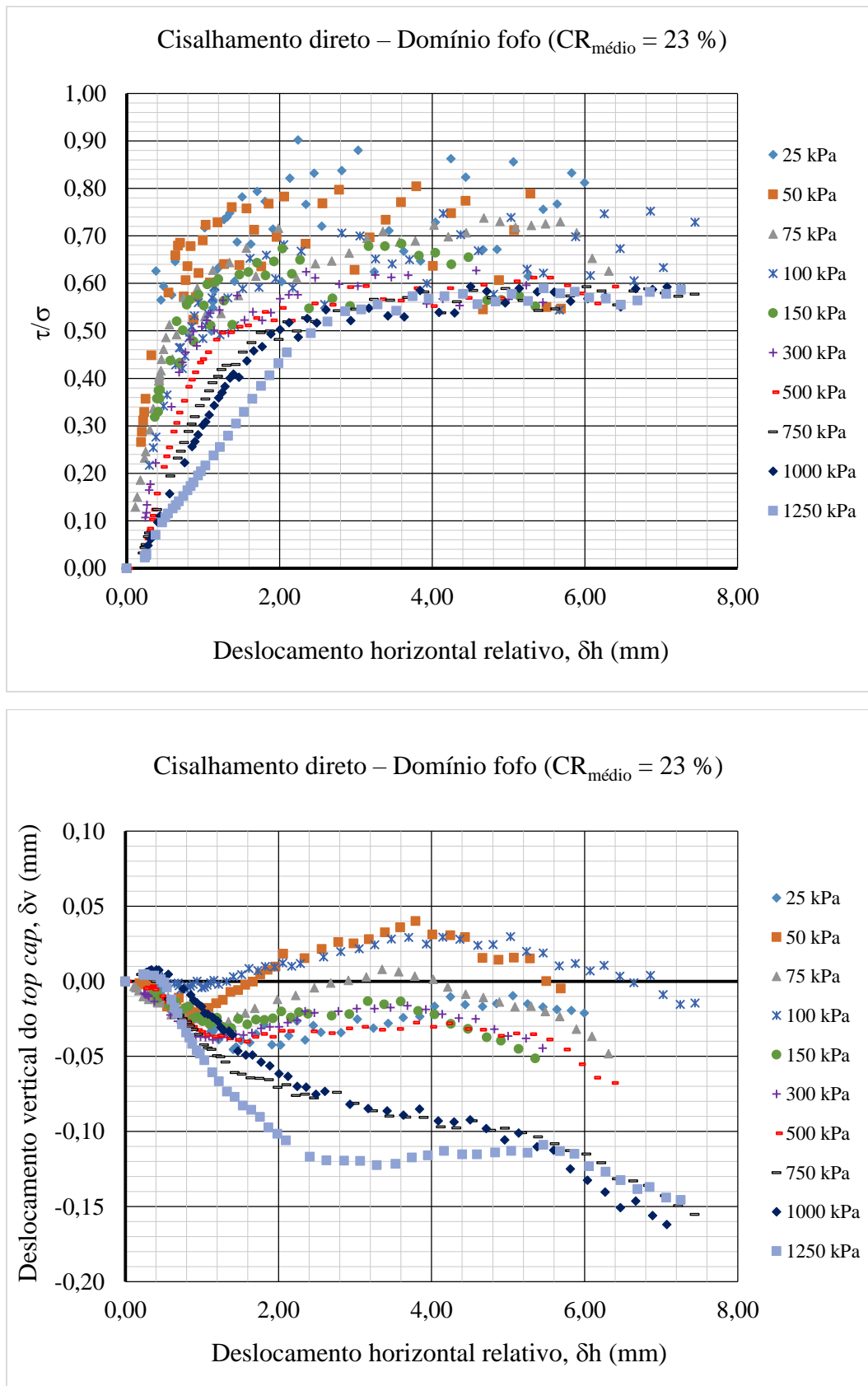


Figura 68 - Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio fofo.

A Figura 69 mostra os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal”, os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* tensão normal nominal” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compactidade relativa **fofo**.

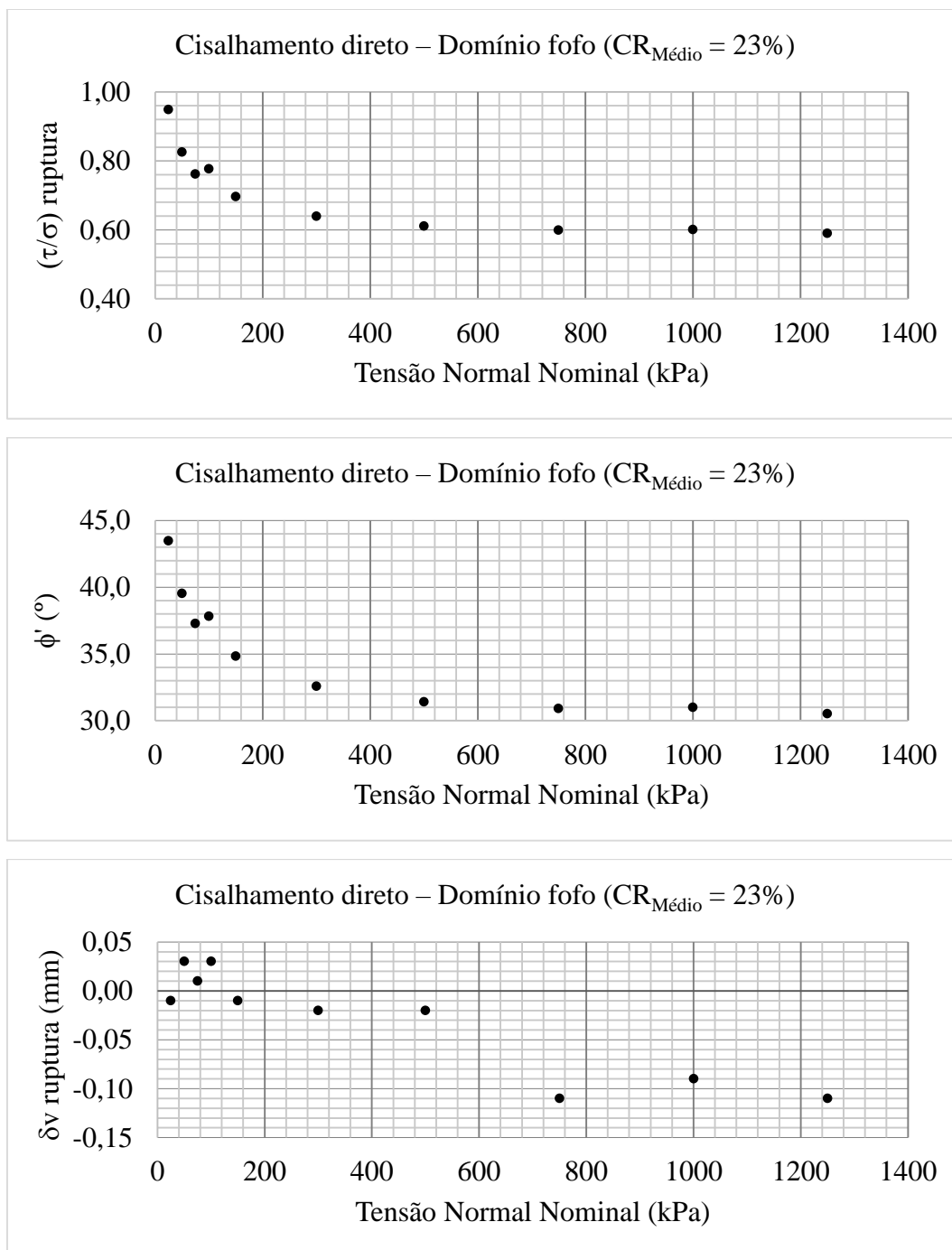


Figura 69 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio fofo



Da Tabela 21, observa-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), maior a resistência ao cisalhamento ( $T_r$ ).

Assim como observado para o domínio muito fofo, das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 68), observa-se que nenhum dos corpos de prova apresenta pico e que o aumento de  $\tau/\sigma$  com o cisalhamento é tanto mais gradual quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ).

Da Tabela 21, das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 68) e das curvas “ $(\tau/\sigma)_{ruptura} \times \sigma_n$ ” e “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 69), observa-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), menor a razão  $(\tau/\sigma)$  na ruptura e, por conseguinte, o ângulo de atrito ( $\phi'$ ). O ângulo de atrito ( $\phi'$ ) reduz de  $43,5^\circ$  ( $\sigma_n = 25$  kPa) para  $30,5^\circ$  ( $\sigma_n = 1250$  kPa). Novamente, a curva “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 69) mostra que o ângulo de atrito não parece atingir um valor constante com o aumento da tensão normal nominal.

Da Tabela 21, observa-se que o deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) variou entre 2,63 mm e 5,90 mm. Este intervalo é menor que o observado no domínio muito fofo. Assim como observado para o domínio muito fofo, as curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 68) mostram que há uma tendência de aumento do deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) com o aumento da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ).

Das curvas “ $\delta v \times \delta h$ ” (Figura 68), observa-se que a grande maioria dos corpos de prova contraem durante todo o cisalhamento, com exceção dos corpos de prova submetidos às tensões normais nominais de 50 kPa e 100 kPa. Estes últimos contraem no início do cisalhamento, em seguida, dilatam durante um trecho considerável do domínio de  $\delta h$ , fazendo com que o corpo de prova apresente um volume superior ao volume no início do cisalhamento, e finalmente voltam à tendência de contração. Pode-se dizer que o mesmo ocorre com o corpo de prova ensaiado sob  $\sigma_n = 75$  kPa, porém em menor intensidade.

Ainda das curvas “ $\delta v \times \delta h$ ” (Figura 68), observa-se que os corpos de prova ensaiados sob tensões normais nominais mais elevadas ( $\sigma_n = 1250, 1000$  e  $750$  kPa) apresentam uma tendência de dilatação bastante tímida em um trecho muito curto de  $\delta h$  bem no início do cisalhamento para, logo em seguida, apresentarem contração bastante acentuada durante todo o cisalhamento.

Finalmente, de uma forma geral, a curva “ $\delta v$  na ruptura x  $\sigma_n$ ” (Figura 69) mostra que a contração na ruptura tende a ser tanto maior quanto maior a tensão normal nominal, com uma diferença mais acentuada ao aumentar  $\sigma_n$  de 500 para 750 kPa, repetindo, portanto, o observado para o domínio muito fofo.

#### 4.2.4. Domínio Médio 1

A Tabela 22 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **médio 1**. A média do índice de vazios ( $e$ ) de moldagem desses corpos de prova é igual a 0,630, o que corresponde a uma compacidade relativa (CR) de 40 %.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 1.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	$\sigma_n$ (kPa)	N (kgf)	Na ruptura				
						T <sub>r</sub> (kgf)	$\delta h_r$ (mm)	$\delta v_r$ (mm)	$(\tau/\sigma)_r$	$\phi'$ (°)
0,642	36	0,642	36	25	6,62	6,69	2,62	0,13	1,01	45,3
0,629	40	0,627	41	50	13,2	11,3	2,17	0,09	0,86	40,6
0,643	36	0,626	41	75	19,7	15,6	2,84	0,09	0,79	38,4
0,634	39	0,626	41	75	19,7	15,5	1,88	0,03	0,79	38,2
0,627	41	0,605	48	100	26,4	20,5	1,73	0,03	0,78	37,8
0,626	41	0,611	46	100	26,4	19,8	2,92	0,09	0,75	36,9
0,631	40	0,620	43	150	39,5	27,5	1,82	0,06	0,70	34,8
0,627	41	0,612	46	300	79,0	51,4	1,54	0,02	0,65	33,0
0,605	48	0,579	56	500	132	84,3	2,44	0,00	0,64	32,6
0,630	40	0,607	47	750	197	122	3,26	-0,05	0,62	31,8
0,639	37	0,606	47	1000	263	158	4,26	-0,06	0,60	31,0
0,634	39	0,594	51	1250	329	195	4,55	-0,05	0,59	30,7
0,625	42	0,594	51	1250	329	201	4,32	-0,05	0,61	31,4

A Figura 70 mostra as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” obtidas dos ensaios de

cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compactidade relativa **médio 1**.

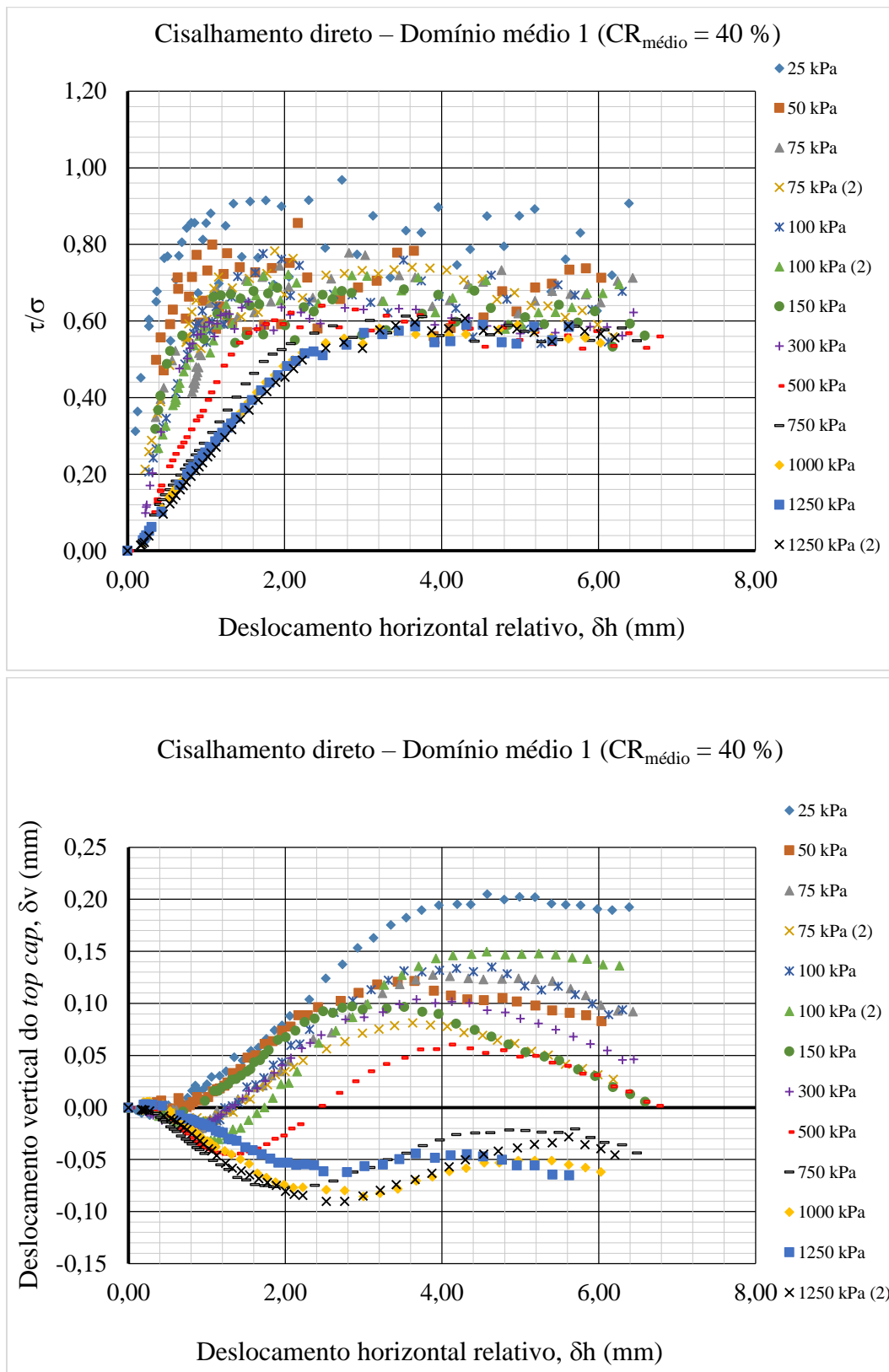


Figura 70 - Curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  e  $\delta v \times \delta h$  dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 1

A Figura 71 mostra os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal”, os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* tensão normal nominal” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **médio 1**.

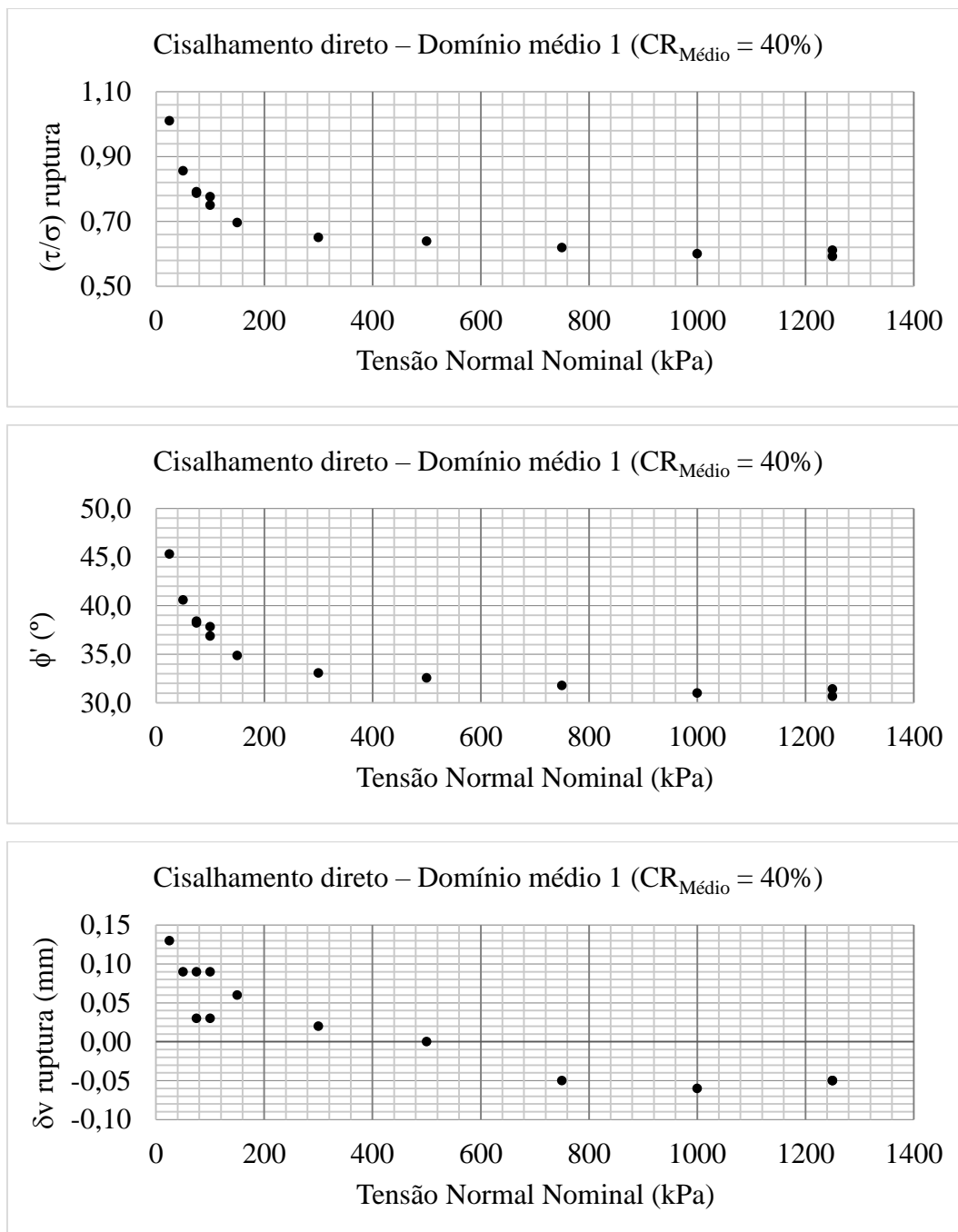


Figura 71 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 1.

Das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 70), observa-se que o aumento de  $\tau/\sigma$  com o  $\delta h$  é tanto mais gradual quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) e que nenhuma curva apresenta pico com nitidez. Da Tabela 22, das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 70) e das curvas “ $(\tau/\sigma)_{ruptura} \times \sigma_n$ ” e “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 71), observa-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), menor a razão  $(\tau/\sigma)$  na ruptura e, portanto, o ângulo de atrito ( $\phi'$ ). O ângulo de atrito ( $\phi'$ ) reduz de  $45,3^\circ$  ( $\sigma_n = 25$  kPa) para  $31,4^\circ$  e  $30,7^\circ$  ( $\sigma_n = 1250$  kPa). Estes limites de valores de  $\phi'$  são maiores do que os limites observados para o domínio fofo. Novamente, devido a este último valor, a curva “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 71) indica que o ângulo de atrito não atinge um valor constante com o aumento da tensão normal nominal.

Da Tabela 22, observa-se que o deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) varia entre 1,54 mm e 4,55 mm, intervalo este menor que o intervalo observado no domínio fofo. Observa-se ainda que os quatro maiores valores de  $\delta h_r$  ocorrem para as três tensões normais nominais mais elevadas. As curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 70) revelam que há uma tendência de aumento do deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) com o aumento da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), tal como observado para os domínios muito fofo e fofo.

Das curvas “ $\delta v \times \delta h$ ” (Figura 70), observa-se que os corpos de prova ensaiados sob tensões normais nominais iguais ou inferiores a 500 kPa apresentam contração no início do cisalhamento, seguida de dilatação acentuada. De uma forma geral, observa-se que a contração inicial é tanto menor e a dilatação subsequente é tanto maior quanto menor a tensão normal nominal. Já os corpos de prova ensaiados sob tensões normais nominais superiores a 500 kPa apresentam contração ao longo de todo o cisalhamento, em relação ao volume inicial do corpo de prova.

A curva “ $\delta v$  na ruptura  $\times \sigma_n$ ” (Figura 71) mostra que o deslocamento vertical do *top cap* na ruptura tende a ser menor quanto maior a tensão normal nominal. Para tensões normais nominais inferiores a 500 kPa, os valores de  $\delta v_r$  são todos positivos, revelando dilatação na ruptura (ver também na Tabela 22), sendo a dilatação, em geral, tanto maior quanto menor a tensão normal nominal. Para tensões normais nominais superiores a 500 kPa, os valores de  $\delta v_r$  são todos negativos, o que significa contração na ruptura. Sob  $\sigma_n = 500$  kPa,  $\delta v_r$  é praticamente igual a zero. Este valor de tensão normal nominal deve ser igual ou

muito próximo ao valor da tensão normal nominal crítica associada ao valor de índice de vazios de 0,579 (ver Tabela 22).

#### 4.2.5. Domínio Médio 2

A Tabela 23 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **médio 2**. A média do índice de vazios ( $e$ ) de moldagem desses corpos de prova é igual a 0,590 o que corresponde a uma compacidade relativa (CR) de 52 %.

Tabela 23 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 2.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	$\sigma_n$ (kPa)	N (kgf)	Na ruptura				
						T <sub>r</sub> (kgf)	$\delta h_r$ (mm)	$\delta v_r$ (mm)	$(\tau/\sigma)_r$	$\phi'$ (°)
0,597	50	0,596	50	25	6,62	7,16	1,36	0,14	1,08	47,2
0,609	46	0,601	49	50	13,2	12,3	1,17	0,08	0,93	43,0
0,599	50	0,594	51	50	13,2	12,1	1,39	0,07	0,92	42,5
0,592	52	0,589	53	75	19,7	16,5	1,84	0,13	0,84	39,9
0,581	55	0,576	57	75	19,7	16,9	1,71	0,08	0,86	40,6
0,577	56	0,570	58	100	26,4	21,4	2,25	0,10	0,81	39,0
0,586	53	0,573	58	150	39,5	28,9	1,26	0,08	0,73	36,2
0,581	55	0,567	59	300	79,0	56,6	1,59	0,07	0,72	35,6
0,581	55	0,559	62	500	132	94,9	2,16	0,06	0,72	35,7
0,592	52	0,563	61	750	197	129	3,09	0,02	0,65	33,2
0,598	50	0,563	61	1000	263	170	3,29	0,00	0,65	32,9
0,583	54	0,542	67	1250	329	209	3,18	0,01	0,64	32,4

A Figura 72 mostra as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” obtidas dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **médio 2**.

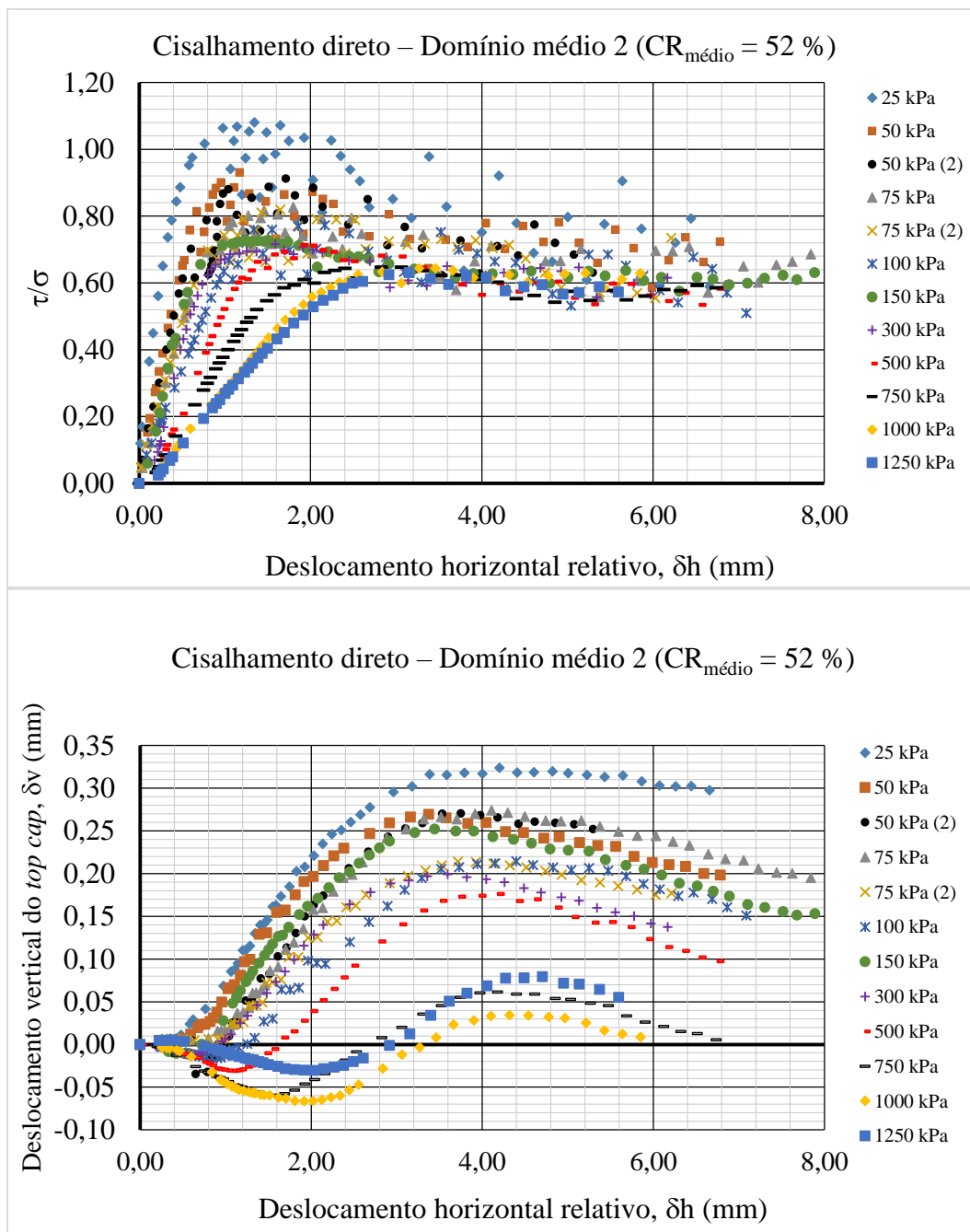


Figura 72 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 2.

A Figura 73 mostra os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal”, os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* tensão normal nominal” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compactidade relativa **médio 2**.

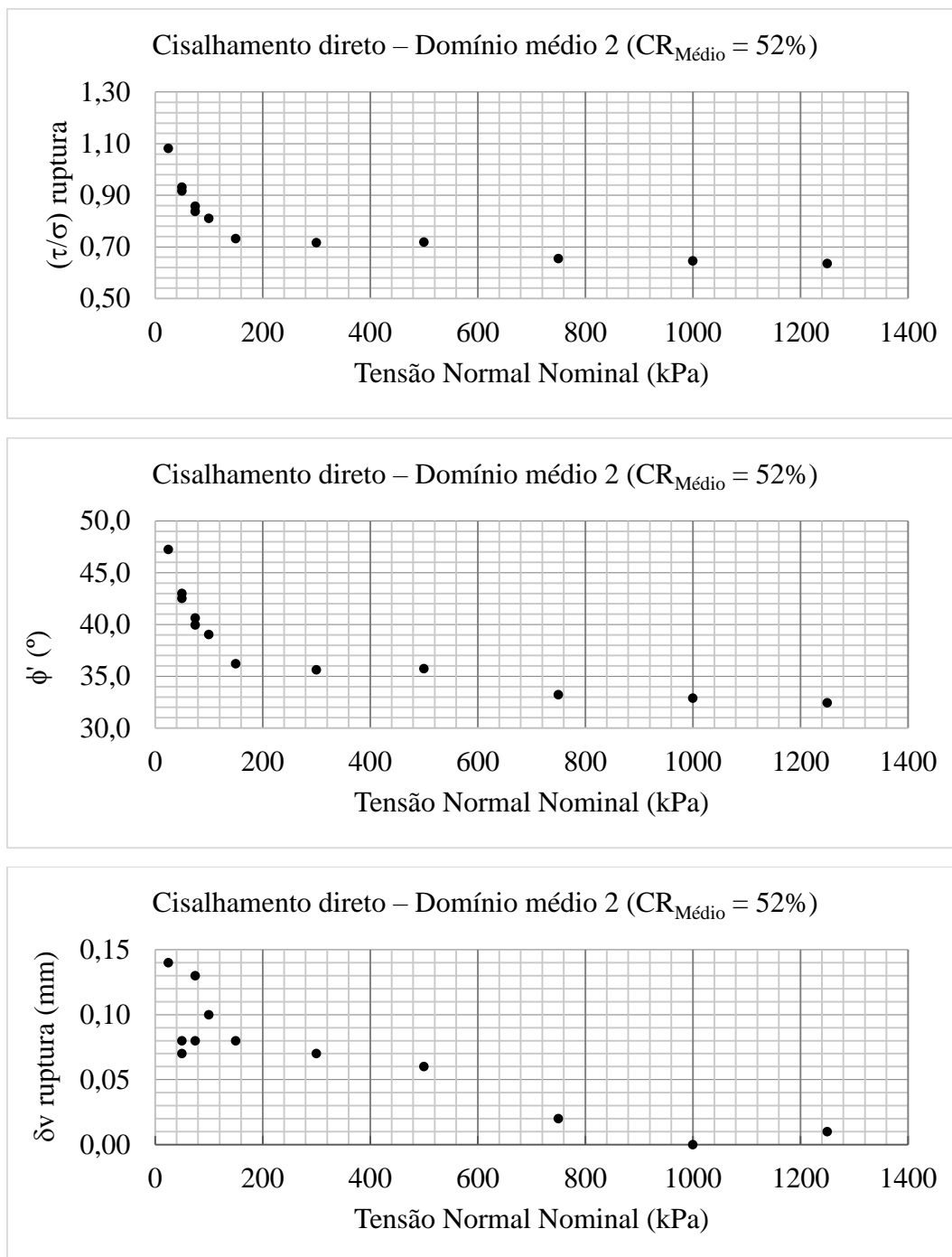


Figura 73 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio médio 2.

Observa-se que as curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 72) dos corpos de prova ensaiados sob tensões normais nominais iguais ou inferiores a 500 kPa apresentam pico, sendo este tanto maior e mais bem definido quanto menor a tensão normal nominal. Para os corpos de prova ensaiados sob tensões normais nominais superiores a 500 kPa, o aumento de  $\tau/\sigma$  com o  $\delta h$  é mais gradual e as curvas não apresentam pico bem definido.



Da Tabela 23, das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 72) e das curvas “ $(\tau/\sigma)_{ruptura} \times \sigma_n$ ” e “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 73), observa-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), menor é a razão  $(\tau/\sigma)$  na ruptura e, por conseguinte, o ângulo de atrito ( $\phi'$ ). O ângulo de atrito ( $\phi'$ ) reduz de  $47,2^\circ$  ( $\sigma_n = 25$  kPa) para  $32,4^\circ$  ( $\sigma_n = 1250$  kPa). Estes limites de valores de  $\phi'$  são maiores do que os limites observados para o domínio médio 1. Ainda assim, a curva “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 73) mostra que o ângulo de atrito não parece ter atingido um valor constante com o aumento da tensão normal nominal.

Da Tabela 23, observa-se que o deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) varia entre 1,17 mm e 3,29 mm. Estes limites do intervalo de valores de  $\delta h_r$  são inferiores aos observados no domínio médio 1. Nota-se também que os três maiores valores de  $\delta h_r$  correspondem às três tensões normais nominais mais elevadas.

Das curvas “ $\delta v \times \delta h$ ” (Figura 72), observa-se que, para todas as tensões normais nominais acima de 75 kPa, os corpos de prova contraem no início do cisalhamento para, no decorrer do cisalhamento, sofrerem dilatação. Dentre os ensaios realizados sob tensões normais nominais iguais ou inferiores a 75 kPa, alguns já dilatam desde o início do cisalhamento, ao passo que outros apresentam uma tímida contração inicial para então dilatarem. Ainda assim, de uma forma geral, a contração inicial é tanto menor e a dilatação subsequente é tanto maior quanto menor a tensão normal nominal. O corpo de prova que nitidamente desvia desse padrão é aquele cisalhado sob  $\sigma_n = 1250$  kPa. Este desvio pode estar relacionado ao fato do índice de vazios no início do cisalhamento desse corpo de prova ser significativamente inferior aos índices de vazios dos corpos de prova ensaiados sob  $\sigma_n = 750$  kPa e 1000 kPa (ver Tabela 23).

A curva “ $\delta v$  na ruptura  $\times \sigma_n$ ” (Figura 73) mostra que todos os corpos de prova apresentam dilatação na ruptura, exceto o corpo de prova ensaiado sob  $\sigma_n = 1000$  kPa. Nota-se também que a dilatação na ruptura tende a ser tanto maior quanto menor a tensão normal nominal. Sob  $\sigma_n = 1000$  kPa,  $\delta v_r$  é praticamente igual a zero. Este valor de tensão normal nominal deve ser igual ou muito próximo ao valor da tensão normal nominal crítica associada ao valor de índice de vazios de 0,563 (ver Tabela 23). O fato do valor de  $\delta v_r$  do corpo de prova ensaiado sob  $\sigma_n = 1250$  kPa não ter sido negativo, o que indicaria contração na ruptura, deve estar relacionado

ao fato de seu índice de vazios no início do cisalhamento ser bastante inferior aos índices de vazios dos corpos de prova ensaiados sob  $\sigma_n = 750$  kPa e 1000 kPa.

#### 4.2.6. Domínio Compacto

A Tabela 24 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **compacto**. A média do índice de vazios ( $e$ ) de moldagem desses corpos de prova é igual a 0,552, o que corresponde a uma compacidade relativa (CR) de 64 %.

Tabela 24 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio compacto.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	$\sigma_n$ (kPa)	N (kgf)	Na ruptura				
						$T_r$ (kgf)	$\delta h_r$ (mm)	$\delta v_r$ (mm)	$(\tau/\sigma)_r$	$\phi'$ (°)
0,552	64	0,552	64	25	6,62	7,59	0,90	0,06	1,15	48,9
0,566	60	0,563	61	50	13,2	12,7	1,30	0,06	0,96	43,9
0,544	66	0,539	68	75	19,7	17,9	2,04	0,18	0,91	42,3
0,552	64	0,544	66	100	26,4	24,6	1,96	0,13	0,93	43,0
0,549	65	0,541	67	100	26,4	23,4	1,62	0,07	0,89	41,6
0,566	60	0,547	66	150	39,5	34,7	2,24	0,07	0,88	41,3
0,552	64	0,544	66	150	39,5	32,0	1,40	0,14	0,81	39,0
0,546	66	0,533	70	300	79,0	63,3	1,49	0,08	0,80	38,7
0,557	63	0,530	71	500	132	101	1,81	0,05	0,77	37,4
0,545	66	0,525	72	500	132	99,1	1,92	0,06	0,75	36,9
0,551	64	0,528	71	750	197	144	2,55	0,04	0,73	36,2
0,551	64	0,519	74	1000	263	193	3,12	0,05	0,73	36,3
0,549	65	0,516	75	1250	329	232	3,42	0,06	0,71	35,2

A Figura 74 mostra as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” obtidas dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **compacto**.

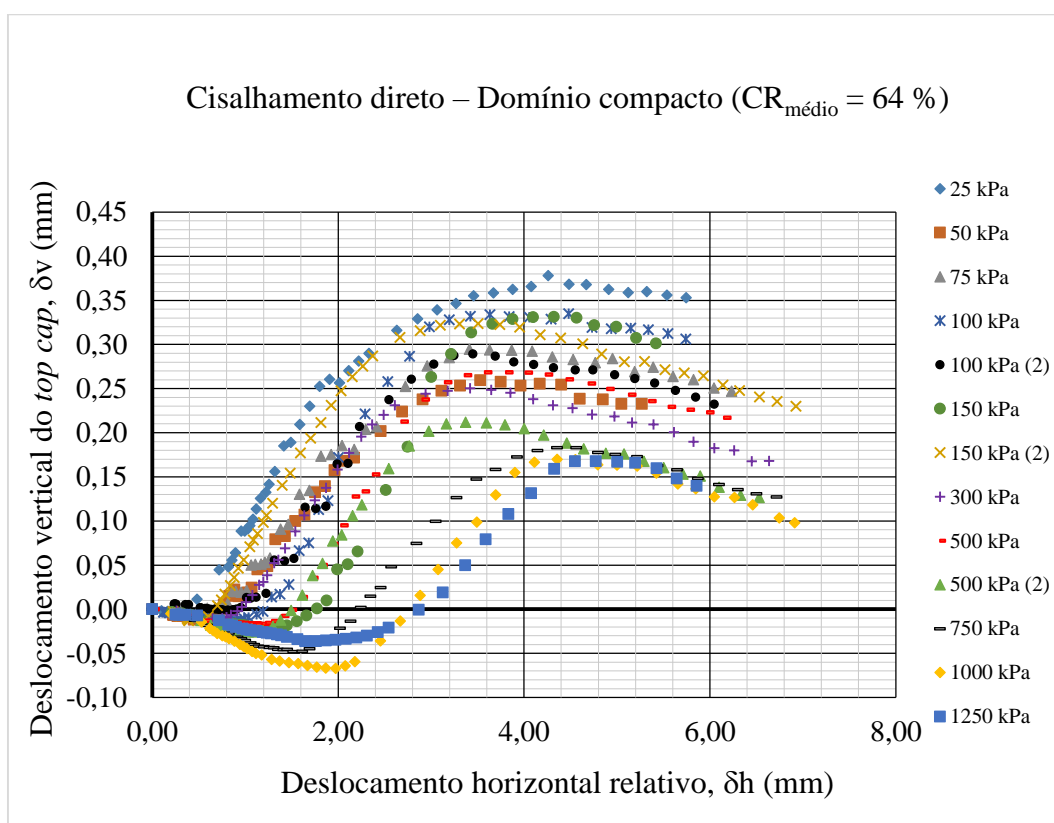
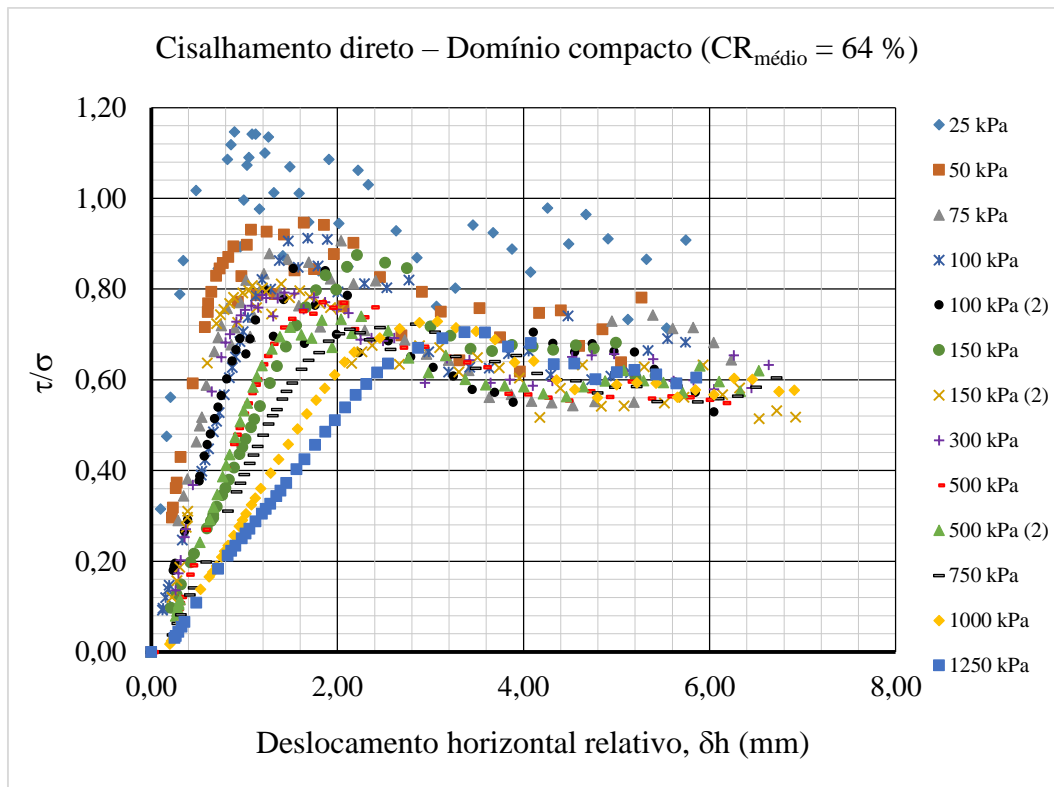


Figura 74 - Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio compacto.

A Figura 75 mostra os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal”, os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* tensão normal nominal” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compactidade relativa **compacto**.

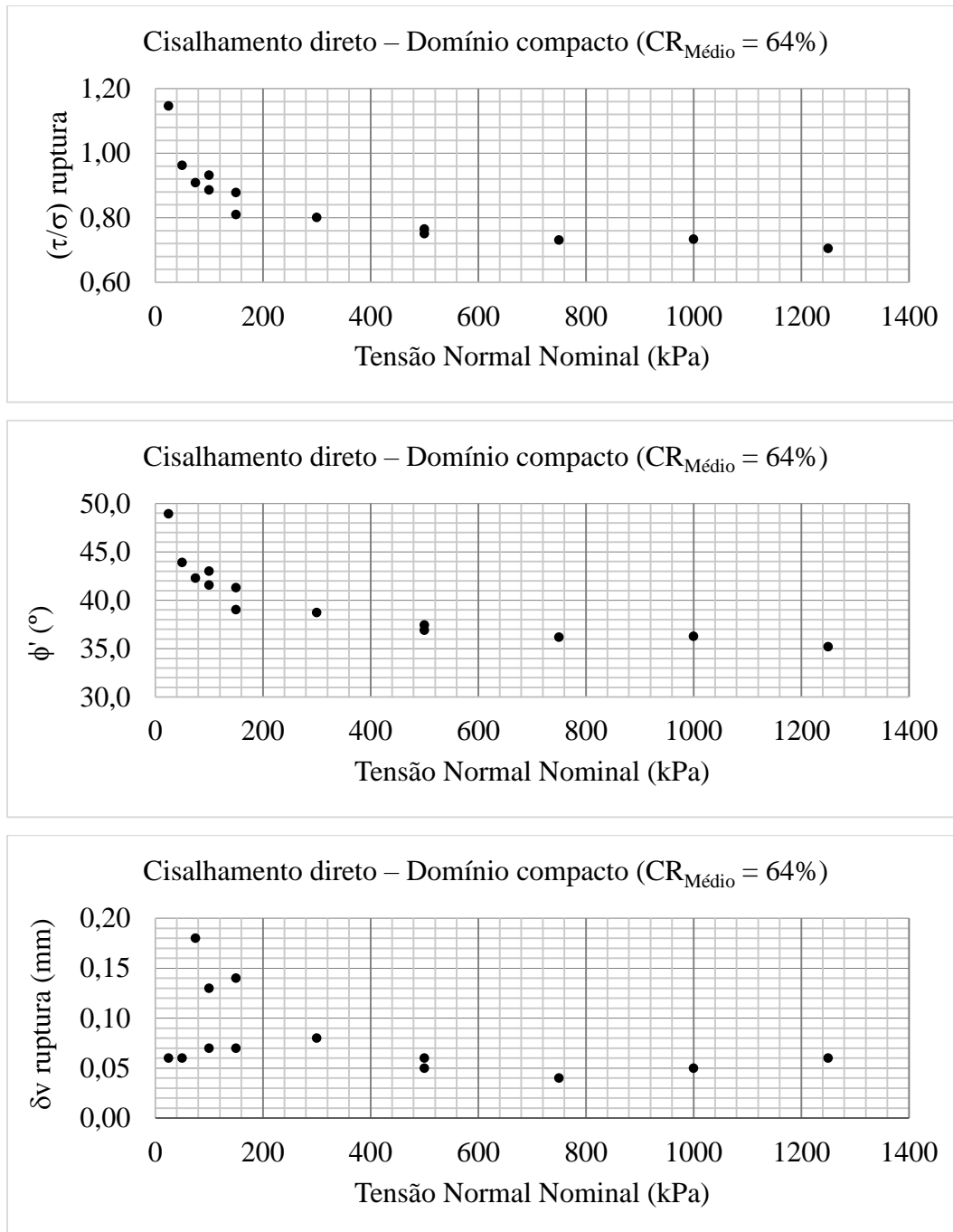


Figura 75 – Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio compacto.

Das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 74), observa-se que todos os corpos de prova apresentam pico bem definido, e que este tende a ser tanto mais proeminente quanto menor a tensão normal nominal. De uma forma geral, observa-se também que o aumento de  $\tau/\sigma$  com o  $\delta h$  é tanto mais gradual quanto maior a tensão normal nominal, padrão observado para todos os domínios de compacidade relativa analisados até aqui.

Da Tabela 24, das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 74) e das curvas “ $(\tau/\sigma)_{ruptura} \times \sigma_n$ ” e “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 75), observa-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), menor tende a ser a razão  $(\tau/\sigma)$  na ruptura e, portanto, o ângulo de atrito ( $\phi'$ ). Nota-se que o ângulo de atrito ( $\phi'$ ) reduz de  $48,9^\circ$  ( $\sigma_n = 25$  kPa) para  $35,2^\circ$  ( $\sigma_n = 1250$  kPa). Estes limites de valores de  $\phi'$  são maiores do que os limites observados para o domínio médio 2.

Da Tabela 24, observa-se que o deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) varia entre 0,90 mm e 3,42 mm, sendo que os três maiores valores ocorrem para as três maiores tensões normais nominais, enquanto que os dois menores valores ocorrem para as duas menores tensões normais nominais. Este intervalo de valores de  $\delta h_r$  é próximo do intervalo observado para o domínio médio 2. De fato, as curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 74) mostram uma tendência de aumento de  $\delta h_r$  com o aumento da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), padrão também observado nos demais domínios de compacidade relativa analisados até aqui.

Das curvas “ $\delta v \times \delta h$ ” (Figura 74), observa-se que todos os corpos de prova apresentam uma contração inicial, seguida de uma dilatação acentuada. Nota-se que, de uma forma geral, a contração inicial é tanto menor e a dilatação subsequente é tanto maior quanto menor a tensão normal nominal.

A curva “ $\delta v$  na ruptura  $\times \sigma_n$ ” (Figura 75) mostra que todos os corpos de prova apresentam dilatação na ruptura e que esta tende a ser tanto maior quanto menor a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ). Por outro lado, dentre os sete ensaios realizados sob  $\sigma_n \leq 150$  kPa, quatro desviam desta tendência. Para as duas tensões normais nominais mais elevadas também ocorre um desvio desta tendência.

#### 4.2.7. Domínio Muito Compacto

A Tabela 25 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **muito compacto**. A média do índice de vazios ( $e$ ) de moldagem desses corpos de prova é igual a 0,483, o que corresponde a uma compacidade relativa (CR) de 85 %.

Tabela 25 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito compacto.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	$\sigma_n$ (kPa)	N (kgf)	Na ruptura				
						$T_r$ (kgf)	$\delta h_r$ (mm)	$\delta v_r$ (mm)	$(\tau/\sigma)_r$	$\phi'$ (°)
0,485	85	0,484	85	25	6,62	9,23	0,94	0,15	1,39	54,4
0,491	83	0,488	84	50	13,2	16,5	1,22	0,12	1,25	51,3
0,483	85	0,479	86	75	19,7	22,7	1,67	0,16	1,15	49,0
0,475	88	0,472	89	75	19,7	22,6	1,86	0,20	1,15	48,9
0,486	84	0,480	86	100	26,4	30,0	1,98	0,12	1,14	48,7
0,482	85	0,478	87	100	26,4	29,5	1,88	0,10	1,12	48,2
0,488	84	0,479	86	150	39,5	40,9	1,10	0,14	1,04	46,0
0,480	86	0,462	92	300	79,0	76,8	1,64	0,15	0,97	44,2
0,477	87	0,451	95	500	132	120	1,95	0,10	0,91	42,3
0,474	88	0,444	97	750	197	172	2,56	0,07	0,87	41,1
0,491	83	0,451	95	1000	263	226	3,12	0,09	0,86	40,7
0,481	86	0,441	98	1250	329	270	3,63	0,08	0,82	39,4

A Figura 76 mostra as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” obtidas dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **muito compacto**.

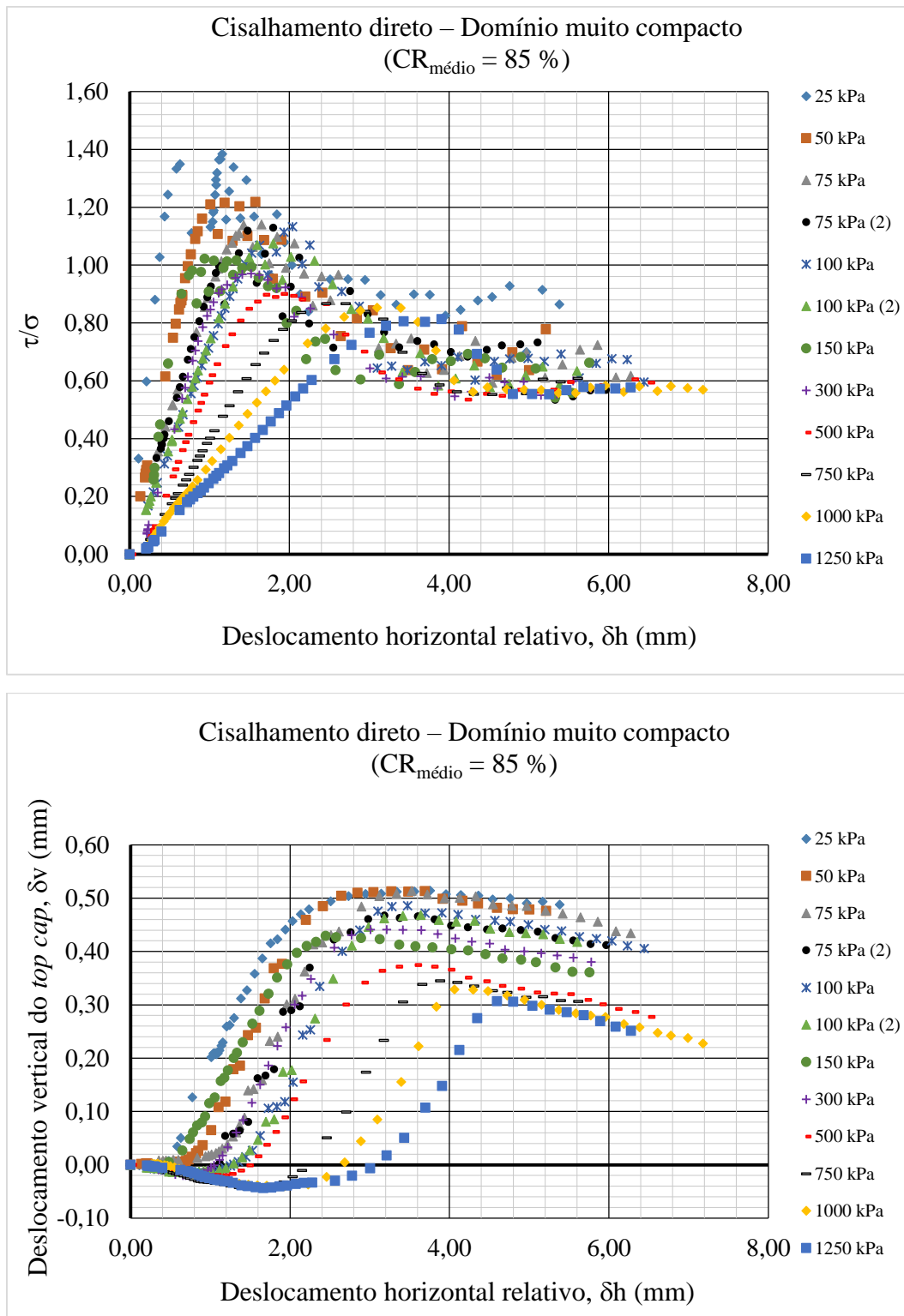


Figura 76 - Curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  e  $\delta v \times \delta h$  dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito compacto.

A Figura 77 mostra os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal”, os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus*

tensão normal nominal” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados no domínio de compacidade relativa **muito compacto**.

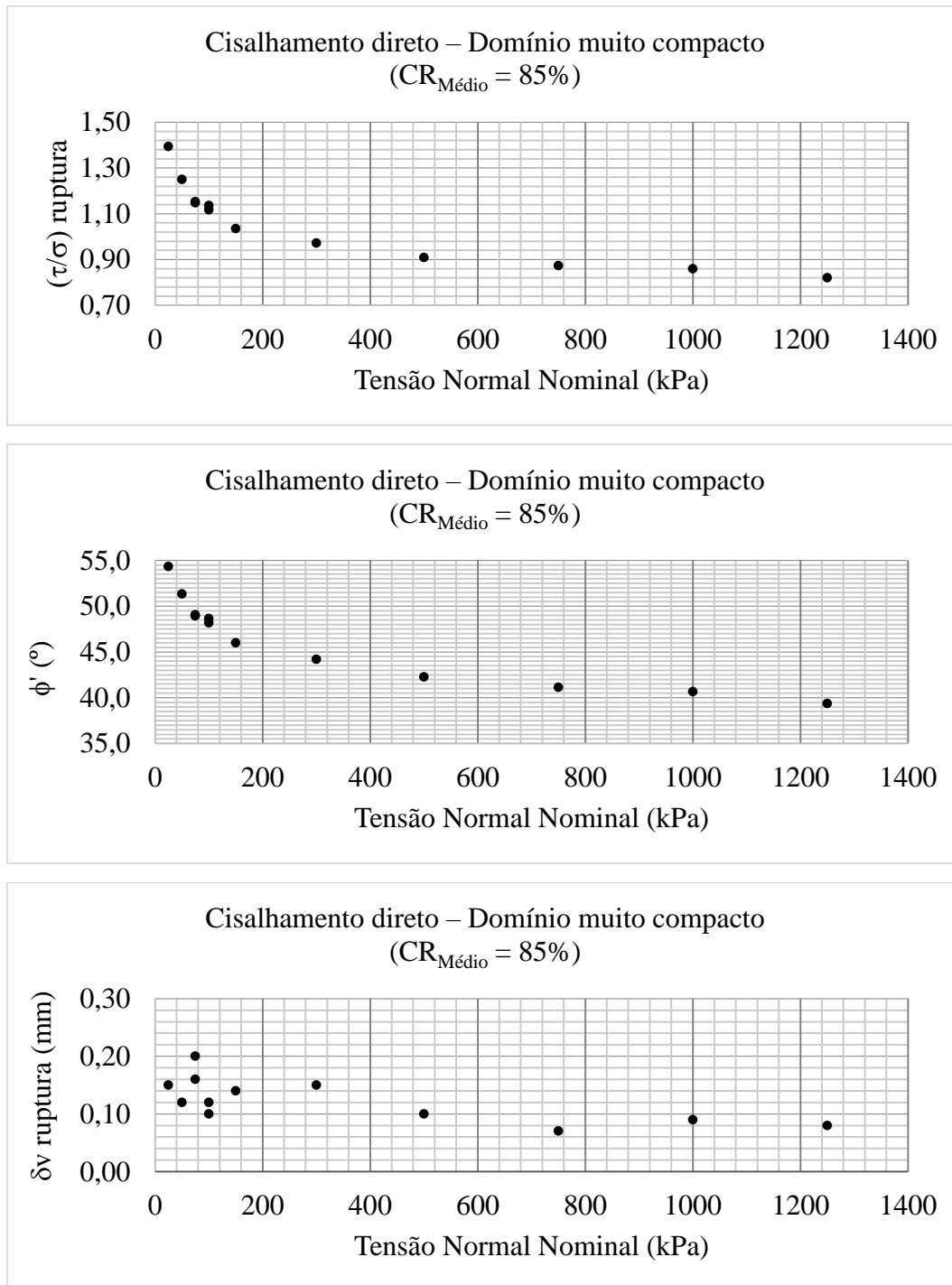


Figura 77 – Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova moldados no domínio muito compacto.



Das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 76), observa-se que todos os corpos de prova apresentam pico muito bem definido, sendo ainda mais agudos do que os picos das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” do domínio compacto (Figura 74). Nota-se ainda que o pico é tanto mais proeminente quanto menor a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) e que o aumento de  $\tau/\sigma$  com o  $\delta h$  tende a ser tanto mais gradual quanto maior  $\sigma_n$ .

Da Tabela 25, das curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 76) e das curvas “ $(\tau/\sigma)_{ruptura} \times \sigma_n$ ” e “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 77), observa-se que quanto menor a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), maior tende a ser a razão  $(\tau/\sigma)$  na ruptura e, conseqüentemente, o ângulo de atrito ( $\phi'$ ). O ângulo de atrito ( $\phi'$ ) reduz de  $54,4^\circ$  ( $\sigma_n = 25$  kPa) para  $39,4^\circ$  ( $\sigma_n = 1250$  kPa). Estes limites de valores de  $\phi'$  são maiores do que os limites observados para o domínio compacto.

Da Tabela 25, observa-se que o deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) varia entre 0,94 mm e 3,63 mm, sendo os três maiores valores observados para as três maiores tensões normais nominais e o menor valor observado para a menor tensão normal nominal. Este intervalo de valores de  $\delta h_r$  é semelhante aos intervalos observados para os domínios médio 2 e compacto. As curvas “ $(\tau/\sigma) \times \delta h$ ” (Figura 76) mostram que, de fato, há uma clara tendência de aumento do deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) com o aumento da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ).

Das curvas “ $\delta v \times \delta h$ ” (Figura 76), observa-se que quase todos os corpos de prova apresentam uma contração inicial para, em seguida, sofrerem dilatação acentuada. Somente os corpos de prova cisalhados sob  $\sigma_n = 50$  kPa e  $\sigma_n = 75$  kPa (Ensaio 1) não apresentam contração inicial, já iniciando o cisalhamento dilatando. De uma forma geral, a contração inicial tende a ser tanto menor e a dilatação subsequente tanto maior, quanto menor a tensão normal nominal.

A curva “ $\delta v$  na ruptura  $\times \sigma_n$ ” (Figura 77) mostra que todos os corpos de prova apresentam dilatação na ruptura e que esta tende a ser tanto maior quanto menor a tensão normal nominal. Entretanto, esta tendência é mais tímida quando comparada com os domínios médio 2 e compacto.

### 4.3.

### **Apresentação e análise dos resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto agrupados por tensão normal nominal**

#### **4.3.1. Considerações iniciais**

No item anterior, os resultados completos dos ensaios de cisalhamento direto foram apresentados agrupando-os por domínio de compacidade relativa (CR). Neste item, são apresentados os resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto agrupando-os por tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ). Assim, para cada uma das dez tensões normais nominais aplicadas, é apresentada uma tabela contendo as informações descritas no item 4.2.1 (exceto os valores de  $\sigma_n$  e de  $N$ ) de todos os ensaios de cisalhamento direto realizados sob aquela tensão normal nominal.

Apresentam-se também os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os quais são comparados com aqueles obtidos por Simões (2015), estes últimos apresentados por quadrados na cor laranja.

Finalmente apresentam-se os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”. Nestes gráficos, os pontos representados por quadrados na cor laranja foram aqueles utilizados para a interpolação da reta traçada para a determinação do índice de vazios crítico (correspondente a  $\delta v_r = 0$ ), assunto que será abordado no item 4.5, adiante.

A análise é feita após a apresentação de todos os resultados.

### 4.3.2. Tensão normal nominal igual a 25 kPa

A Tabela 26 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **25 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 6,62 kgf.

Tabela 26 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 25 kPa.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	δh <sub>r</sub> (mm)	δv <sub>r</sub> (mm)	(τ/σ) <sub>r</sub>	φ' (°)
0,728	10	Muito fofo	0,728	10	6,41	3,60	- 0,03	0,97	44,1
0,692	21	Fofo	0,692	21	6,28	3,80	- 0,01	0,95	43,5
0,642	36	Médio 1	0,642	36	6,69	2,62	0,13	1,01	45,3
0,597	50	Médio 2	0,596	50	7,16	1,36	0,14	1,08	47,2
0,552	64	Compacto	0,552	64	7,59	0,90	0,06	1,15	48,9
0,485	85	Muito compacto	0,484	85	9,23	0,94	0,15	1,39	54,4

A Figura 78 mostra os pontos “tensão cisalhante (τ) sobre tensão normal (σ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito (φ') *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* (δv) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **25 kPa**.

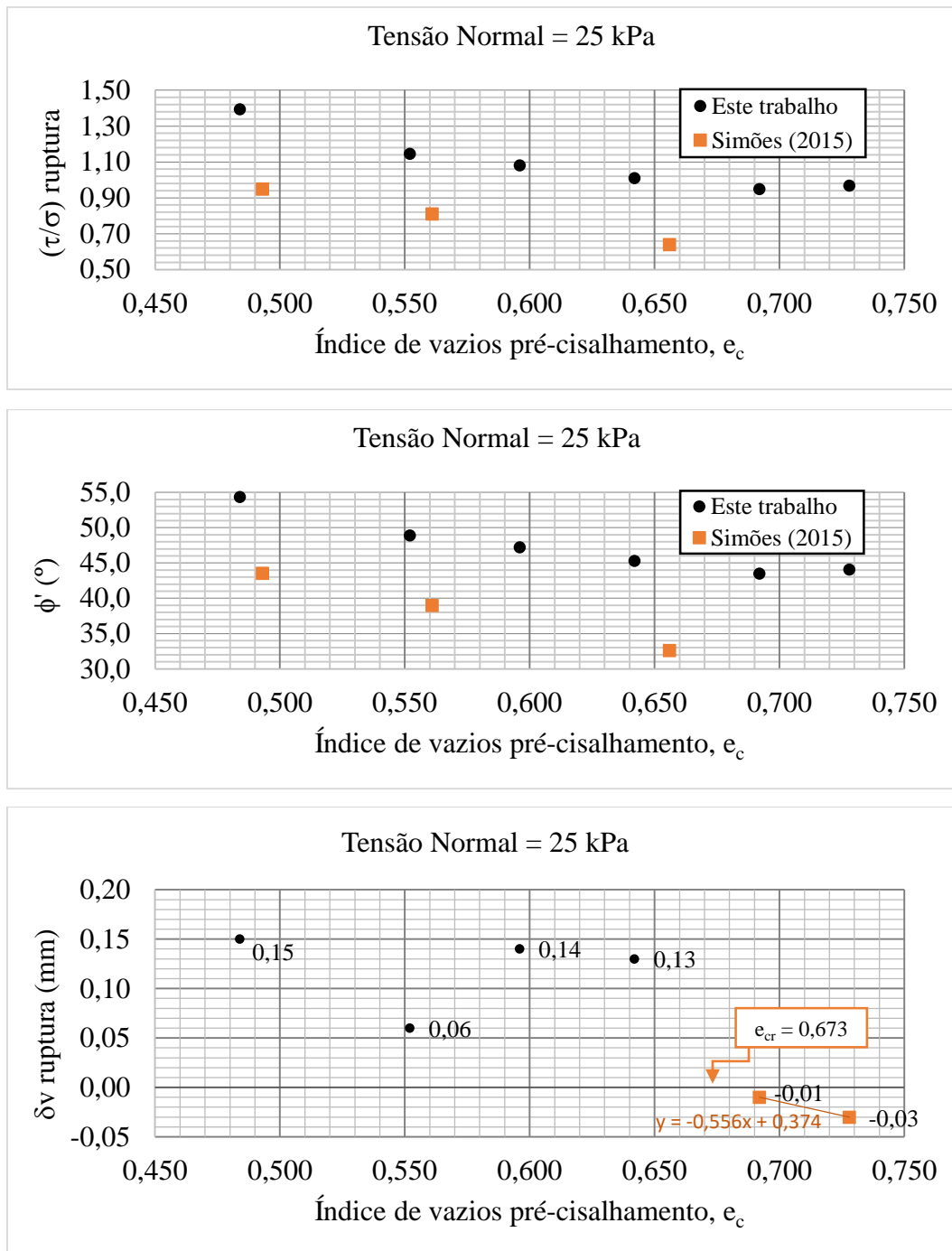


Figura 78 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 25 kPa.

### 4.3.3. Tensão normal nominal igual a 50 kPa

A Tabela 27 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **50 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 13,2 kgf.

Tabela 27 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 50 kPa.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	δh <sub>r</sub> (mm)	δv <sub>r</sub> (mm)	(τ/σ) <sub>r</sub>	φ' (°)
0,710	15	Muito fofo	0,703	18	10,4	2,93	0,04	0,79	38,2
0,698	19	Fofo	0,696	20	10,9	2,63	0,03	0,83	39,5
0,629	40	Médio 1	0,627	41	11,3	2,17	0,09	0,86	40,6
0,609	46	Médio 2	0,601	49	12,3	1,17	0,08	0,93	43,0
0,599	50	Médio 2	0,594	51	12,1	1,39	0,07	0,92	42,5
0,566	60	Compacto	0,563	61	12,7	1,30	0,06	0,96	43,9
0,491	83	Muito compacto	0,488	84	16,5	1,22	0,12	1,25	51,3

A Figura 79 mostra os pontos “tensão cisalhante (τ) sobre tensão normal (σ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito (φ') *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* (δv) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **50 kPa**.

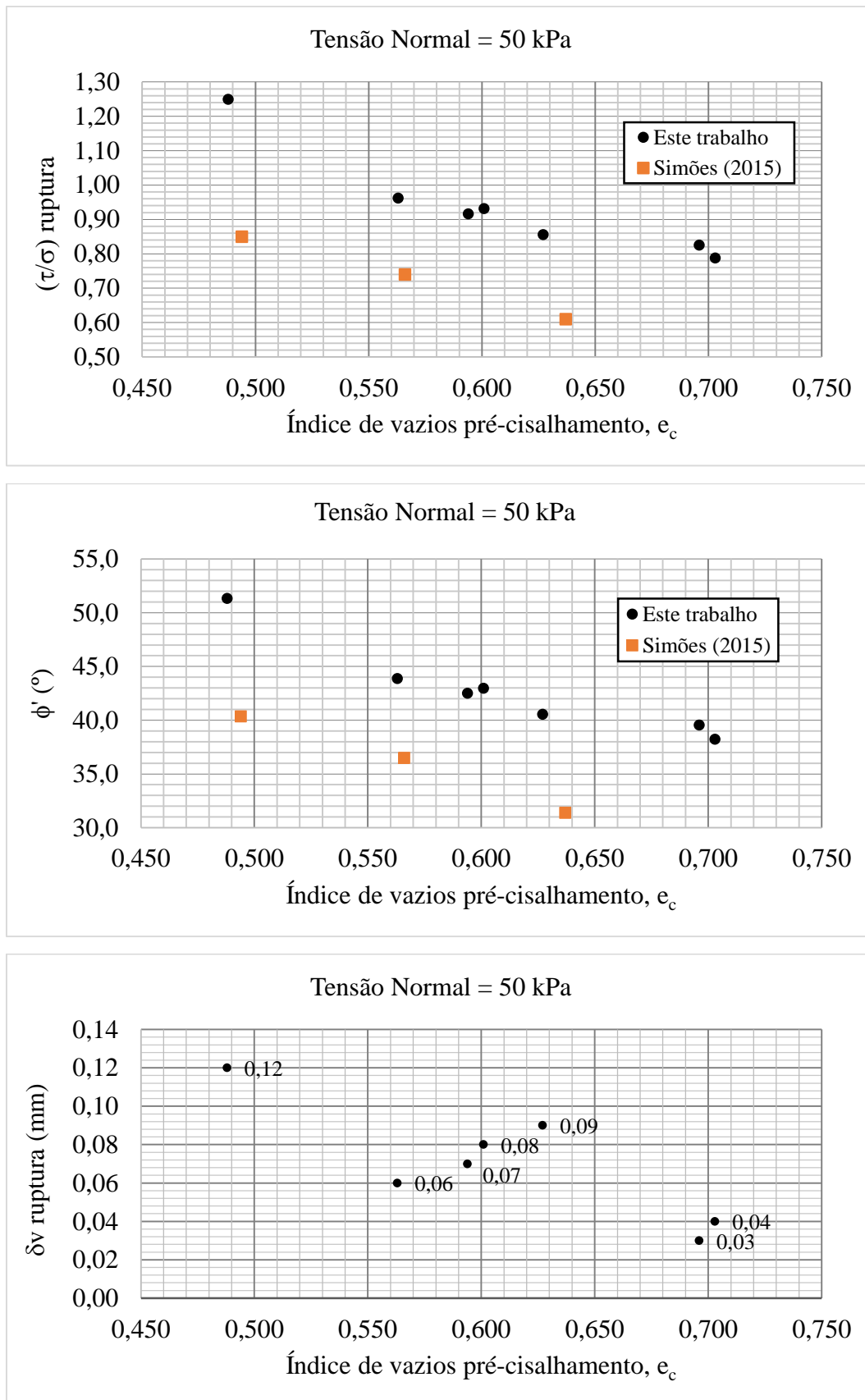


Figura 79 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 50 kPa.

#### 4.3.4. Tensão normal nominal igual a 75 kPa

A Tabela 28 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **75 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 19,7 kgf.

Tabela 28 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 75 kPa.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	δh <sub>r</sub> (mm)	δv <sub>r</sub> (mm)	(τ/σ) <sub>r</sub>	φ' (°)
0,714	14	Muito fofo	0,702	18	14,9	4,78	-0,02	0,76	37,1
0,710	15	Muito fofo	0,688	22	15,4	4,39	0,01	0,78	38,0
0,697	19	Fofo	0,680	25	15,0	3,42	0,01	0,76	37,3
0,643	36	Médio 1	0,626	41	15,6	2,84	0,09	0,79	38,4
0,634	39	Médio 1	0,626	41	15,5	1,88	0,03	0,79	38,2
0,592	52	Médio 2	0,589	53	16,5	1,84	0,13	0,84	39,9
0,581	55	Médio 2	0,576	57	16,9	1,71	0,08	0,86	40,6
0,544	66	Compacto	0,539	68	17,9	2,04	0,18	0,91	42,3
0,483	85	Muito compacto	0,479	86	22,7	1,67	0,16	1,15	49,0
0,475	88	Muito compacto	0,472	89	22,6	1,86	0,20	1,15	48,9

A Figura 80 mostra os pontos “tensão cisalhante (τ) sobre tensão normal (σ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito (φ') *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* (δv) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **75 kPa**.

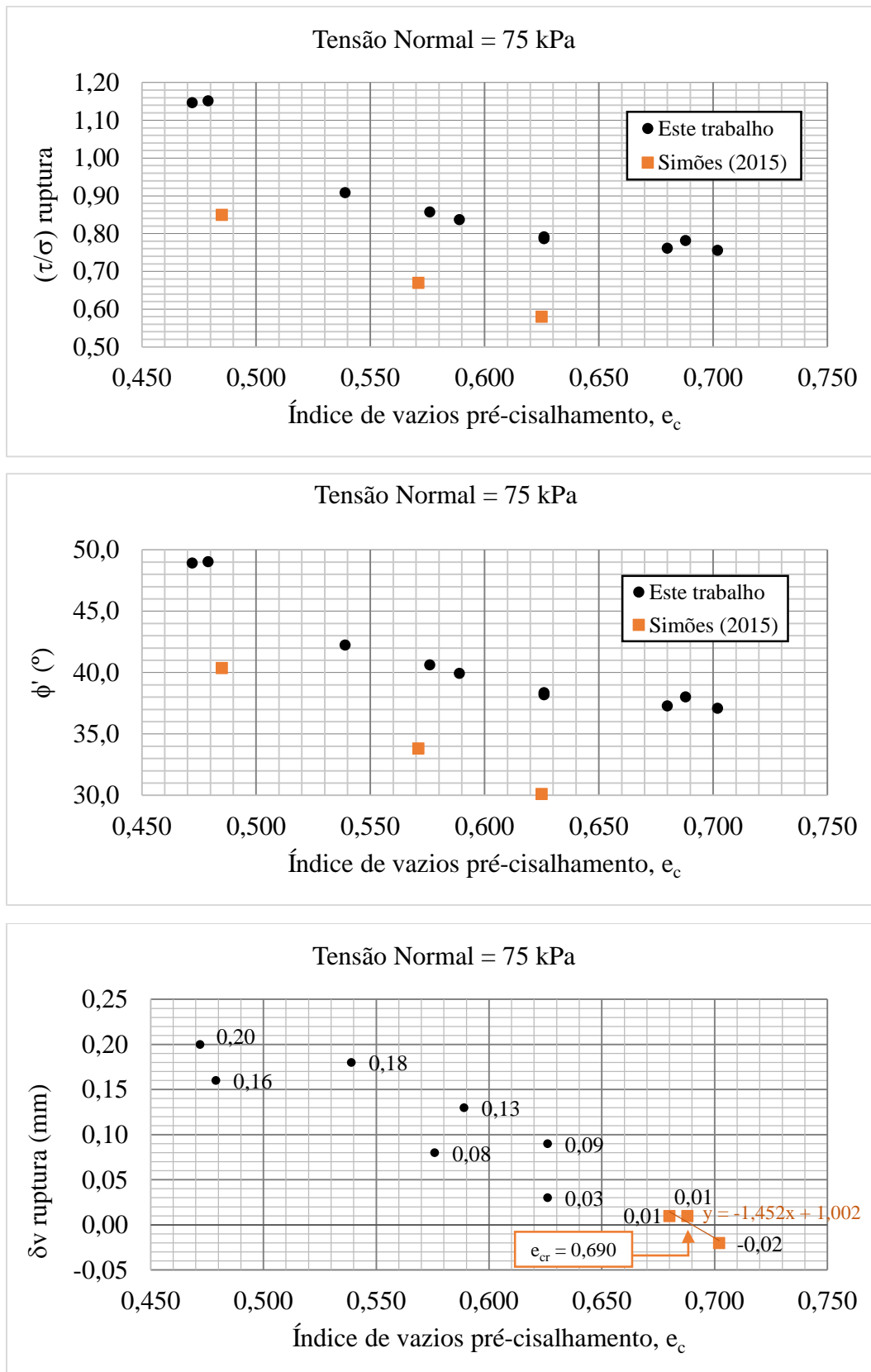


Figura 80 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 75 kPa.



#### 4.3.5. Tensão normal nominal igual a 100 kPa

A Tabela 28 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **100 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 26,4 kgf.

Tabela 29 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 100 kPa.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	δh <sub>r</sub> (mm)	δv <sub>r</sub> (mm)	(τ/σ) <sub>r</sub>	φ' (°)
0,707	16	Muito fofo	0,693	21	19,0	3,07	-0,01	0,72	35,7
0,679	25	Fofo	0,669	28	20,5	5,10	0,03	0,78	37,8
0,627	41	Médio 1	0,605	48	20,5	1,73	0,03	0,78	37,8
0,626	41	Médio 1	0,611	46	19,8	2,92	0,09	0,75	36,9
0,577	56	Médio 2	0,570	58	21,4	2,25	0,10	0,81	39,0
0,552	64	Compacto	0,544	66	24,6	1,96	0,13	0,93	43,0
0,549	65	Compacto	0,541	67	23,4	1,62	0,07	0,89	41,6
0,486	84	Muito compacto	0,480	86	30,0	1,98	0,12	1,14	48,7
0,482	85	Muito compacto	0,478	87	29,5	1,88	0,10	1,12	48,2

A Figura 81 mostra os pontos “tensão cisalhante (τ) sobre tensão normal (σ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito (φ') *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* (δv) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **100 kPa**.

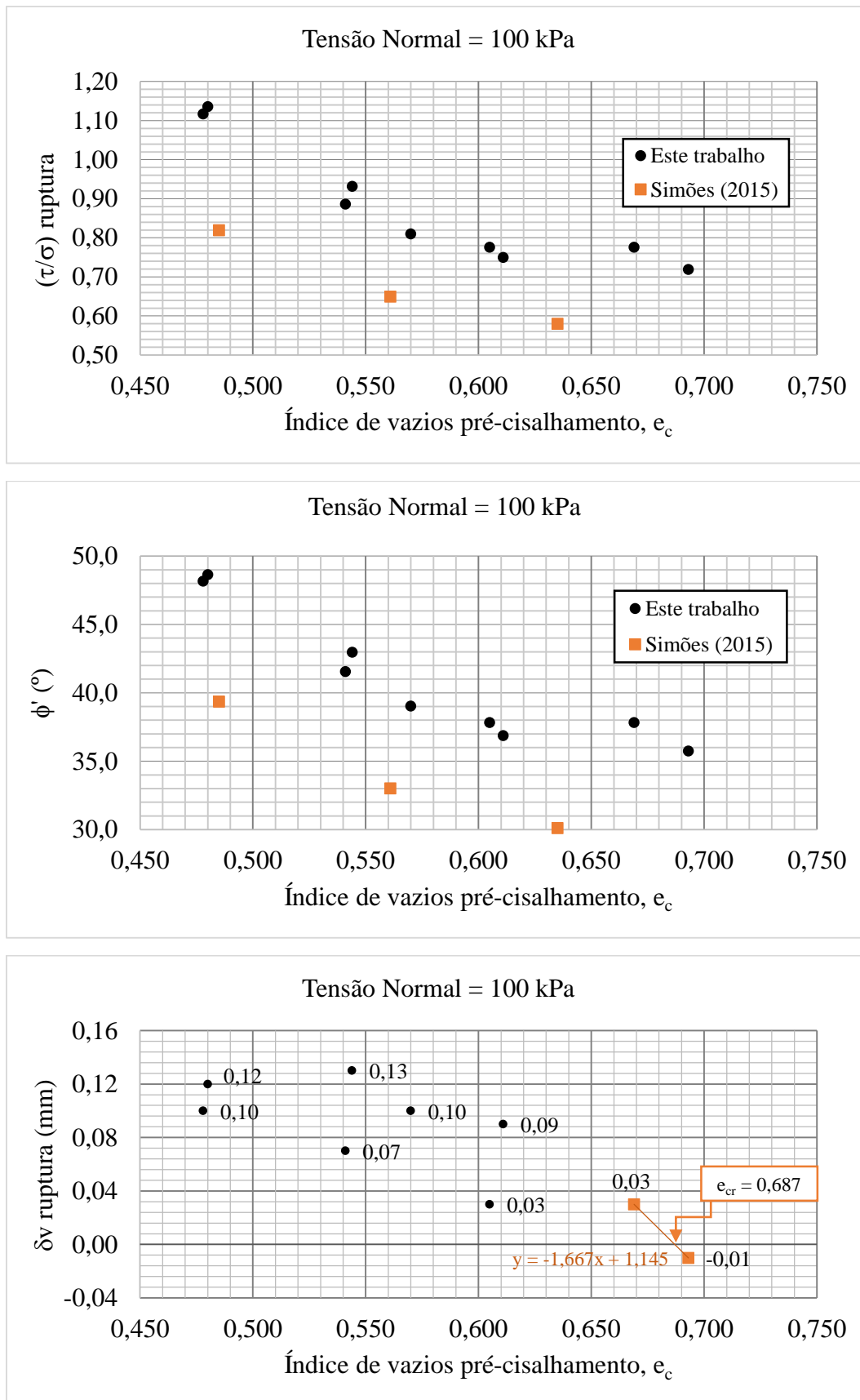


Figura 81 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 100 kPa.

#### 4.3.6. Tensão normal nominal igual a 150 kPa

A Tabela 20 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **150 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 39,5 kgf.

Tabela 30 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 150 kPa.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	δh <sub>r</sub> (mm)	δv <sub>r</sub> (mm)	(τ/σ) <sub>r</sub>	φ' (°)
0,719	13	Muito fofo	0,700	18	26,5	4,79	-0,06	0,67	33,9
0,683	24	Fofo	0,664	30	27,5	2,64	-0,01	0,70	34,8
0,631	40	Médio 1	0,620	43	27,5	1,82	0,06	0,70	34,8
0,586	53	Médio 2	0,573	58	28,9	1,26	0,08	0,73	36,2
0,566	60	Compacto	0,547	66	34,7	2,24	0,07	0,88	41,3
0,552	64	Compacto	0,544	66	32,0	1,40	0,14	0,81	39,0
0,488	84	Muito compacto	0,479	86	40,9	1,10	0,14	1,04	46,0

A Figura 82 mostra os pontos “tensão cisalhante (τ) sobre tensão normal (σ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito (φ') *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* (δv) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **150 kPa**.

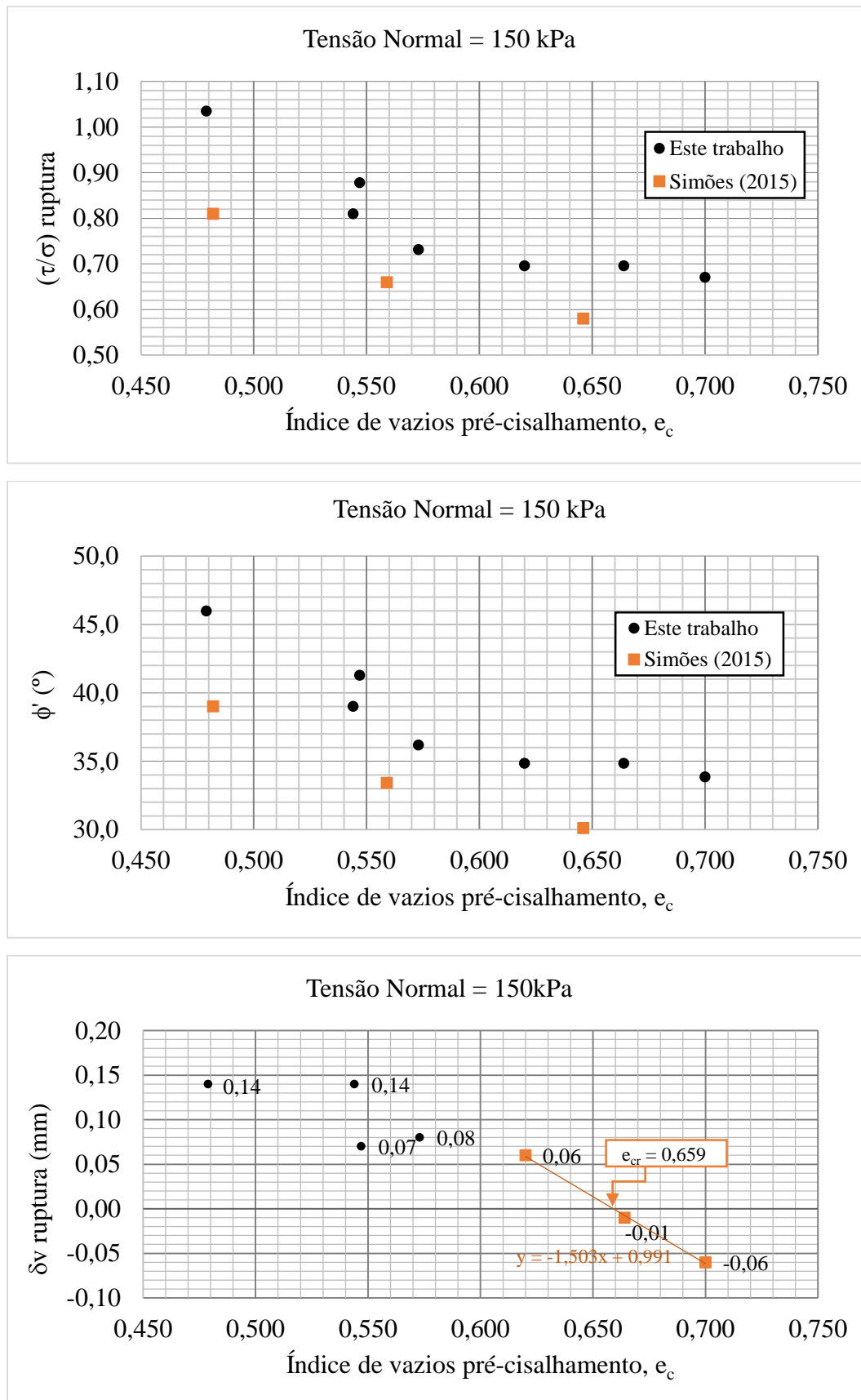


Figura 82 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 150 kPa.

#### 4.3.7. Tensão normal nominal igual a 300 kPa

A Tabela 31 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **300 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 79,0 kgf.

Tabela 31 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 300 kPa.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	δh <sub>r</sub> (mm)	δv <sub>r</sub> (mm)	(τ/σ) <sub>r</sub>	φ' (°)
0,727	10	Muito fofo	0,707	16	51,6	3,86	0,00	0,65	33,2
0,701	18	Fofo	0,682	24	50,5	2,85	-0,02	0,64	32,6
0,627	41	Médio 1	0,612	46	51,4	1,54	0,02	0,65	33,0
0,581	55	Médio 2	0,567	59	56,6	1,59	0,07	0,72	35,6
0,546	66	Compacto	0,533	70	63,3	1,49	0,08	0,80	38,7
0,480	86	Muito compacto	0,462	92	76,8	1,64	0,15	0,97	44,2

A Figura 83 mostra os pontos “tensão cisalhante (τ) sobre tensão normal (σ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito (φ') *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* (δv) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **300 kPa**.

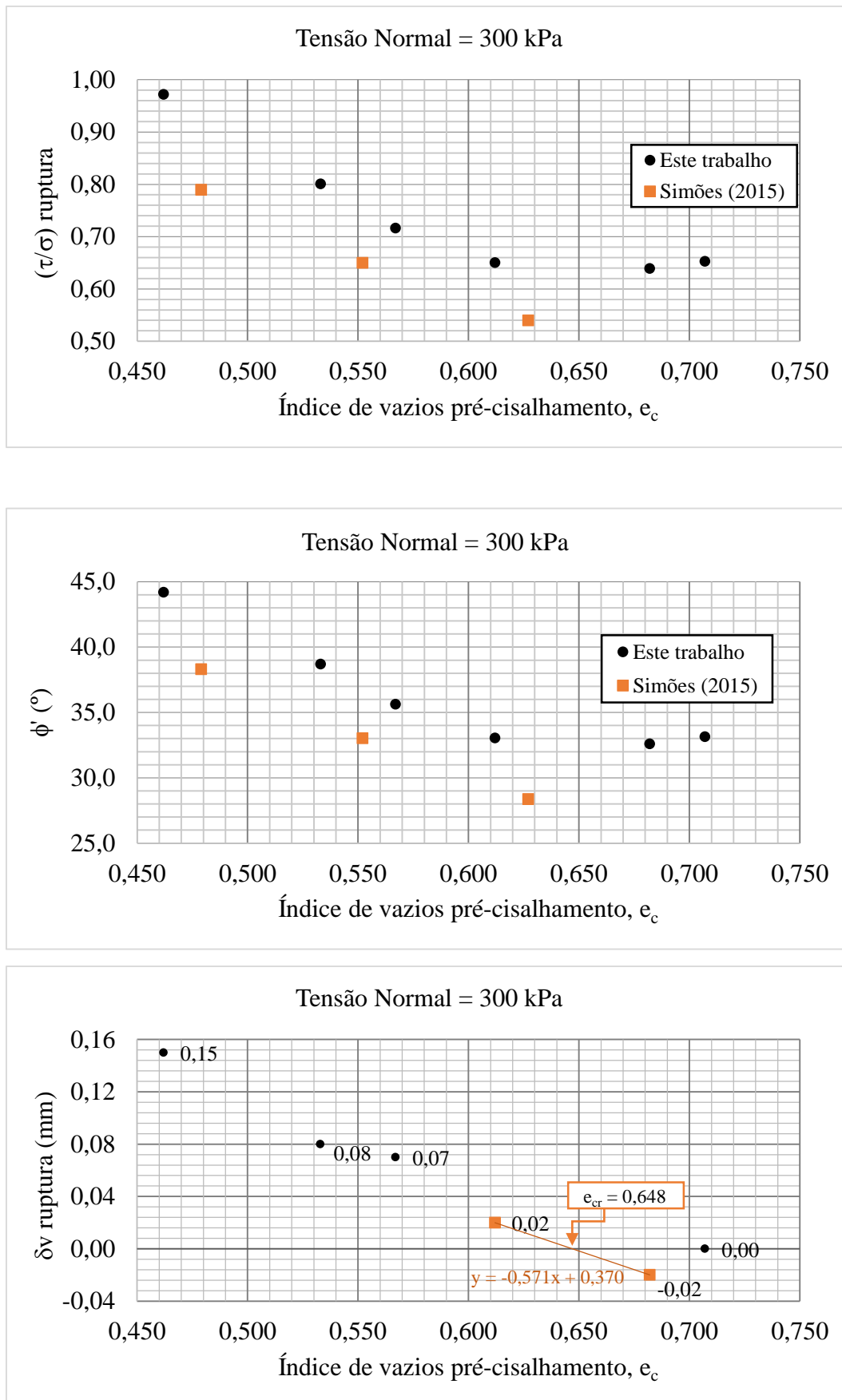


Figura 83 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 300 kPa.

#### 4.3.8. Tensão normal nominal igual a 500 kPa

A Tabela 32 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **500 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 132 kgf.

Tabela 32 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 500 kPa.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	δh <sub>r</sub> (mm)	δv <sub>r</sub> (mm)	(τ/σ) <sub>r</sub>	φ' (°)
0,723	12	Muito fofo	0,700	18	80,4	3,21	-0,04	0,61	31,3
0,683	24	Fofo	0,660	31	80,6	3,96	-0,02	0,61	31,4
0,605	48	Médio 1	0,579	56	84,3	2,44	0,00	0,64	32,6
0,581	55	Médio 2	0,559	62	94,9	2,16	0,06	0,72	35,7
0,557	63	Compacto	0,530	71	101	1,81	0,05	0,77	37,4
0,545	66	Compacto	0,525	72	99,1	1,92	0,06	0,75	36,9
0,477	87	Muito compacto	0,451	95	120	1,95	0,10	0,91	42,3

A Figura 84 mostra os pontos “tensão cisalhante (τ) sobre tensão normal (σ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito (φ') *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* (δv) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **500 kPa**.

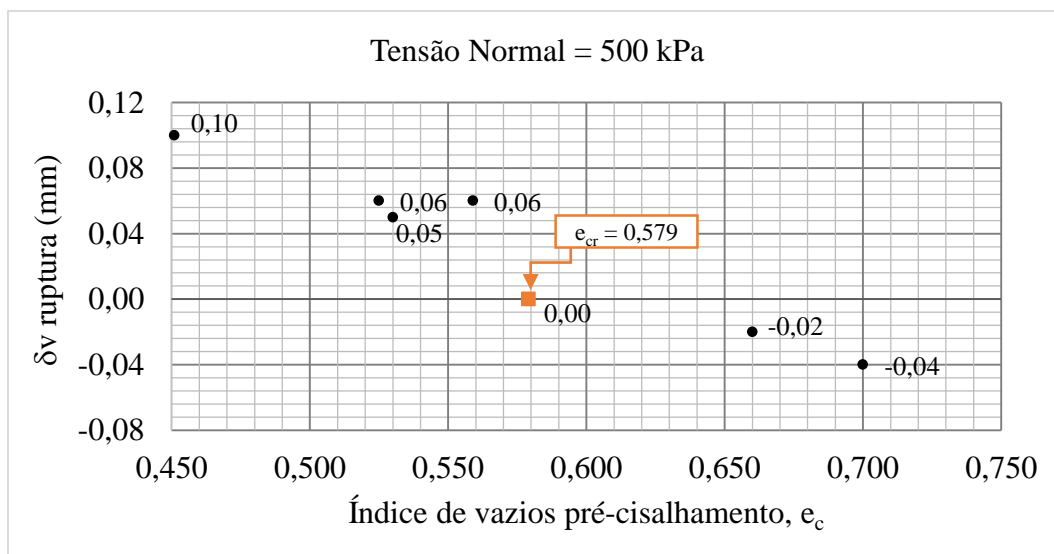
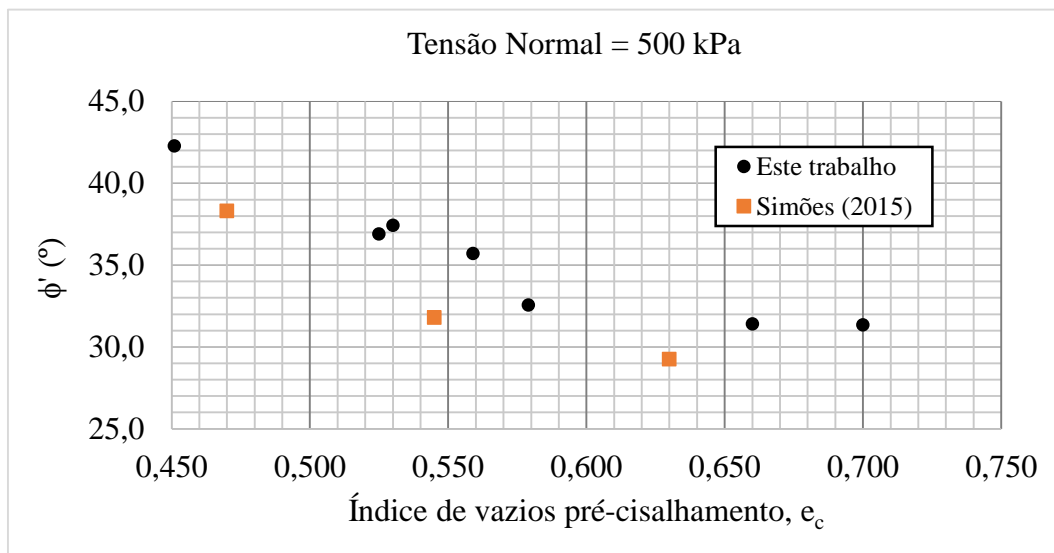
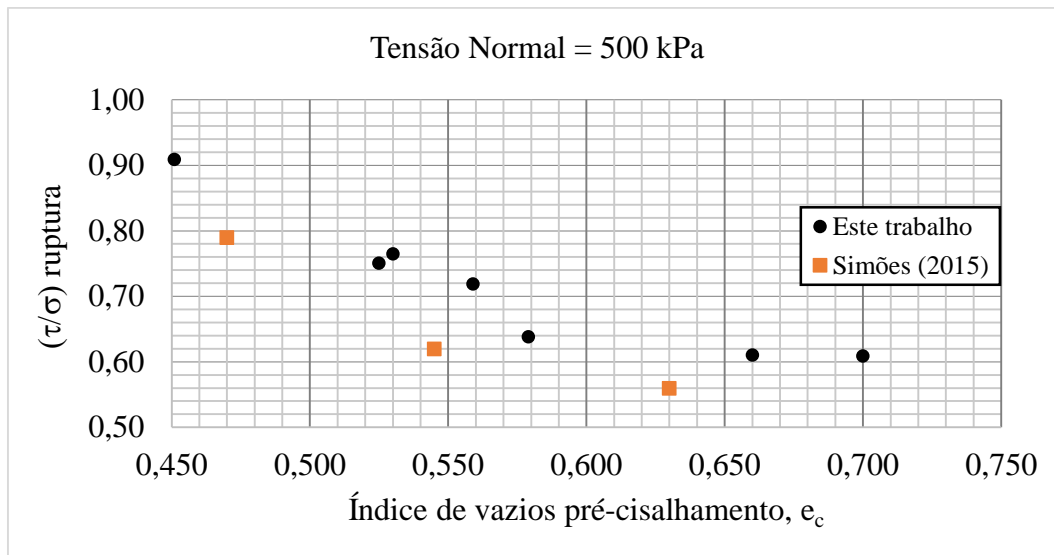


Figura 84 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 500 kPa.



#### 4.3.9. Tensão normal nominal igual a 750 kPa

A Tabela 33 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **750 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 197 kgf.

Tabela 33 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 750 kPa.

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	$\delta h_r$ (mm)	$\delta v_r$ (mm)	$(\tau/\sigma)_r$	$\phi'$ (°)
0,710	15	Muito fofo	0,680	25	119	6,52	-0,13	0,60	31,1
0,686	23	Fofo	0,659	31	118	5,90	-0,11	0,60	30,9
0,630	40	Médio 1	0,607	47	122	3,26	-0,05	0,62	31,8
0,592	52	Médio 2	0,563	61	129	3,09	0,02	0,65	33,2
0,551	64	Compacto	0,528	71	144	2,55	0,04	0,73	36,2
0,474	88	Muito compacto	0,444	97	172	2,56	0,07	0,87	41,1

A Figura 85 mostra os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **750 kPa**.

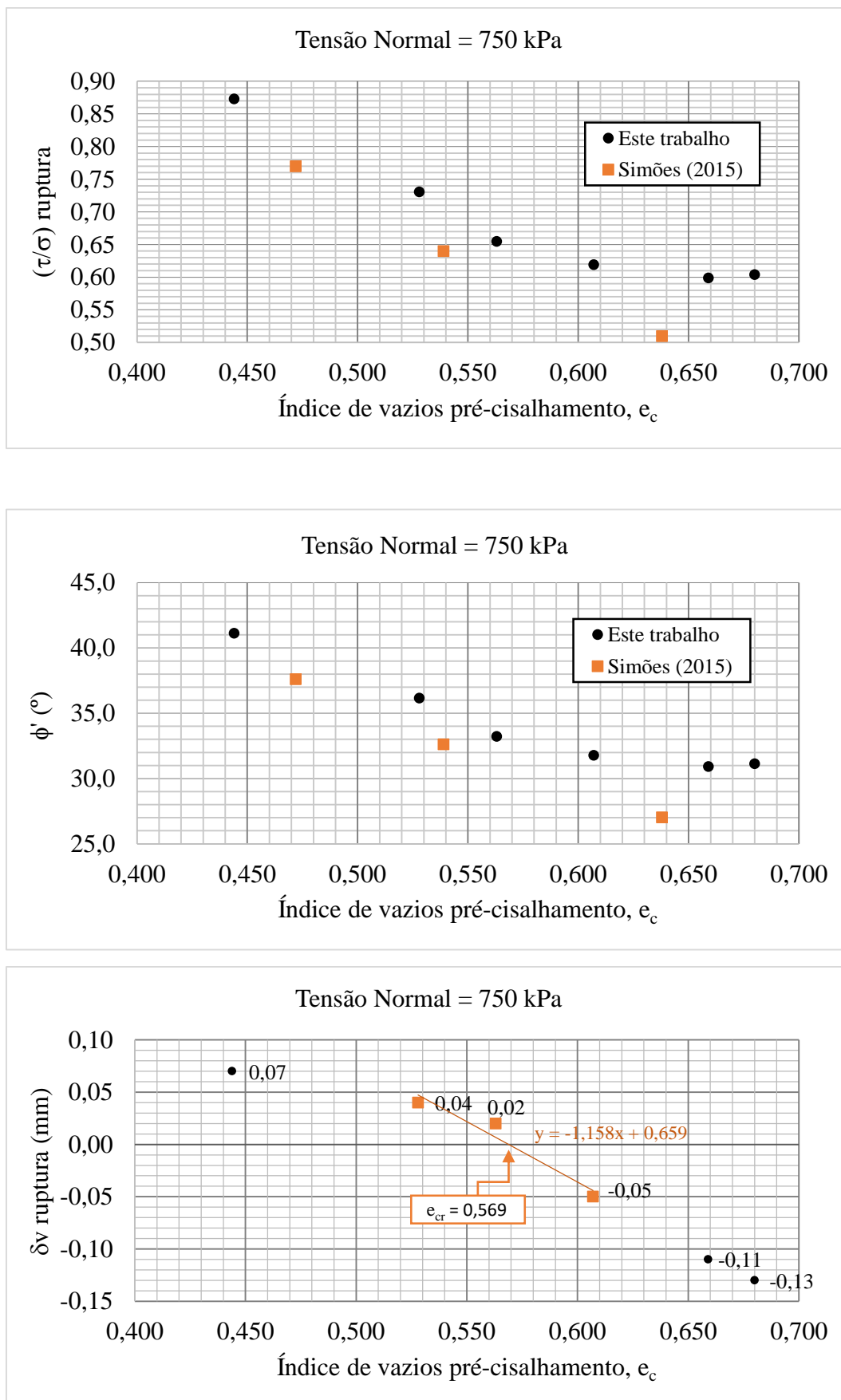


Figura 85 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 750 kPa.

#### 4.3.10. Tensão normal nominal igual a 1000 kPa

A Tabela 34 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **1000 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 263 kgf.

Tabela 34 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 1000 kPa

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	δh <sub>r</sub> (mm)	δv <sub>r</sub> (mm)	(τ/σ) <sub>r</sub>	φ' (°)
0,723	12	Muito fofo	0,684	23	156	5,17	-0,12	0,59	30,7
0,683	24	Fofo	0,646	35	158	4,83	-0,09	0,60	31,0
0,639	37	Médio 1	0,606	47	158	4,26	-0,06	0,60	31,0
0,598	50	Médio 2	0,563	61	170	3,29	0,00	0,65	32,9
0,551	64	Compacto	0,519	74	193	3,12	0,05	0,73	36,3
0,491	83	Muito compacto	0,451	95	226	3,12	0,09	0,86	40,7

A Figura 86 mostra os pontos “tensão cisalhante (τ) sobre tensão normal (σ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito (φ') *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* (δv) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **1000 kPa**.

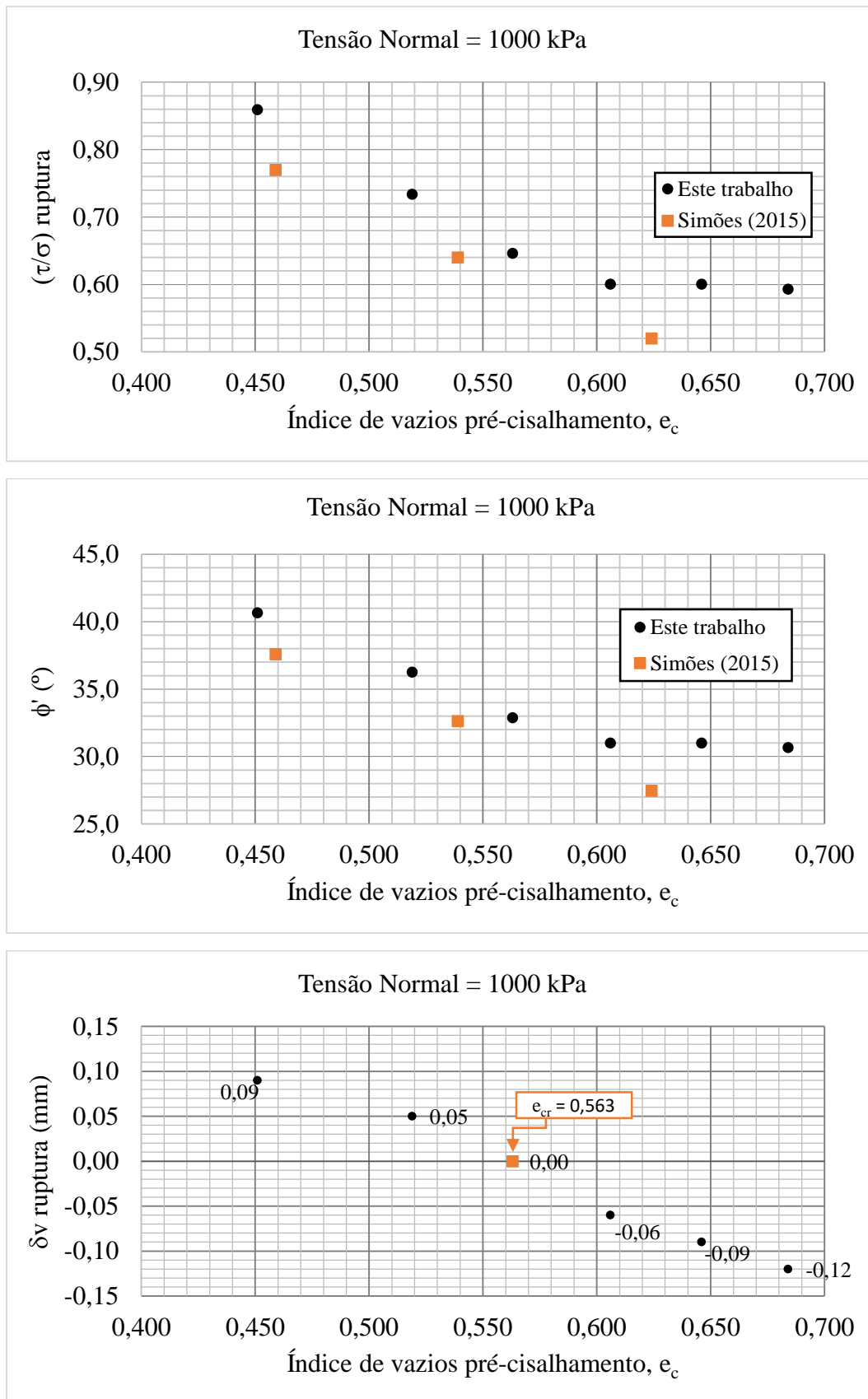


Figura 86 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 1000 kPa.

#### 4.3.11. Tensão normal nominal igual a 1250 kPa

A Tabela 35 apresenta as informações descritas no item 4.2.1 dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **1250 kPa**, correspondente a uma força normal (N) aplicada de 329 kgf.

Tabela 35 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto sob tensão normal nominal de 1250 kPa

$e_0$	CR <sub>0</sub> (%)	Domínio de CR <sub>0</sub>	$e_c$	CR <sub>c</sub> (%)	Na ruptura				
					T <sub>r</sub> (kgf)	$\delta h_r$ (mm)	$\delta v_r$ (mm)	$(\tau/\sigma)_r$	$\phi'$ (°)
0,719	13	Muito fofo	0,682	24	193	6,72	-0,16	0,59	30,4
0,673	27	Fofo	0,637	38	194	5,14	-0,11	0,59	30,5
0,634	39	Médio 1	0,594	51	195	4,55	-0,05	0,59	30,7
0,625	42	Médio 1	0,594	51	201	4,32	-0,05	0,61	31,4
0,583	54	Médio 2	0,542	67	209	3,18	0,01	0,64	32,4
0,549	65	Compacto	0,516	75	232	3,42	0,06	0,71	35,2
0,481	86	Muito compacto	0,441	98	270	3,63	0,08	0,82	39,4

A Figura 87 mostra os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de **1250 kPa**.

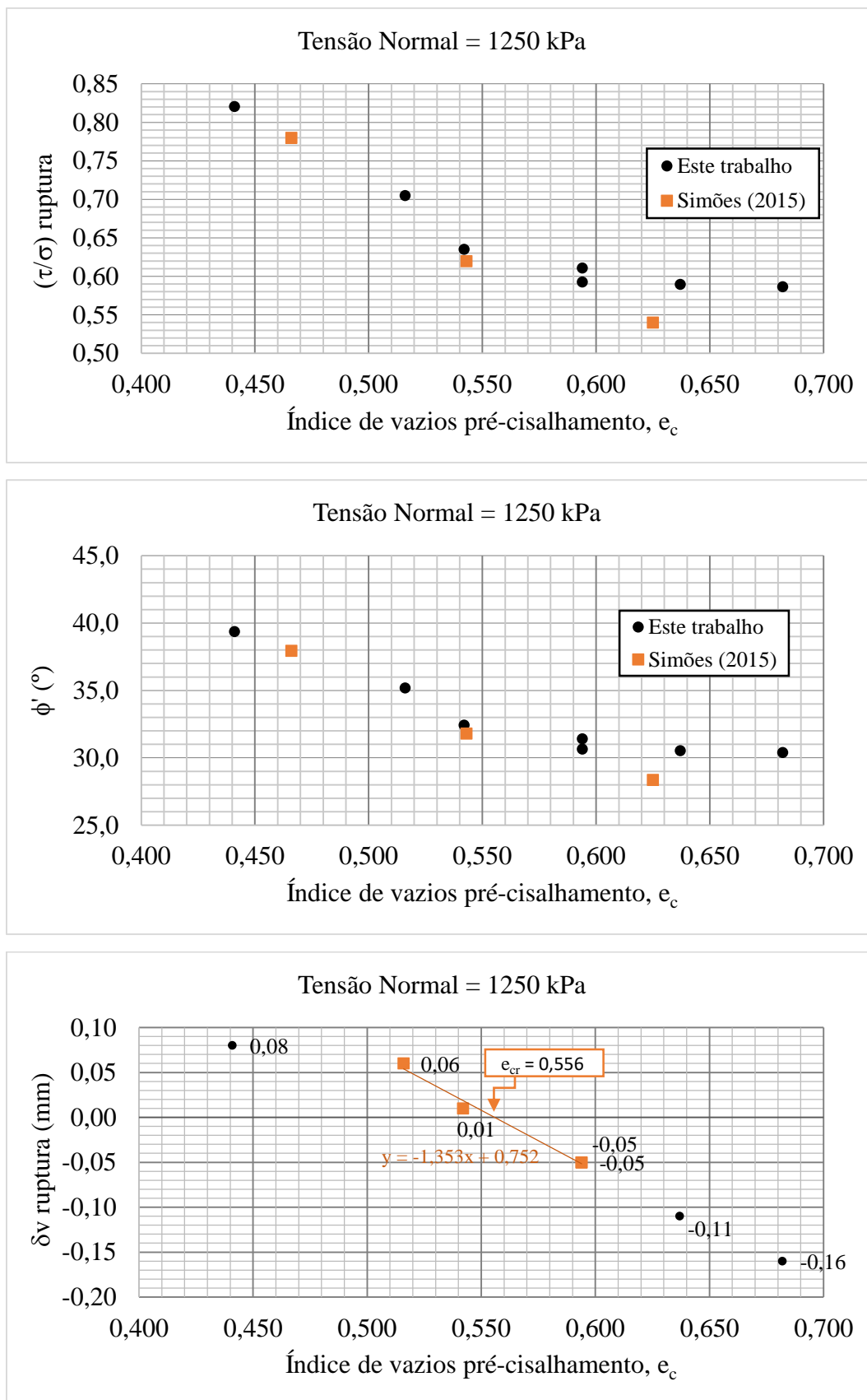


Figura 87 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensão normal nominal de 1250 kPa.

#### 4.3.12. Análise dos resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto agrupados por tensão normal nominal

A partir da análise dos resultados na ruptura conforme apresentados nos itens 4.3.2 a 4.3.11 podem ser feitas as seguintes observações:

- 1) Das Tabelas 26 a 35 e das curvas “ $(\tau/\sigma)_r \times e_c$ ” e “ $\phi' \times e_c$ ” (Figuras 78 a 87), observa-se que, para uma dada tensão normal nominal fixada, quanto menor o índice de vazios do corpo de prova pré-cisalhamento ( $e_c$ ) (maior a compacidade relativa,  $CR_c$ ), maior tende a ser a resistência ao cisalhamento ( $T_r$ ) medida e, por conseguinte, a razão  $(\tau/\sigma)_r$  e o ângulo de atrito ( $\phi'$ ). Na realidade, percorrendo o domínio de  $e_c$  do maior valor para o menor valor nas curvas citadas e comparando com as curvas “ $\delta v_r \times e_c$ ”, observa-se que, de um modo geral, o aumento de  $(\tau/\sigma)_r$  e de  $\phi'$  inicia-se na região de domínio de  $e_c$  onde começa haver dilatação na ruptura, isto é,  $\delta v_r$  deixa de ser negativo (contração) e passa a ser positivo (dilatação). A partir de então, quanto menor o valor de  $e_c$  (maior o valor de  $CR_c$ ), maior a dilatação na ruptura, e maiores os valores de  $(\tau/\sigma)_r$  e de  $\phi'$ . Este aspecto é mais nítido para as tensões normais nominais maiores do que 100 kPa.
- 2) Das Tabelas 26 a 35, observa-se ainda que, para uma tensão normal nominal fixada, o deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) apresenta uma nítida tendência de diminuição com a redução do índice de vazios do corpo de prova pré-cisalhamento ( $e_c$ ), isto é, aumento de  $CR_c$ .
- 3) De uma forma geral, as curvas “ $\delta v_r \times e_c$ ” (Figuras 78 a 87) mostram que, para uma dada tensão normal nominal fixada, quanto menor o índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ ) (maior a  $CR_c$ ), menor a contração na ruptura (quando ela ocorre) e maior a dilatação na ruptura, isto é, maior o valor de  $\delta v$  na ruptura. A contração na ruptura ( $\delta v_r < 0$ ) ocorre para os maiores valores de  $e_c$ , e o subdomínio de  $e_c$  onde ocorre a contração é tanto maior quanto maior a tensão normal nominal.

Comparando os resultados desta pesquisa com os resultados de Simões (2015), das curvas “ $(\tau/\sigma)_r \times e_c$ ” e “ $\phi' \times e_c$ ” (Figuras 78 a 87), observa-se que os valores de  $(\tau/\sigma)_r$  e  $\phi'$  obtidos neste trabalho são maiores que os obtidos por Simões (2015). Todavia, tal diferença diminui à medida que a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) aumenta, sendo que para  $\sigma_n = 1250$  kPa (Figura 87) os valores são bastante semelhantes, exceto para o índice de vazios mais elevado de Simões (2015),  $e_c = 0,625$ . Tal diferença provavelmente está relacionada ao fato de nesta pesquisa os ensaios terem sido realizados com o dispositivo idealizado para impedir a rotação do *top cap*, que não foi utilizado na pesquisa de Simões (2015). Esse assunto voltará a ser discutido mais adiante.

#### 4.4.

#### **Resumo geral dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto**

Os gráficos a seguir ilustram de forma geral a comparação dos resultados na ruptura obtidos dos ensaios de cisalhamento direto. São apresentados os pontos “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal”, os pontos “ângulo de atrito ( $\phi'$ ) *versus* tensão normal nominal” e os pontos “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) na ruptura *versus* tensão normal nominal” obtidos dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados em todos os domínios de compactidade relativa.



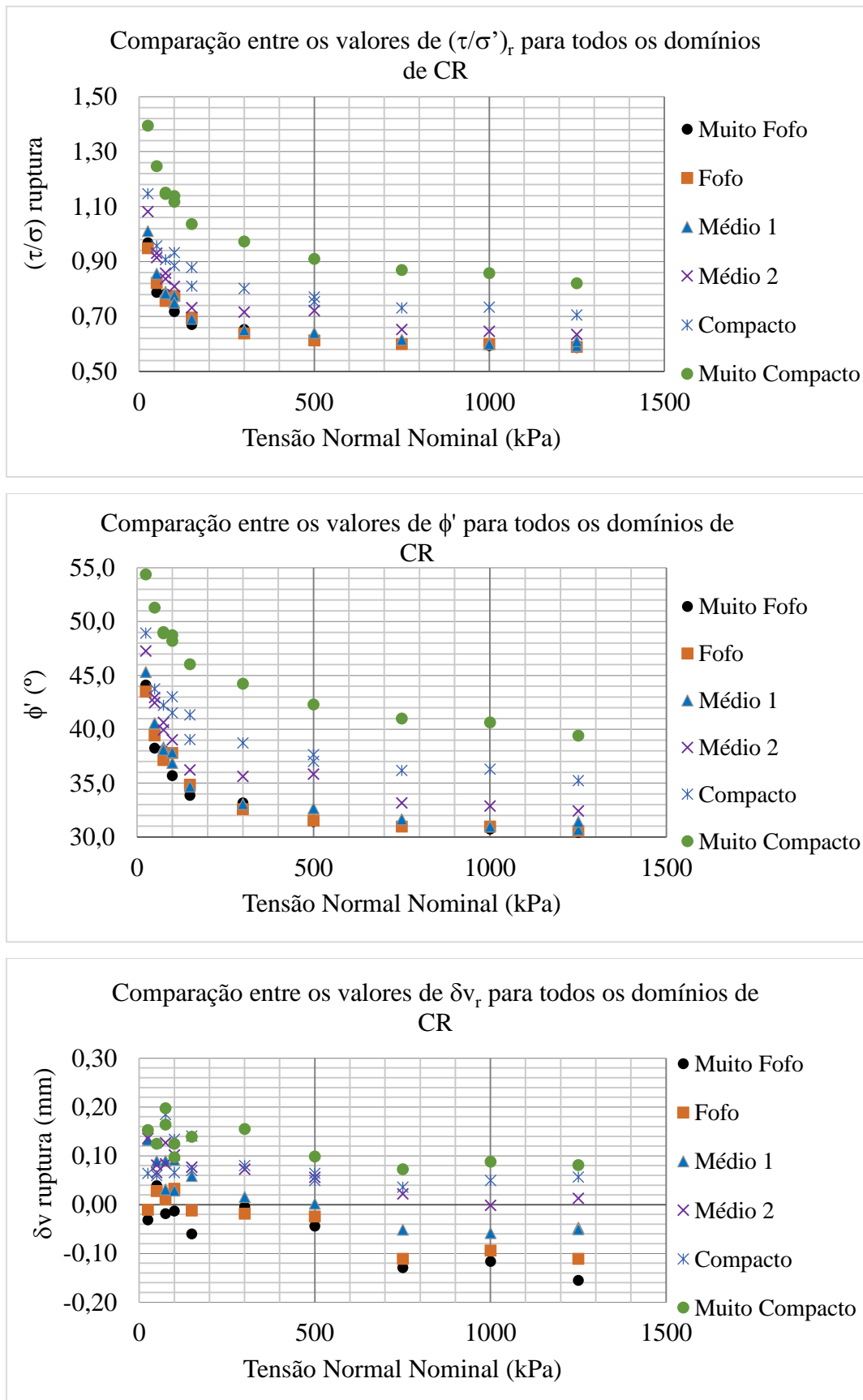


Figura 88 - Resultados na ruptura dos ensaios de cisalhamento direto moldados em cada domínio de compactidade relativa agrupados

Das curvas “ $(\tau/\sigma)_r \times \sigma_n$ ” e “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 88), observa-se que, para uma dada compacidade relativa (CR), a razão  $(\tau/\sigma)_r$  e, por conseguinte, o ângulo de atrito ( $\phi'$ ) diminuem com o aumento da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ). Isto ocorre porque o aumento de  $\sigma_n$  diminui a dilatação na ruptura podendo levar à contração na ruptura, conforme pode ser visto nas curvas “ $\delta v_r \times \sigma_n$ ”.

Analizando as mesmas curvas, porém fixando agora a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), nota-se que a razão  $(\tau/\sigma)_r$  e, por conseguinte, o ângulo de atrito ( $\phi'$ ) diminuem com o aumento do índice de vazios do corpo de prova pré-cisalhamento ( $e_c$ ), isto é, com a diminuição da compacidade relativa pré cisalhamento ( $CR_c$ ). Isto ocorre porque, para um dado valor de  $\sigma_n$ , quanto menor a compacidade relativa, menor a dilatação na ruptura, podendo até mesmo passar a haver contração na ruptura, conforme pode ser visto nos gráficos “ $\delta v_r \times \sigma_n$ ”.

Das curvas “ $(\tau/\sigma)_r \times \sigma_n$ ” e “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 88), observa-se ainda que para os domínios de compacidade relativa “muito fofo”, “fofo” e “médio 1” as razões  $(\tau/\sigma)_r$  e, por conseguinte, os ângulos de atrito ( $\phi'$ ) possuem valores muito próximos entre si para um dado valor de  $\sigma_n$ , e praticamente coincidindo para  $\sigma_n \geq 300$  kPa. Observa-se que para  $\sigma_n \geq 300$  kPa, praticamente todos os corpos de prova apresentaram contração na ruptura ( $\delta v_r < 0$ ). Para  $\sigma_n \geq 750$  kPa, todos os ângulos de atrito destes três domínios de compacidade relativa ficaram situados entre  $30,4^\circ$  e  $31,6^\circ$ . É dentro desse intervalo que deve estar situado o ângulo de atrito a volume constante da Areia da Praia de Ipanema. Esse assunto voltará a ser abordado mais adiante. Por outro lado, ainda no que diz respeito a estes três domínios de compacidade relativa, observa-se que para  $\sigma_n \leq 150$  kPa todos os corpos de prova do domínio “médio 1” e alguns do domínio “fofo” apresentam dilatação na ruptura ( $\delta v_r > 0$ ), e esta é a razão pela qual os valores de  $\phi'$  destes três domínios ficam mais distantes entre si para um dado valor de  $\sigma_n$ .

Ademais, ainda das curvas “ $(\tau/\sigma)_r \times \sigma_n$ ” e “ $\phi' \times \sigma_n$ ” (Figura 88), observam-se diferenças muito maiores entre os valores de  $\phi'$  para um dado valor de tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) entre os domínios de compacidade relativa “médio 2”, “compacto” e “muito compacto”, o que pode ser creditado à dilatação presente nestes três domínios de compacidade relativa para praticamente todos os valores de  $\sigma_n$ , sendo tanto maior quanto maior a compacidade relativa. A influência da

dilatância nos valores de ângulo de atrito ( $\phi'$ ) medidos será abordada mais adiante à luz do modelo de Taylor (1948), aprimorado por Atkinson & Bransby (1978).

Finalmente, as curvas “ $\delta v_r \times \sigma_n$ ” (Figura 88) mostram que, para um dado domínio de compacidade relativa, quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), menor tende a ser a dilatação na ruptura ou maior tende a ser a contração na ruptura. Fixando agora a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), quanto maior a compacidade relativa, maior a dilatação na ruptura ou menor a contração na ruptura.

#### 4.5.

#### **Construção da curva índice de vazios crítico *versus* tensão normal nominal crítica**

Para a construção da curva “índice de vazios crítico *versus* tensão normal nominal crítica” foi aplicada a metodologia sugerida por Pinto (2006), descrita no fim do item 2.1.4.5 e ilustrada na Figura 26. Tal metodologia foi aplicada nos gráficos “deslocamento vertical do *top cap* na ruptura ( $\delta v_r$ ) *versus* índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, apresentados nas Figuras 78 a 87 (item 4.3), cada qual correspondente a cada um dos dez valores de tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) aplicados nos ensaios. Assim, em cada uma dessas curvas, obteve-se o índice de vazios correspondente a  $\delta v_r = 0$ , interpolando uma reta (por regressão linear no *excel*) aos pontos do gráfico mais próximos de  $\delta v_r = 0$  (destacados no símbolo quadrado na cor verde), e determinando a interseção da reta interpolada à horizontal correspondente a  $\delta v_r = 0$ . A ordenada do ponto de interseção vem a ser o índice de vazios crítico ( $e_{cr}$ ) associado à tensão normal nominal analisada. Estes pontos de interseção, com os respectivos valores de  $e_{cr}$ , estão indicados nas curvas “ $\delta v_r$  *versus*  $e_c$ ” das Figuras 78 a 87

As exceções da metodologia acima descrita foram:

- 1) Para  $\sigma_n = 25$  kPa (Figura 78) o valor do índice de vazios crítico foi obtido por retro extrapolação da reta interpolada.
- 2) Para  $\sigma_n = 50$  kPa (Figura 79) não foi determinado o valor do índice de vazios crítico, uma vez que, para todos os domínios de compacidade relativa obteve-se  $\delta v_r > 0$ .

- 3) Para  $\sigma_n = 500$  kPa (Figura 84) e  $\sigma_n = 1000$  kPa (Figura 86), o valor do índice de vazios crítico foi considerado como o valor do índice de vazios do ensaio no qual observou-se  $\delta v_r = 0$ .

Os pontos  $(\sigma_n, e_{cr})$  assim obtidos são coordenadas da curva “índice de vazios crítico ( $e_{cr}$ ) *versus* tensão normal nominal crítica ( $\sigma_n$ )”. A Tabela 36, a seguir, apresenta as coordenadas obtidas para a construção da curva “ $e_{cr} \times \sigma_n$ ”.

Tabela 36 – Coordenadas obtidas para a construção da curva “ $e_{cr} \times \sigma_n$ ”

$\sigma_n$ (kPa)	$e_{cr}$
25	0,673
75	0,690
100	0,687
150	0,659
300	0,648
500	0,579
750	0,569
1000	0,563
1250	0,556

Da Tabela 36, observa-se que, com exceção do ponto correspondente a  $\sigma_n = 25$  kPa, à medida que a tensão normal nominal aumenta, o valor do índice de vazios crítico ( $e_{cr}$ ) a ela associado diminui.

Os pontos dessas coordenadas estão indicados na Figura 89, a seguir. A partir da interpolação visual desses pontos foi traçada a curva “índice de vazios crítico *versus* tensão normal nominal crítica” da Areia da Praia de Ipanema, obtida de ensaios de cisalhamento direto.

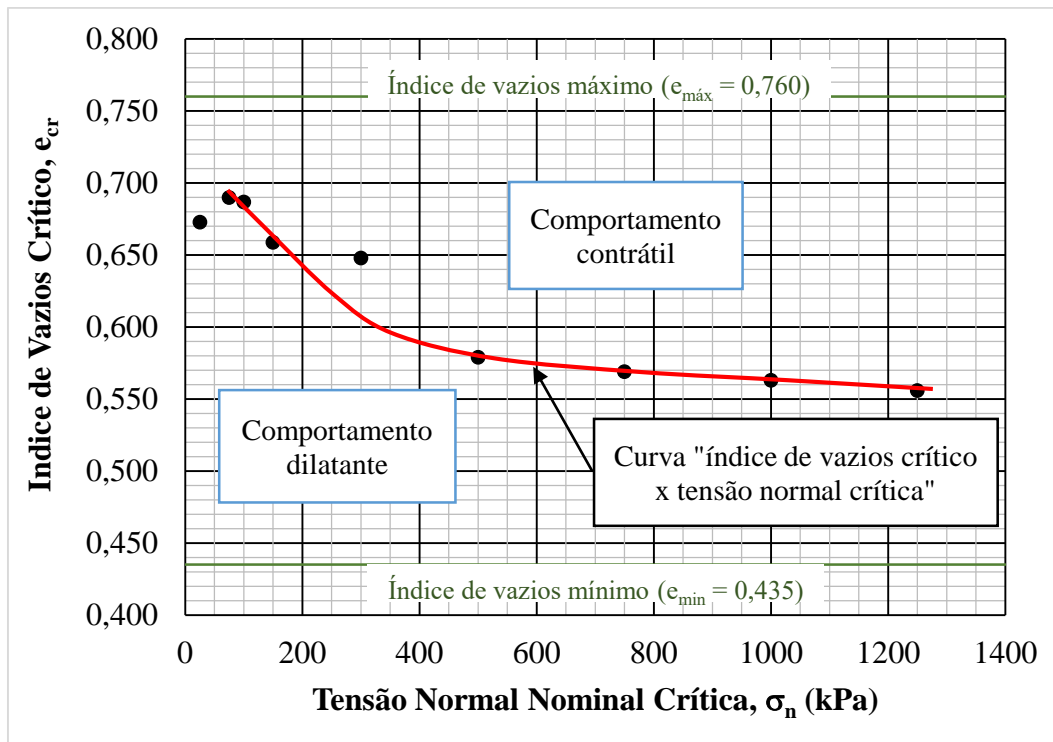


Figura 89 - Curva “índice de vazios crítico x tensão normal nominal crítica” da Areia da Praia de Ipanema obtida de ensaios de cisalhamento direto

A curva “índice de vazios crítico *versus* tensão normal nominal crítica” divide o espaço “índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ ) - tensão normal nominal ( $\sigma_n$ )” em duas regiões, a saber: se a areia for cisalhada com uma combinação ( $e_c$ ,  $\sigma_n$ ) acima da curva, o seu comportamento será **contrátil** ( $\delta v_r < 0$ ); se a areia for cisalhada com uma combinação ( $e_c$ ,  $\sigma_n$ ) abaixo da curva, o seu comportamento será **dilatante** ( $\delta v_r > 0$ ).

#### 4.6.

#### Análise do fenômeno da dilatância segundo a abordagem de Taylor (1948)

Conforme discutido no item 2.1.4.4, o fenômeno da dilatância em um ensaio de cisalhamento direto foi associado por Taylor (1948) ao trabalho (energia) adicional realizado pela a tensão (força) cisalhante no plano de ruptura contra a tensão (força) normal, para que as partículas de areia se movam ascendentemente e o corpo de prova sofra cisalhamento e ruptura.

Segundo Taylor (1948), a tensão cisalhante ( $\tau_{ff}$ ) necessária para levar à ruptura um corpo de prova de areia de comportamento dilatante pode ser dividida em duas parcelas, a saber: uma parcela necessária para romper a areia a volume constante ( $\tau_{cv}$ ), e uma parcela de dilatação ( $\tau_e$ ), a qual realiza o trabalho adicional contra a tensão normal para expandir o corpo de prova. O modelo de Taylor (1948) está ilustrado na Figura 17 (item 2.1.4.4), elaborada por Simões (2015).

Todas as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” obtidas dos corpos de prova de comportamento dilatante pertencentes aos domínios de compactidade relativa médio 2, compacto e muito compacto apresentaram padrão semelhante ao do modelo de Taylor (1948), ilustrado na Figura 17, com exceção para os trechos finais das curvas  $\delta v \times \delta h$ , os quais não formaram um patamar nitidamente horizontal, apresentando uma queda ora leve ora mais abrupta, acusando diminuição de  $\delta v$  com o aumento de  $\delta h$ .

As Figuras 90, 91 e 92 mostram as curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  e  $\delta v \times \delta h$  de três desses corpos de prova, indicando além das duas parcelas da tensão cisalhante ( $\tau_{cv}$  e  $\tau_e$ ), os pontos notáveis A, B e C (destacados na Figura 17), os quais foram identificados nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  da seguinte forma: o ponto B corresponde ao pico da curva, isto é,  $(\tau/\sigma)_{\max}$ , ponto correspondente à ruptura; o ponto C corresponde ao início do trecho horizontal pós-pico da curva; uma vez identificado o ponto C, o ponto A foi identificado na interseção da linha horizontal traçada a partir do ponto C e o trecho ascendente inicial da curva  $\tau/\sigma \times \delta h$ . Uma vez identificados os pontos A, B e C na curva  $\tau/\sigma \times \delta h$ , estes foram simplesmente projetados na curva  $\delta v \times \delta h$ , conforme ilustram as Figuras 90, 91 e 92.

A Figura 90 corresponde ao ensaio de cisalhamento direto realizado no corpo de prova moldado no domínio médio 2 e cisalhado sob tensão normal nominal de 500 kPa. A Figura 91 corresponde ao ensaio de cisalhamento direto realizado no corpo de prova moldado no domínio compacto e cisalhado sob tensão normal nominal de 75 kPa, A Figura 92 corresponde ao ensaio de cisalhamento direto realizado no corpo de prova moldado no domínio muito compacto e cisalhado sob tensão normal nominal de 750 kPa.

As indicações das parcelas de tensão cisalhante  $\tau_{cv}$  e  $\tau_e$ , assim como dos pontos notáveis A, B e C do modelo de Taylor (1948) foram feitas em todas as demais curvas dos corpos de prova dos domínios médio 2, compacto e muito compacto, apresentadas no Apêndice 1, seguindo exatamente mesma metodologia acima descrita.

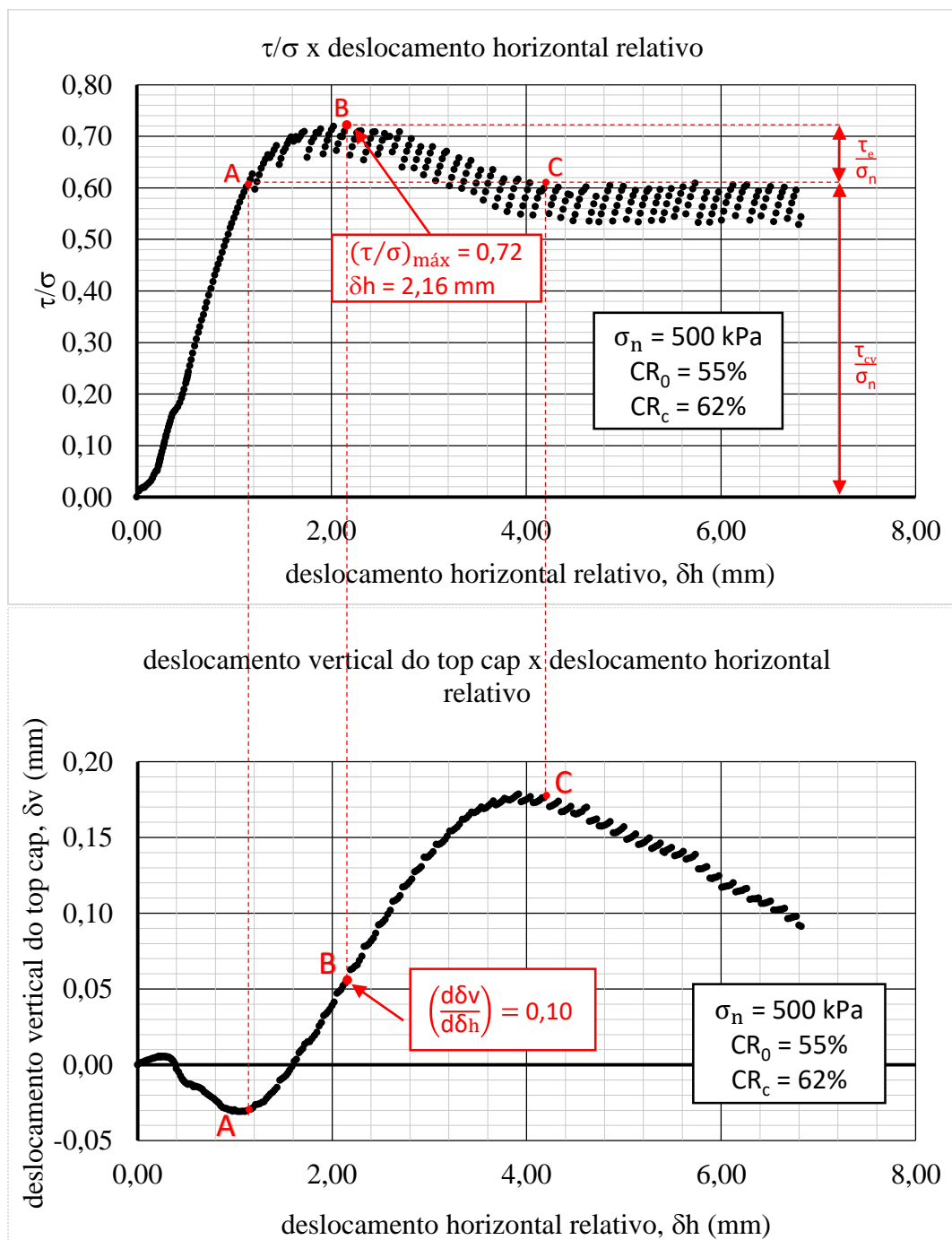


Figura 90 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova do domínio médio 2 sob tensão normal nominal de 500kPa.

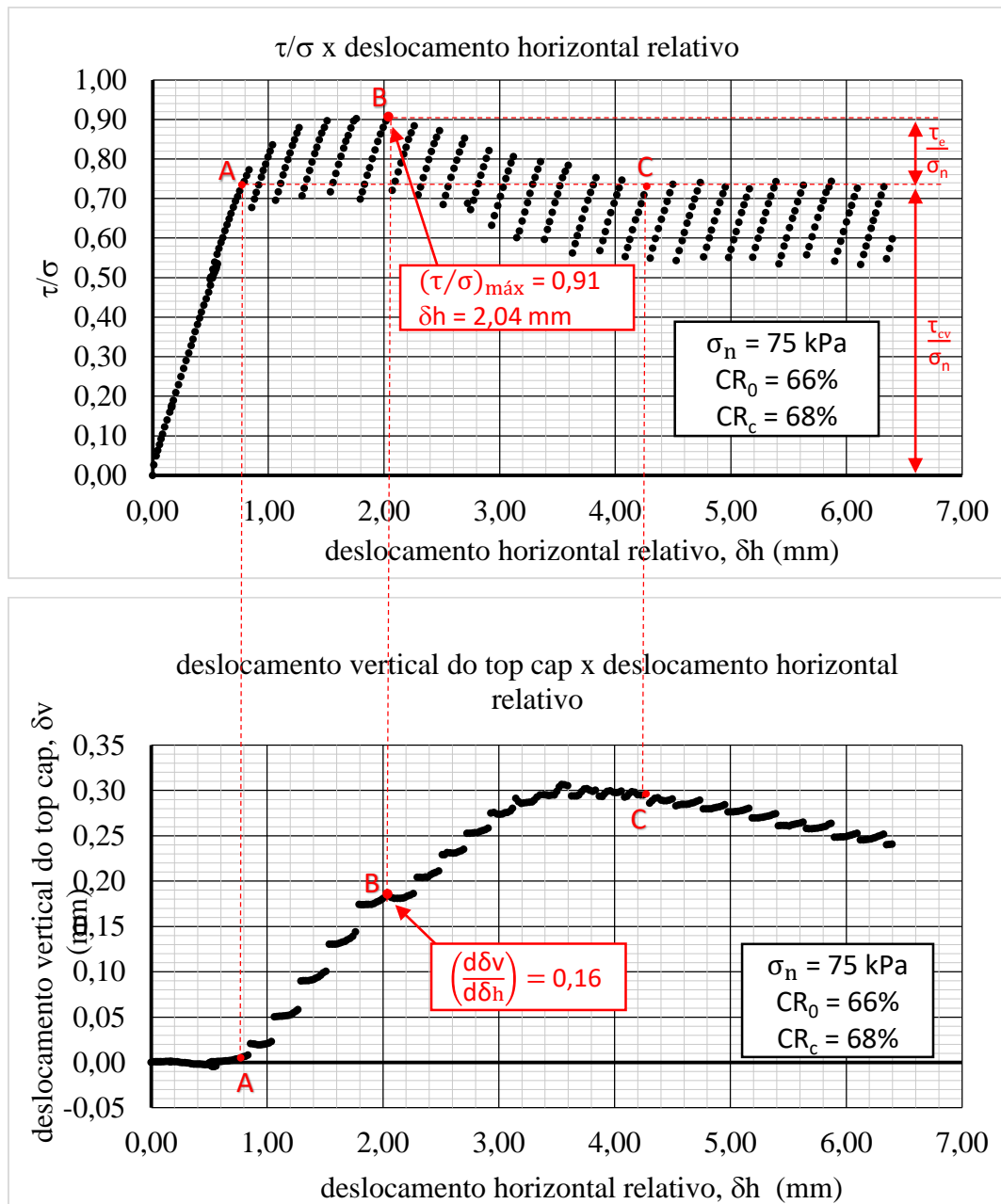


Figura 91 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova do domínio compacto sob tensão normal nominal de 75kPa.



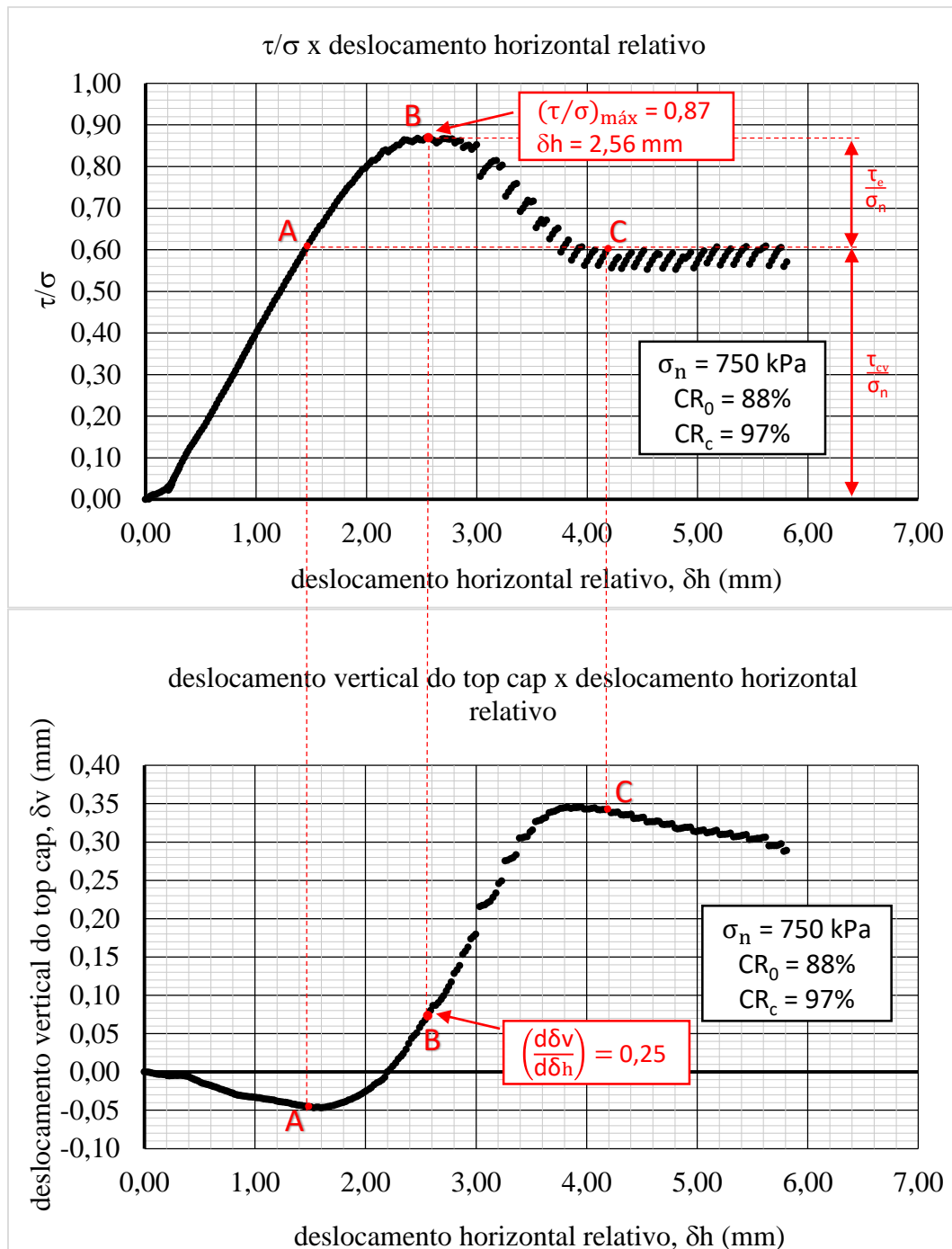


Figura 92 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  do ensaio de cisalhamento direto do corpos de prova moldado no domínio muito compacto sob tensão normal nominal de 750 kPa.

Das Figuras 90, 91 e 92, assim como das demais curvas apresentadas no Apêndice 1, observa-se uma boa correspondência entre a localização dos pontos notáveis A, B e C nas curvas  $\delta v$  x  $\delta h$  dos ensaios e seus respectivos significados segundo o modelo de Taylor (1948), discutido por Atkinson & Bransby (1978) e Simões (2015), a saber:

- (a) A localização do ponto A na curva  $\delta v \times \delta h$  é de fato muito próxima do ponto de mínimo da curva, onde começa a ocorrer o deslocamento vertical ascendente do *top cap*, isto é,  $d\delta v/d\delta h = 0$ .
- (b) A localização do ponto B na curva  $\delta v \times \delta h$  é muito próxima do ponto de inclinação máxima da curva, isto é  $d\delta v/d\delta h = \text{máx.}$
- (c) A localização do ponto C na curva  $\delta v \times \delta h$  é próxima do ponto de máximo da curva, onde  $d\delta v/d\delta h = 0$ . Todavia, diferentemente do modelo concebido na Figura 17, o trecho à direita deste ponto não fica horizontal, acusando reduções de volume do corpo de prova, o que também foi constatado por Simões (2015).

As Tabelas 37, 38 e 39, a seguir, apresentam os cálculos dos ângulos de atrito a volume ( $\phi'_{cv}$ ) dos corpos de prova dos domínios de compacidade relativa médio 2, compacto e muito compacto, respectivamente, a partir dos pontos A e C e a partir do ponto B, fazendo uso das equações desenvolvidas por Atkinson & Bransby (1978) baseadas no modelo de Taylor (1948), apresentadas no item 2.1.4.4, a saber:

$$\tan \phi'_{cv} = \left( \frac{\tau}{\sigma} \right)_A = \left( \frac{\tau}{\sigma} \right)_c$$

e

$$\tan \phi'_{cv} = \tan \phi' - \left( \frac{d\delta v}{d\delta h} \right)_B$$

Os valores de  $d\delta v/d\delta h$  correspondem às inclinações das curvas  $\delta v \times \delta h$  no ponto B.

Além disso, são também apresentados os valores das parcelas devido à dilatação da tensão cisalhante na ruptura normalizadas em relação a tensão normal nominal ( $\tau/\sigma_n$ ), obtidos nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$ , assim como suas porcentagens em relação ao valor de  $\tau/\sigma_n$  na ruptura.

Tabela 37 – Valores de  $\phi'_{cv}$  e de  $\tau_e/\sigma_n$  obtidos dos corpos de prova do domínio médio 2

$e_c$	$CR_c$ (%)	$\sigma_n$ (kPa)	$(\tau/\sigma_n)_{A \text{ e } C}$ $\tan \phi'_{cv}$ (Pontos A e C)	$\phi'_{cv}$ (Pontos A e C)	$(\tau/\sigma_n)_B$ $\tan \phi'$ (Ponto B)	$\phi'$ (Ponto B)	$\left(\frac{d\delta v}{d\delta h}\right)_B$	$\tan \phi'_{cv}$ (Ponto B)	$\phi'_{cv}$ (Ponto B)	$\tau_e/\sigma_n$	% de $\tau_e/\sigma_n$
<b>0,596</b>	50	25	0,87	41,0	1,08	47,2	0,15	0,93	42,9	0,21	19 %
<b>0,601</b>	49	50	0,77	37,6	0,93	43,0	0,15	0,78	38,0	0,16	17 %
<b>0,594</b>	51	50	0,79	38,3	0,92	42,5	0,16	0,76	37,2	0,13	14 %
<b>0,589</b>	53	75	0,70	35,0	0,84	39,9	0,16	0,68	34,2	0,14	17 %
<b>0,576</b>	57	75	0,71	35,4	0,86	40,6	0,11	0,75	36,9	0,15	17 %
<b>0,570</b>	58	100	0,70	35,0	0,81	39,0	0,10	0,71	35,4	0,11	14 %
<b>0,573</b>	58	150	0,65	33,0	0,73	36,2	0,15	0,58	30,1	0,08	11 %
<b>0,567</b>	59	300	0,63	32,2	0,72	35,6	0,13	0,59	30,5	0,09	13 %
<b>0,559</b>	62	500	0,61	31,4	0,72	35,7	0,10	0,62	31,8	0,11	15 %
<b>0,563</b>	61	750	0,53	27,9	0,65	33,2	0,06	0,59	30,5	0,12	18 %
<b>0,563</b>	61	1000	0,62	31,8	0,65	32,9	0,07	0,58	30,1	0,03	5 %
<b>0,542</b>	67	1250	0,59	30,5	0,64	32,4	0,06	0,58	30,1	0,05	8 %

Tabela 38 – Valores de  $\phi'_{cv}$  e de  $\tau_e/\sigma_n$  obtidos dos corpos de prova do domínio compacto

$e_c$	$CR_c$ (%)	$\sigma_n$ (kPa)	$(\tau/\sigma_n)_{A \text{ e } C}$ $\tan \phi'_{cv}$ (Pontos A e C)	$\phi'_{cv}$ (Pontos A e C)	$(\tau/\sigma_n)_B$ $\tan \phi'$ (Ponto B)	$\phi'$ (Ponto B)	$\left(\frac{d\delta v}{d\delta h}\right)_B$	$\tan \phi'_{cv}$ (Ponto B)	$\phi'_{cv}$ (Ponto B)	$\tau_e/\sigma_n$	% de $\tau_e/\sigma_n$
<b>0,552</b>	64	25	0,98	44,4	1,15	48,9	0,21	0,94	43,2	0,17	15 %
<b>0,563</b>	61	50	0,76	37,2	0,96	43,9	0,17	0,79	38,3	0,20	21%
<b>0,539</b>	68	75	0,73	36,1	0,91	42,3	0,16	0,75	36,9	0,18	20 %
<b>0,544</b>	66	100	0,72	35,8	0,93	43,0	0,22	0,71	35,4	0,21	23 %
<b>0,541</b>	67	100	0,70	35,0	0,89	41,6	0,17	0,72	35,8	0,19	21 %
<b>0,547</b>	66	150	0,68	34,2	0,88	41,3	0,22	0,66	33,4	0,20	23 %
<b>0,544</b>	66	150	0,66	33,4	0,81	39,0	0,22	0,59	30,5	0,15	19 %
<b>0,533</b>	70	300	0,66	33,4	0,80	38,7	0,16	0,64	32,6	0,14	18 %
<b>0,530</b>	71	500	0,61	31,4	0,77	37,4	0,19	0,58	30,1	0,16	21 %
<b>0,525</b>	72	500	0,62	31,8	0,75	36,9	0,15	0,60	31,0	0,13	17 %
<b>0,528</b>	71	750	0,61	31,4	0,73	36,2	0,12	0,61	31,4	0,12	16 %
<b>0,519</b>	74	1000	0,60	31,0	0,73	36,3	0,14	0,59	30,5	0,13	18 %
<b>0,516</b>	75	1250	0,63	32,2	0,71	35,2	0,12	0,59	30,5	0,08	11 %

Tabela 39 – Valores de  $\phi'_{cv}$  e de  $\tau_e/\sigma_n$  obtidos dos corpos de prova do domínio muito compacto

$e_c$	$CR_c$ (%)	$\sigma_n$ (kPa)	$(\tau/\sigma_n)_{A \text{ e } C}$ $\tan \phi'_{cv}$ (Pontos A e C)	$\phi'_{cv}$ (Pontos A e C)	$(\tau/\sigma_n)_B$ $\tan \phi'$ (Ponto B)	$\phi'$ (Ponto B)	$\left(\frac{d\delta v}{d\delta h}\right)_B$	$\tan \phi'_{cv}$ (Ponto B)	$\phi'_{cv}$ (Ponto B)	$\tau_e/\sigma_n$	% de $\tau_e/\sigma_n$
0,484	85	25	0,92	42,6	1,39	54,4	0,36	1,03	45,8	0,47	34 %
0,488	84	50	0,79	38,3	1,25	51,3	0,36	0,89	41,7	0,46	37 %
0,479	86	75	0,73	36,1	1,15	49,0	0,36	0,79	38,3	0,42	37 %
0,472	89	75	0,72	35,8	1,15	48,9	0,33	0,82	39,4	0,43	37 %
0,480	86	100	0,70	35,0	1,14	48,7	0,44	0,70	35,0	0,44	39 %
0,478	87	100	0,68	34,2	1,12	48,2	0,37	0,75	36,9	0,44	39 %
0,479	86	150	0,68	34,2	1,04	46,0	0,28	0,76	37,2	0,36	35 %
0,462	92	300	0,62	31,8	0,97	44,2	0,35	0,62	31,8	0,35	36 %
0,451	95	500	0,60	31,0	0,91	42,3	0,28	0,63	32,2	0,31	34 %
0,444	97	750	0,60	31,0	0,87	41,1	0,25	0,62	31,8	0,27	31 %
0,451	95	1000	0,59	30,5	0,86	40,7	0,22	0,64	32,6	0,27	31 %
0,441	98	1250	0,58	30,1	0,82	39,4	0,20	0,62	31,8	0,24	29 %

Das Tabelas 37, 38 e 39, observa-se que:

- 1) Para os três domínios de compacidade relativa (médio 2, compacto e muito compacto), os valores de ângulo de atrito a volume constante ( $\phi'_{cv}$ ) calculados tanto nos pontos A e C quanto no ponto B diminuem com o aumento da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), tornando-se praticamente constantes para valores de  $\sigma_n \geq 300$  kPa (domínios de CR médio 2 e muito compacto) e  $\sigma_n \geq 500$  kPa (domínio de CR compacto), quando passam a situarem-se entre 30,1° e 32,2°, com apenas duas exceções, a saber, 27,9° e 32,6°.
- 2) Para os três domínios de CR, de uma forma geral, os valores de  $\phi'_{cv}$  calculados nos pontos A e C são muito semelhantes aos valores de  $\phi'_{cv}$  calculados no ponto B, o que está de acordo com o modelo de dilatância proposto por Taylor (1948).
- 3) Para valores de  $\sigma_n \geq 150$  kPa (domínios de CR médio 2 e compacto) e  $\sigma_n \geq 100$  kPa (domínio de CR muito compacto), os valores de  $(d\delta v/d\delta h)$  calculados no ponto B tendem a diminuir com o aumento de  $\sigma_n$ , acompanhando a tendência dos valores de  $\tau_e/\sigma_n$ . Ademais, para os três domínios de CR, os valores de  $(d\delta v/d\delta h)$  no ponto B são semelhantes aos valores de  $\tau_e/\sigma_n$ , o que também está de acordo com o modelo de Taylor (1948).
- 4) Observa-se que o percentual da componente devido à dilatância ( $\tau_e/\sigma$ ) em relação a  $\tau/\sigma$  na ruptura é menor no domínio de CR médio 2, aumenta no domínio compacto, e aumenta ainda mais no domínio muito compacto.

Pelo exposto nos itens 1 a 3 acima, conclui-se que o modelo de dilatância proposto por Taylor (1948) e aprimorado por Atkinson & Bransby (1978) aplica-se aos corpos de prova que dilataram sob elevados valores de  $\sigma_n$  (iguais ou maiores do que 300 kPa, aproximadamente), mas não se aplica aos corpos de prova que dilataram sob os valores de  $\sigma_n$  mais baixos.

O ângulo de atrito a volume constante da Areia da Praia de Ipanema parece estar situado entre 30,1° e 32,2°, corroborando o que foi discutido a respeito deste parâmetro no item 4.4.

#### 4.7. Comparação entre o ângulo de atrito a volume constante e o ângulo de atrito no repouso

No item 4.4, com base na análise da variação do ângulo de atrito ( $\phi'$ ) com a tensão normal nominal ( $\sigma$ ) dos domínios de compacidade relativa (CR) muito fofo, fofo e médio 1, presumiu-se que o ângulo de atrito a volume constante ( $\phi'_{cv}$ ) da Areia da Praia de Ipanema estaria situado entre 30,4° e 31,6°.

Já no item 4.6, com base na aplicação da abordagem de Taylor (1948), aprimorada por Atkinson & Bransby (1978), para interpretar o fenômeno da dilatação nos corpos de prova dos domínios de CR médio 2, compacto e muito compacto, pontuou-se que o valor de  $\phi'_{cv}$  parecia estar situado entre 30,1° e 32,2°.

Sendo assim, arredondando os valores dos intervalos acima, pode-se dizer que, segundo esta pesquisa, o valor do ângulo de atrito a volume constante ( $\phi'_{cv}$ ) da Areia da Praia de Ipanema deve estar situado entre 30° e 32°.

Para a determinação do ângulo de atrito no repouso da Areia da Praia de Ipanema, Martins (2020) utilizou uma caixa de acrílico transparente (Figura 93) com dimensões de 40 cm x 40 cm x 10 cm (na direção ortogonal ao plano do papel). Sobre uma das faces quadradas de 40 cm x 40 cm, foi desenhada uma malha quadrada de 3 cm x 3 cm, utilizada como referência para a determinação do ângulo de atrito no repouso da areia colocada dentro da caixa.

O procedimento consistia em apoiar a caixa com uma de suas faces de 40 cm x 10 cm sobre uma superfície horizontal, colocar uma certa quantidade de areia seca dentro da caixa e, em seguida, fazer uma rotação lenta de 90° em torno de uma das arestas de 10 cm, até que a outra face ortogonal de 40 cm x 10 cm ficasse apoiada sobre a superfície horizontal. Dessa forma, formava-se na superfície da massa de areia um plano inclinado cujo ângulo com a horizontal era o ângulo de atrito no repouso, determinado como igual a aproximadamente 30° para a Areia da Praia de Ipanema, conforme mostra a Figura 93.

Observa-se, portanto, que o ângulo de atrito no repouso assim determinado por Martins (2020) é igual ao limite inferior do intervalo dentro do qual deve estar situado o ângulo de atrito a volume constante ( $\phi'_{cv}$ ) da Areia da Praia de Ipanema.



Figura 93 – Determinação do ângulo de atrito no repouso da Areia da Praia de Ipanema (Martins, 2020).

#### 4.8. Análise do efeito *stick-slip*

Conforme já mencionado, as curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e as curvas “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” apresentadas no item 4.2 não estão plotadas com todas as leituras tomadas durante o cisalhamento, isto é, a cada  $\delta t = 10$  s (o que significa a cada  $\delta h = 0,02$  mm), mas com os dados filtrados a cada  $\delta t = 1$  min e 20 s (o que significa a cada  $\delta h = 0,16$  mm). Tal decisão foi tomada com o objetivo de facilitar a visualização das curvas de um mesmo domínio de compacidade relativa (CR) apresentadas todas em conjunto.

Por outro lado, no Apêndice 1, as curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  e  $\delta v \times \delta h$  são plotadas individualmente com todas as leituras registradas pelo sistema de aquisição de dados, isto é, a cada  $\delta t = 10$  s (a cada  $\delta h = 0,02$  mm). Nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta$ , observam-se oscilações na forma de “dentes de serra” dos valores da tensão cisalhante ( $\tau$ ) e, portanto, da relação  $\tau/\sigma$ , à medida do deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ ), em intervalos aproximadamente constantes de  $\delta h$ . Tais oscilações também são notadas



nos valores de deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) nas correspondentes curvas  $\delta v \times \delta h$ . A ocorrência desse fenômeno também foi constatada pelas leituras do extensômetro do anel dinamométrico durante a execução dos ensaios.

Adjémian & Evesque (2001), Doanh et al. (2013) e Xiao et al. (2019) observaram e investigaram este comportamento em corpos de prova secos e saturados de areias e esferas de vidro submetidos a ensaios triaxiais drenados de compressão convencionais. Os referidos autores associaram este comportamento ao fenômeno conhecido como *stick-slip*, já há muito tempo abordado pela Física no estudo do atrito entre corpos sólidos. Estes autores observaram que o fenômeno é influenciado pelos seguintes fatores: granulometria, formato dos grãos, índice de vazios (compacidade relativa), tensão de confinamento e velocidade de cisalhamento.

O fenômeno *stick-slip* entre corpos sólidos é explicado pelo fato do coeficiente de atrito estático ser maior que o coeficiente de atrito cinético, tal como descrito por Lambe & Whitman (1979, página 65) e ilustrado na Figura 94. Para promover o deslizamento entre dois corpos sólidos, a força cisalhante aplicada tem que ser incrementada até o valor associado à força de atrito estático. Quando o deslizamento é deflagrado, como o coeficiente de atrito cinético é menor que o coeficiente de atrito estático, o deslizamento sofre uma aceleração (*slip*) marcada por um “salto” no deslizamento. Com isso, parte da energia elástica armazenada durante o incremento da força cisalhante é liberada fazendo com que a força cisalhante aplicada diminua a ponto de não ser mais suficiente para manter o deslizamento, isto é, a força cisalhante torna-se menor do que a força de atrito cinética, e o deslizamento cessa (*stick*). Em seguida, a força cisalhante tem que ser novamente incrementada para vencer a força de atrito estático (*stick*) e induzir novamente o deslizamento (*slip*), repetindo todo o processo, o qual ocorre de forma intermitente.

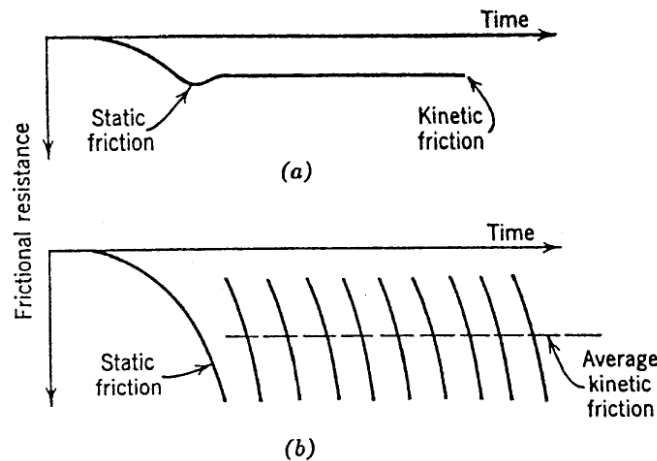


Figura 94 – Coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito cinético. (a) deslizamento suave; (b) Stick-slip. (Lambe & Whitman, 1979)

Mais recentemente, Domingos (2021) também identificou o fenômeno *stick-slip* em ensaios triaxiais drenados e não drenados de compressão convencionais (CID e CIU) realizados em corpos de prova saturados de uma amostra da Areia da Praia de Ipanema coletada no mesmo local da amostra estudada nesta pesquisa.

Simões (2015) não identificou o fenômeno *stick-slip* em seus ensaios de cisalhamento direto realizados na Areia da Praia de Ipanema. Entretanto, a dispersão dos pontos de algumas das curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  obtidas por Simões (2015) leva a desconfiança de que o fenômeno ocorreu, mas não foi detectado, principalmente nos corpos de prova fofos submetidos às tensões normais nominais mais baixas (25, 50, 75 e 100 kPa, por exemplo), conforme mostra a Figura 95. A suposta ocorrência do fenômeno não deve ter sido detectada por Simões (2015) pelo fato das medidas terem sido tomadas em intervalos de  $\delta h$  muito grandes ( $\delta h = 0,2$  mm), dez vezes maiores que os intervalos de  $\delta h$  de tomada de leituras dos ensaios desta pesquisa ( $\delta h = 0,02$  mm).

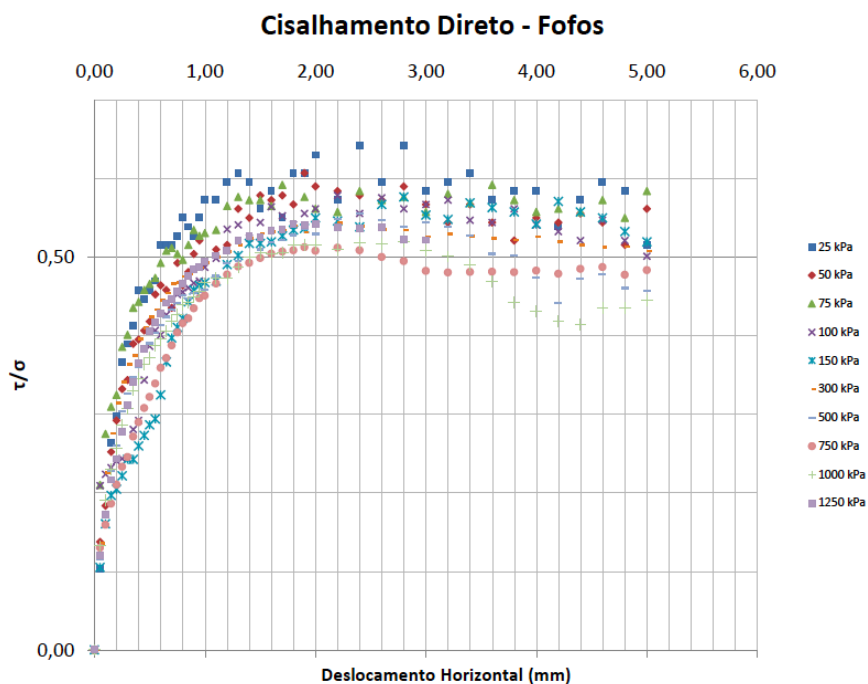


Figura 95 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  dos ensaios de cisalhamento direto realizados em corpos de prova no domínio fofo (Simões, 2015)

Conforme mencionado acima, o fenômeno *stick-slip* manifesta-se nas curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  dos ensaios de cisalhamento direto desta pesquisa como sucessivos “dentes de serra”, conforme mostram as curvas das Figuras 96 a 100, bem como todas as demais curvas apresentadas no Apêndice 1. Na formação de cada dente,  $\tau/\sigma$  aumenta segundo uma inclinação aproximadamente constante (*stick*) e, ao atingir um pico localizado, sofre uma queda brusca e repentina (*slip*) para, em seguida, voltar a crescer segundo uma inclinação semelhante à do dente anterior (*stick*).

O fenômeno foi observado para todos os domínios de compacidade relativa, desde muito fofo até muito compacto, e sob todos os valores de tensão normal nominal. Assim, o fenômeno ocorreu tanto para os corpos de prova de comportamento dilatante quanto para os corpos de prova de comportamento contrátil.

Ainda no que tange à manifestação do fenômeno nas curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$ , fixando o domínio de compacidade relativa (CR), observa-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), menor é a altura (amplitude) dos dentes de serra. Isto pode ser constatado de forma mais direta ao comparar a curva  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  do corpo de

prova muito fofo sob  $\sigma_n = 25$  kPa (Figura 96) com a curva  $\tau/\sigma \times \delta h$  do corpo de prova muito fofo sob  $\sigma_n = 1250$  kPa (Figura 97), bem como ao comparar a curva  $\tau/\sigma \times \delta h$  do corpo de prova muito compacto sob  $\sigma_n = 25$  kPa (Figura 98) com a curva  $\tau/\sigma \times \delta h$  do corpo de prova muito compacto sob  $\sigma_n = 1250$  kPa (Figura 99).

Por outro lado, fixando a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), para baixos valores de  $\sigma_n$  ( $\sigma_n \leq 100$  kPa), observa-se uma leve tendência de diminuição da altura (amplitude) dos dentes de serra nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  com o aumento da compactidade relativa (CR). Isto pode ser constatado ao comparar as curvas das Figuras 96 e 98. Todavia, para valores de  $\sigma_n$  mais elevados ( $\sigma_n \geq 150$  kPa), não se observa nenhuma nítida tendência de variação da altura dos dentes de serra com a variação de CR. Observa-se, portanto, que a variação da tensão normal ( $\sigma_n$ ) exerce maior influência na variação da amplitude do fenômeno nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  do que a variação da compactidade relativa (CR).

O fenômeno manifesta-se também nas curvas  $\delta v \times \delta h$ , tendo a seguinte correspondência com suas respectivas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$ . No início da rampa de um dente de serra da curva  $\tau/\sigma \times \delta h$ , ocorre inicialmente uma pequena diminuição local de  $\delta v$  (o que não ocorre sempre), seguida por um significativo aumento local de  $\delta v$  (*stick*), conforme pode ser visto na curva  $\delta v \times \delta h$  da Figura 96. No fim da rampa do dente de serra da curva  $\tau/\sigma \times \delta h$  (pico do dente), quando ocorre a queda brusca e repentina de  $\tau/\sigma$ , nota-se também a queda brusca e repentina local (salto vertical para baixo) de  $\delta v$  na curva  $\delta v \times \delta h$  (*slip*).

O comportamento descrito acima nas curvas  $\delta v \times \delta h$  ocorre com maior proeminência nos corpos de prova moldados nos domínios de CR “muito fofo” e “fofo” (os quais apresentam comportamento global contrátil sob quase todas as tensões normais nominais), submetidos a baixas tensões normais (ver Figura 96, por exemplo).

Por outro lado, nos trechos ascendentes das curvas  $\delta v \times \delta h$  ( $d\delta v/d\delta h > 0$ ) dos corpos de prova de comportamento global dilatante, observam-se saltos verticais locais de  $\delta v$  para cima, isto é, elevação brusca e repentina de  $\delta v$ , conforme mostram as Figuras 98 e 100. Nos trechos descendentes das curvas  $\delta v \times \delta h$  ( $d\delta v/d\delta h < 0$ ), os saltos verticais locais de  $\delta v$  ocorrem sempre para baixo.

Quanto à periodicidade do fenômeno, observa-se que, para um dado ensaio, os intervalos de  $\delta h$  (larguras das rampas de  $\tau/\sigma$ ) permanecem aproximadamente constantes ao longo do cisalhamento. De uma forma geral, constata-se intervalos de  $\delta h$  de cerca de 0,2 mm para a maioria dos ensaios, tendo alguns ensaios apresentado intervalos de  $\delta h$  de 0,1 mm e outros de 0,3 mm aproximadamente.

Finalmente, vale dizer que o fenômeno *stick-slip* observado nestes ensaios pode ser visto nas curvas  $\delta v \times \delta h$  como uma “dilatância” localizada periódica dentro do comportamento global de variação de volume do corpo de prova, podendo este último ser tanto contrátil como dilatante.

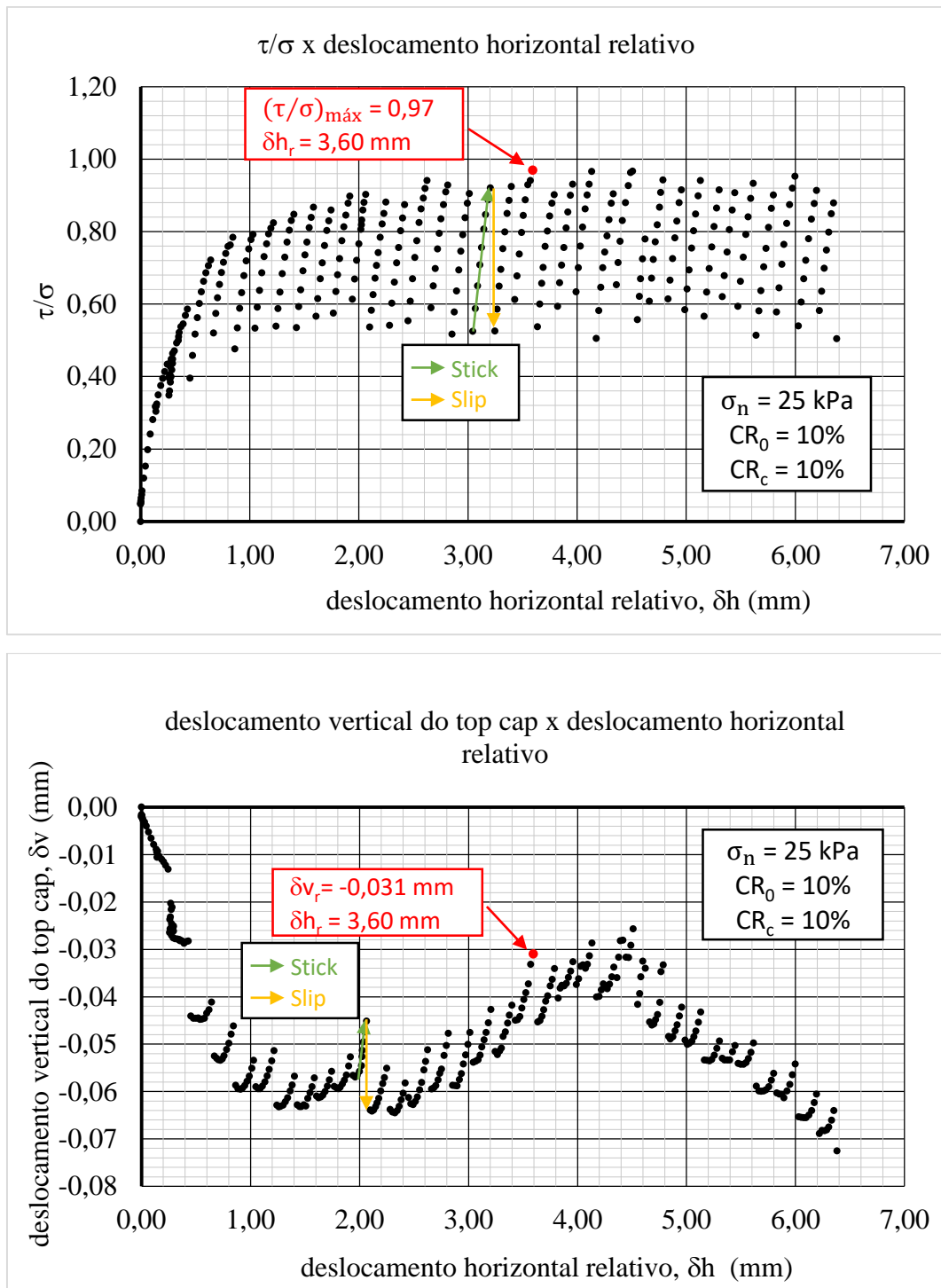


Figura 96 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito fofo, sob tensão normal nominal de 25 kPa

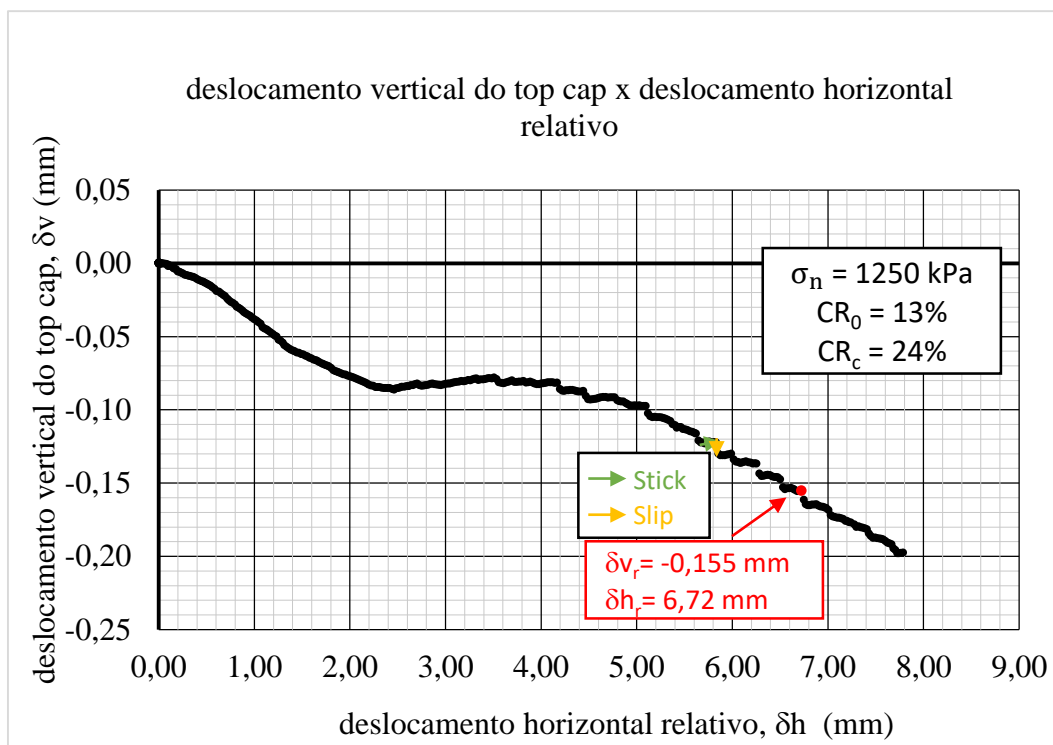
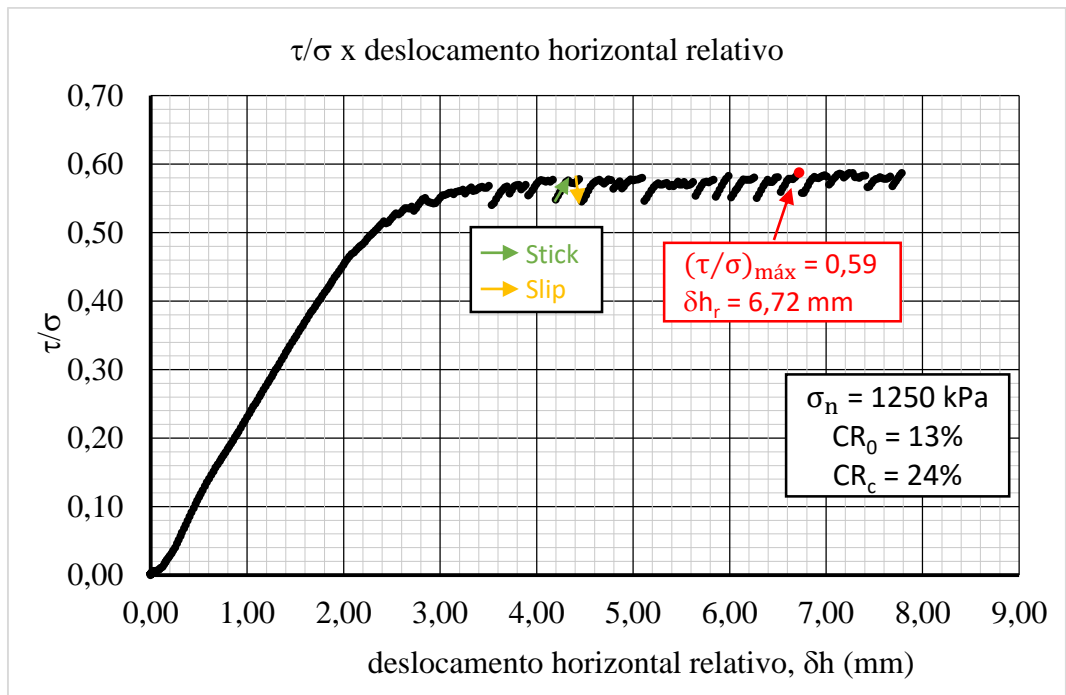


Figura 97 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito fofo, sob tensão normal nominal de 1250 kPa

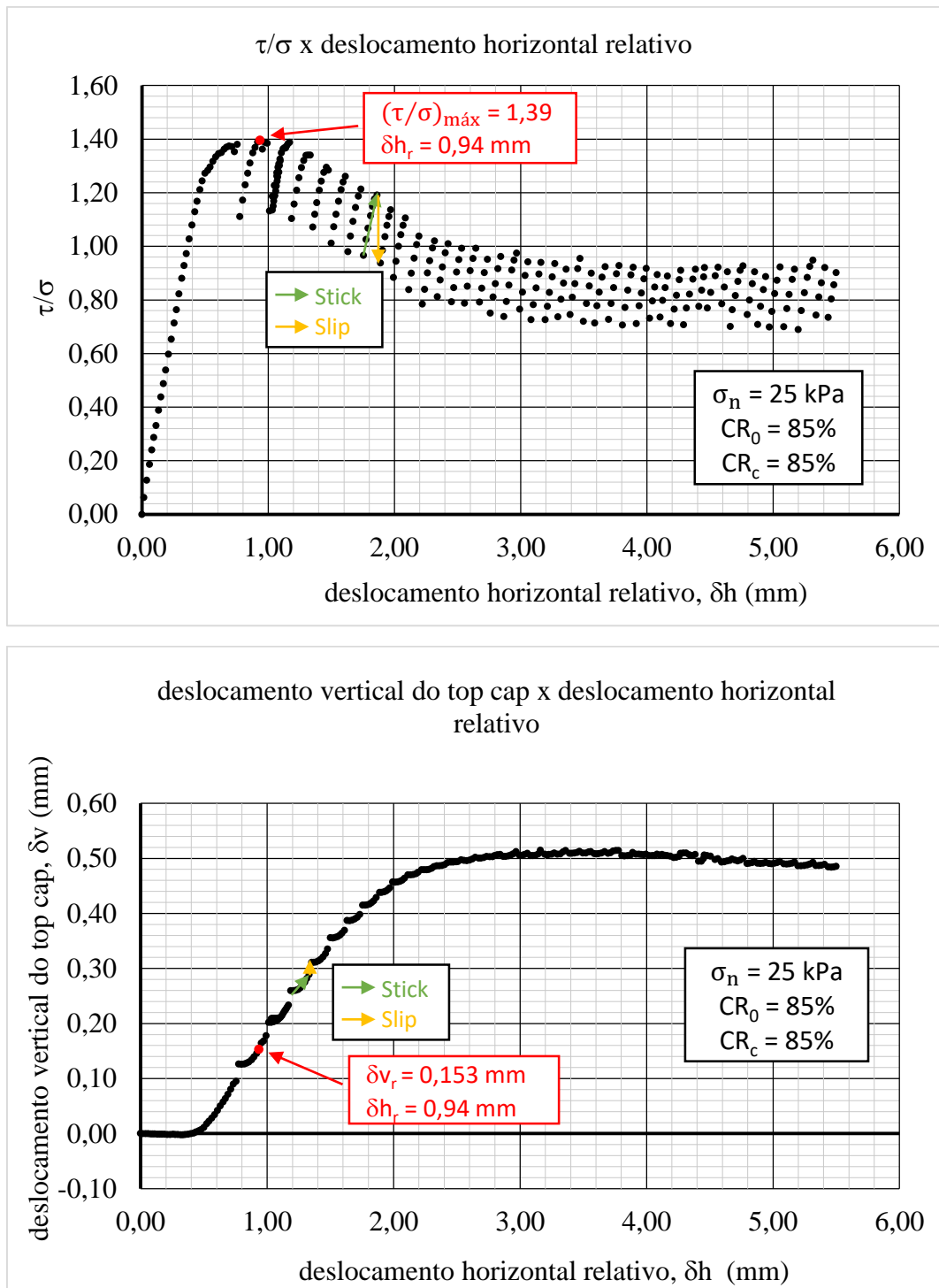


Figura 98 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito compacto, sob tensão normal nominal de 25 kPa



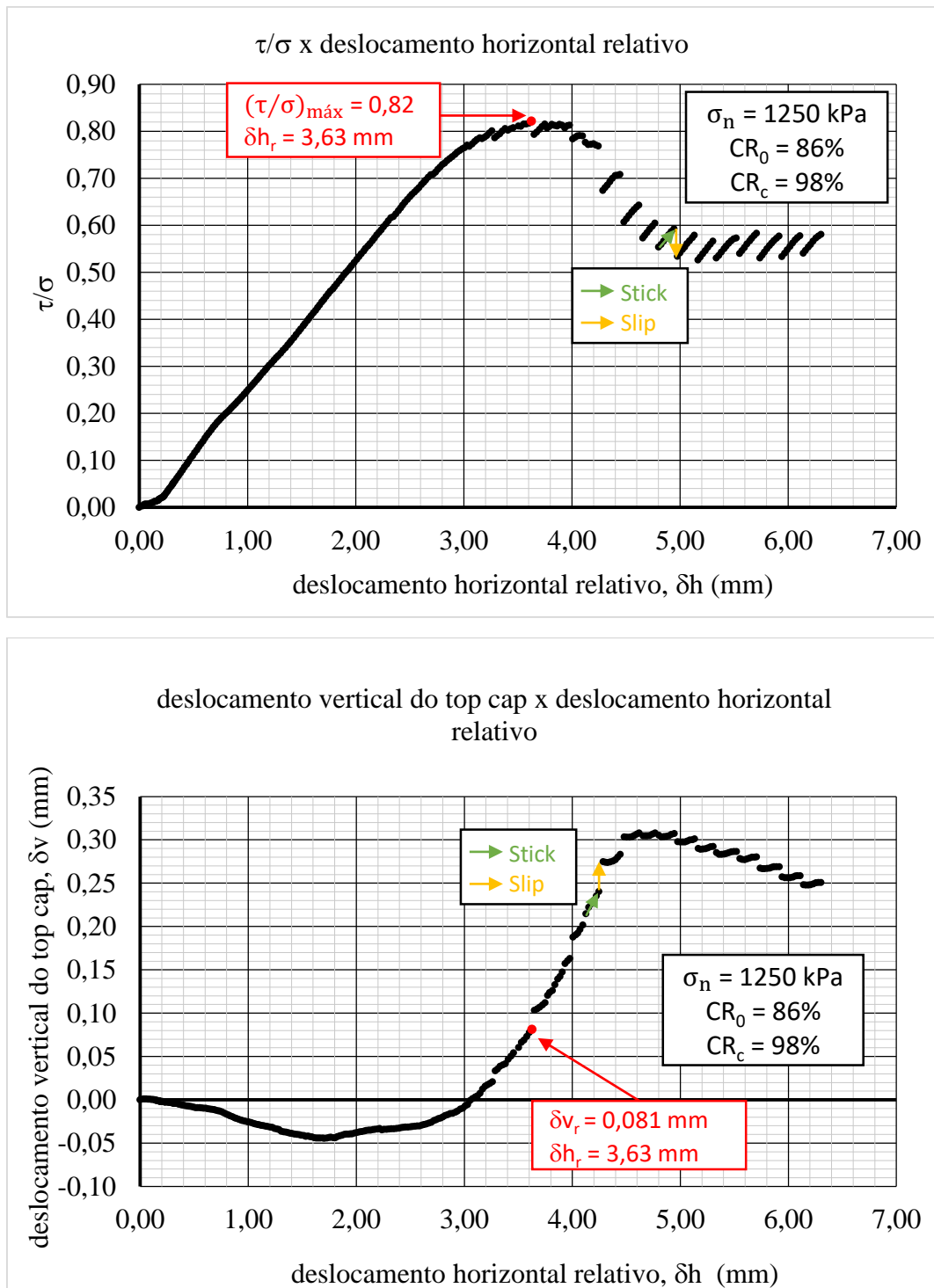


Figura 99 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito compacto, sob tensão normal nominal de 1250 kPa

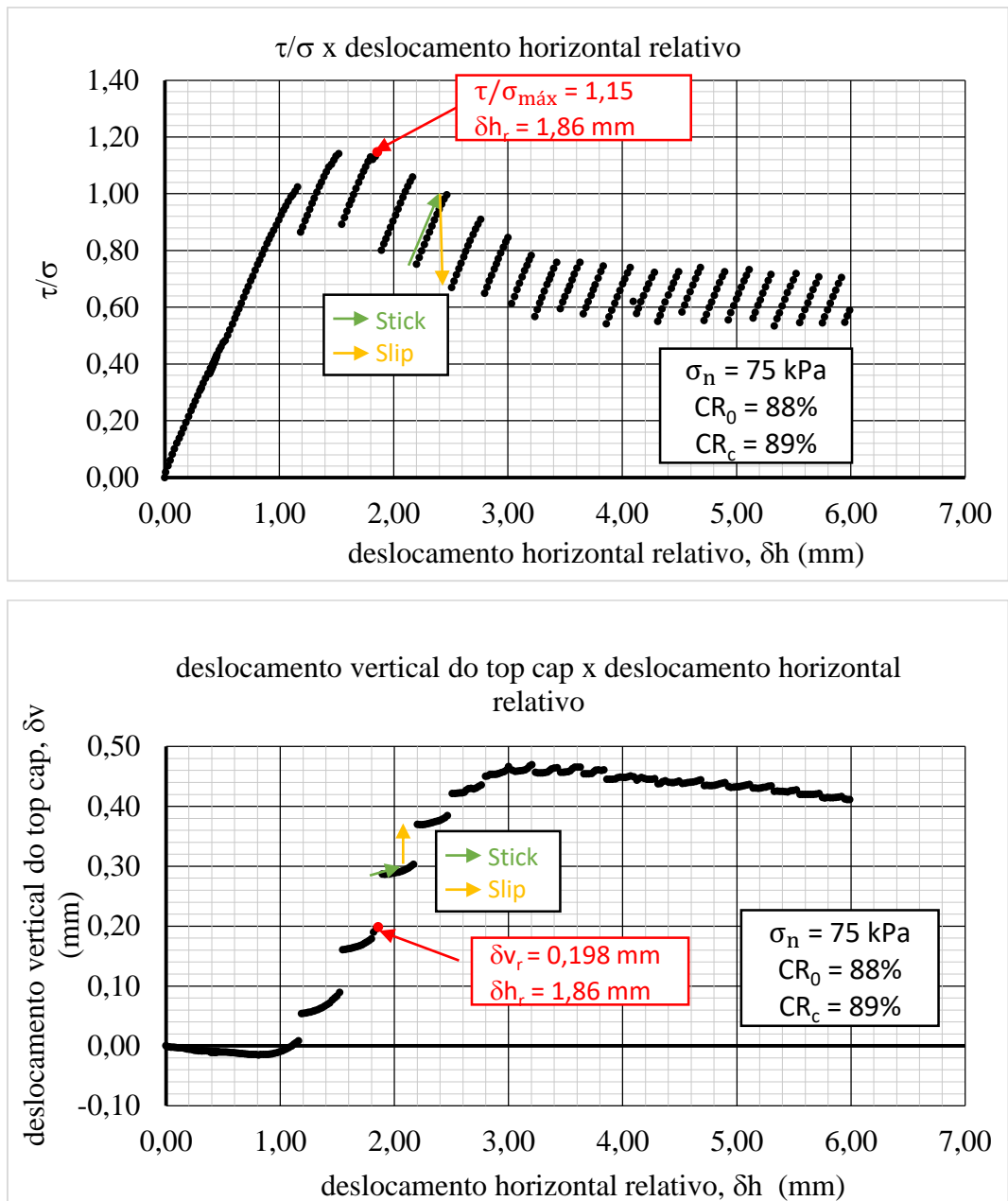


Figura 100 – Curvas  $\tau/\sigma$  x  $\delta h$  e  $\delta v$  x  $\delta h$  do ensaio de cisalhamento direto do corpo de prova moldado no domínio muito compacto, sob tensão normal nominal de 75 kPa

#### 4.9.

#### Avaliação da eficácia do dispositivo utilizado para impedir a rotação do *top cap*

Conforme mencionado no item 3.3.4, com a finalidade de impedir a rotação (adernamento) do *top cap* durante o cisalhamento dos corpos de prova nos ensaios de cisalhamento direto, foi utilizado o dispositivo ilustrado na Figura 101, idealizado por Domingos (2019) e confeccionado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. O dispositivo consistia em um rolamento linear flangeado da marca 4Hobby, de diâmetro interno de 16 mm, aparafusado em uma estrutura de alumínio em forma de cruz, que, por sua vez, era aparafusada na metade superior da caixa interna do equipamento de cisalhamento direto.

A Figura 46, apresentada no item 3.3.4, mostra o dispositivo fixado na metade superior da caixa interna do equipamento de cisalhamento direto durante a realização de um dos ensaios desta pesquisa.

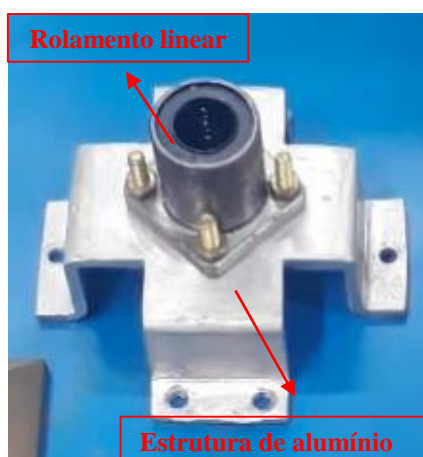


Figura 101 – Dispositivo utilizado para impedimento da rotação do *top cap*

Além da observação da eventual rotação do *top cap* durante o próprio cisalhamento, ao final de cada ensaio, a horizontalidade da superfície superior do corpo de prova era avaliada a fim de identificar se houvera rotação do *top cap*, por menor que fosse. Em nenhum dos ensaios realizados nesta pesquisa foi observado qualquer indício de rotação do *top cap*.

Vale lembrar que o que motivou o desenvolvimento e a utilização deste dispositivo nesta pesquisa foi o relato feito por Simões (2015) de que, em seus ensaios de cisalhamento direto realizados também em uma amostra da Areia da

Praia de Ipanema, observou-se rotação (adernamento) do *top cap*. Segundo Simões (2015) tal rotação se fazia notar de forma mais evidente para valores de  $\delta h$  maiores do que 2 mm.

A Figura 102 compara um corpo de prova ao final de um dos ensaios de cisalhamento direto realizados nesta pesquisa, cuja superfície superior era perfeitamente horizontal (Figura 102-a), com um corpo de prova ao final de um dos ensaios de cisalhamento direto realizados por Simões (2015), cuja superfície superior era inclinada (Figura 102-b).

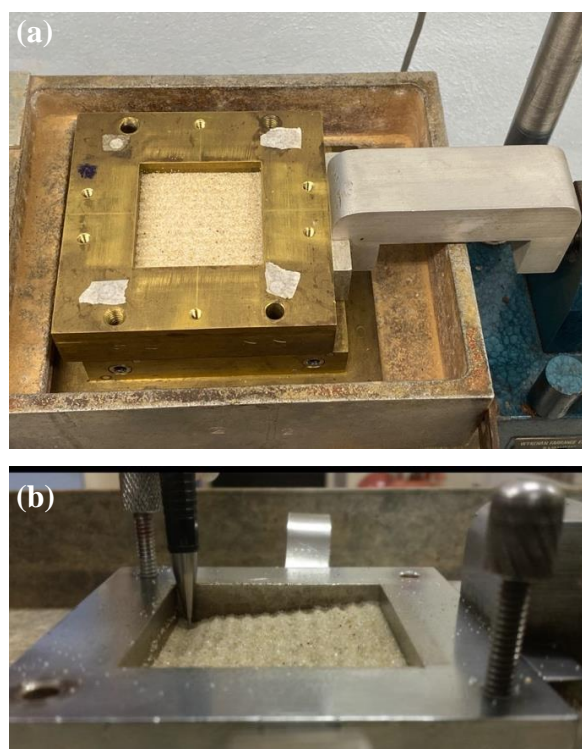


Figura 102 – Corpo de prova ao fim do ensaio de cisalhamento direto. (a) Na presente pesquisa (b) Simões (2015)

Em todos os ensaios de cisalhamento direto realizados nesta pesquisa, foi utilizado o dispositivo de bloqueio de rotação do *top cap* e, em todos estes ensaios, a superfície superior do corpo de prova era perfeitamente horizontal ao final do ensaio. Ademais, o dispositivo não apresentou nenhum sinal aparente de deformação no fim da campanha de ensaios. Por tudo isso, conclui-se que o dispositivo cumpriu muito bem a função para o qual foi concebido.

Finalmente, vale dizer que para investigar apropriadamente as eventuais influências do adernamento do *top cap* nas curvas “tensão cisalhante ( $\tau$ ) sobre

tensão normal ( $\sigma$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” e “deslocamento vertical do *top cap* ( $\delta v$ ) *versus* deslocamento horizontal relativo ( $\delta h$ )” torna-se necessário fazer uma campanha de pares de ensaios de cisalhamento direto, sendo cada par realizado com as mesmas características, isto é, com corpos de prova da mesma areia moldados com a mesma compacidade relativa e sob a mesma tensão normal nominal, porém sendo um ensaio realizado sem o dispositivo de bloqueio do *top cap* e o outro com o dispositivo.

## 5 Conclusões

### 5.1. Conclusões Gerais

Na presente pesquisa, um programa de setenta e um ensaios de cisalhamento direto foi realizado em uma amostra da Areia da Praia de Ipanema. A amostra foi caracterizada como uma areia fina (60 %) e média (40 %) de acordo com a norma ASTM-D2487-17, mal graduada, uniforme, formada por grãos subangulares a arredondados, com densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) igual a 2,656, índice de vazios mínimo ( $e_{\min}$ ) igual a 0,435 e índice de vazios máximo ( $e_{\max}$ ) igual a 0,760.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em corpos de prova na condição seca, moldados em seis diferentes domínios de compacidade relativa (CR), nomeados como muito fofo, fofo, médio (dividido em médio 1 e médio 2), compacto e muito compacto, de acordo com a classificação proposta por Lambe & Whitman (1979, pp. 31, Tabela 3.3). Para cada um desses domínios de compacidade relativa foram realizados ensaios de cisalhamento direto sob os seguintes valores de tensão normal nominal: 25, 50, 75, 100, 150, 300, 500, 750, 1000 e 1250 kPa.

Todos os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com um dispositivo especialmente desenvolvido para impedir o adernamento (rotação) do *top cap*.

A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas do programa de ensaios de cisalhamento direto:

#### A) Quanto à moldagem dos corpos de prova

- As metodologias utilizadas para a moldagem dos corpos de prova, descritas no item 3.3.5, forneceram excelente repetibilidade de valores de índice de vazios dentro de cada um dos seis domínios de compacidade relativa. As seguintes médias de valores de índice de vazios ( $e$ ) e de compacidade relativa (CR) foram obtidas para os corpos de prova moldados em cada domínio: a) muito fofo:  $e = 0,719$ , CR = 13 %; b) fofo:  $e = 0,685$ , CR = 23 %; c) médio 1:  $e = 0,630$ , CR = 40 %; d) médio 2:  $e$

= 0,590, CR = 52 %; e) compacto:  $e = 0,552$ , CR = 64 %; f) muito compacto:  $e = 0,483$ , CR = 85 %;

B) Quanto aos resultados dos ensaios de cisalhamento direto agrupados por domínio de compacidade relativa

- Todos os corpos de prova dos domínios de compacidade relativa muito fofo, fofo e médio 1 apresentaram curva  $\tau/\sigma \times \delta h$  sem pico. Em contrapartida, todos os corpos de prova dos domínios compacto e muito compacto apresentaram curva  $\tau/\sigma \times \delta h$  com pico bem definido, sendo que os picos do domínio muito compacto foram mais agudos do que aqueles do domínio compacto. Quanto aos corpos de prova do domínio médio 2, aqueles submetidos a valores de  $\sigma_n \leq 500$  kPa apresentaram pico, ao passo que aqueles submetidos a valores de  $\sigma_n \geq 750$  kPa não apresentaram pico bem definido.
- Fixando o domínio de compacidade relativa (CR), observou-se nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  que o aumento de  $\tau/\sigma$  com o  $\delta h$  é tanto mais gradual quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ).
- Fixando o domínio de compacidade relativa (CR), quanto menor a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), mais proeminente é o pico observado nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$ .
- Fixando o domínio de compacidade relativa (CR), quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), menor foi o ângulo de atrito de pico ( $\phi'$ ) obtido. Dentro de cada domínio, o valor de  $\phi'$  reduziu da seguinte forma quando  $\sigma_n$  foi aumentado de 25 kPa para 1250 kPa, respectivamente: muito fofo: de  $41,1^\circ$  para  $30,4^\circ$ ; fofo: de  $43,5^\circ$  para  $30,5^\circ$ ; médio 1: de  $45,3^\circ$  para  $30,7^\circ$ ; médio 2: de  $47,2^\circ$  para  $32,4^\circ$ ; compacto: de  $48,9^\circ$  para  $35,2^\circ$ ; muito compacto: de  $54,4^\circ$  para  $39,4^\circ$ . Estes resultados revelam a significativa influência da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) no ângulo de atrito de pico ( $\phi'$ ) medido dentro de cada domínio de compacidade relativa.

- Fixando o domínio de compacidade relativa (CR), observou-se uma tendência de aumento do deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ) com o aumento da tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ).
- As curvas  $\delta v \times \delta h$  denunciaram que todos os corpos de prova do domínio muito fofo e quase todos os corpos de prova do domínio fofo contraíram durante o cisalhamento. Por outro lado, os corpos de prova dos domínios médio 2, compacto e muito compacto apresentaram uma contração inicial, seguida de dilatação durante o cisalhamento. No que tange aos corpos de prova do domínio médio 1, aqueles submetidos a valores de  $\sigma_n \leq 500$  kPa apresentaram uma contração inicial seguida de dilatação durante o cisalhamento, ao passo que aqueles submetidos a valores de  $\sigma_n \geq 750$  kPa contraíram durante o cisalhamento.
- Fixando o domínio de compacidade relativa (CR), para os corpos de prova que apresentaram contração no cisalhamento, observou-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), maior tende a ser a contração durante o cisalhamento e, portanto, maior tende a ser o deslocamento vertical (para baixo) do *top cap* na ruptura ( $\delta v_r$ ).
- Fixando o domínio de compacidade relativa (CR), para os corpos de prova que apresentaram contração inicial seguida de dilatação no cisalhamento, observou-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), maior tende a ser a contração inicial e menor a dilatação subsequente. Portanto, quanto maior o valor de  $\sigma_n$ , menor tende a ser o deslocamento vertical (para cima) do *top cap* na ruptura ( $\delta v_r$ ).

C) Quanto aos resultados dos ensaios de cisalhamento direto agrupados por tensão normal nominal

- Para uma dada tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) fixada, observou-se que quanto menor o índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ ) e, portanto, quanto maior a compacidade relativa pré-cisalhamento ( $CR_c$ ), maior o ângulo de



atrito de pico ( $\phi'$ ). Observou-se que tal aumento de  $\phi'$  começa a ocorrer a partir do ponto do domínio de  $e_c$  onde começa a haver dilatação na ruptura, isto é, deslocamento vertical *top cap* na ruptura ( $\delta v_r$ ) positivo (para cima). A partir deste ponto, quanto menor o valor de  $e_c$ , maior a dilatação na ruptura ( $\delta v_r$ ), e maior o valor do ângulo de atrito de pico ( $\phi'$ ).

- Para uma dada tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) fixada, observou-se que quanto menor o índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ ) e, portanto, quanto maior a compacidade relativa pré-cisalhamento ( $CR_c$ ), menor tende a ser o deslocamento horizontal relativo na ruptura ( $\delta h_r$ ).
- Para uma dada tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) fixada, observou-se que quanto menor o índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ ) e, portanto, quanto maior a compacidade relativa pré-cisalhamento ( $CR_c$ ), menor a contração na ruptura e maior a dilatação na ruptura.

D) Quanto à obtenção da curva índice de vazios crítico versus tensão normal nominal crítica

- A partir das curvas “deslocamento vertical do *top cap* na ruptura ( $\delta v_r$ ) versus índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_c$ )”, cada qual correspondente a um dos dez valores de tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), foi possível determinar o índice de vazios crítico ( $e_{cr}$ ) associado a cada valor de  $\sigma_n$ , que é aquele correspondente a  $\delta v_r = 0$ . Quanto maior o valor de  $\sigma_n$ , menor o correspondente valor do índice de vazios crítico ( $e_{cr}$ ) obtido. Com os pares ordenados ( $\sigma_n$ ,  $e_{cr}$ ) assim obtidos, foi traçada a curva “índice de vazios crítico ( $e_{cr}$ ) versus tensão normal nominal crítica ( $\sigma_{n\ cr}$ )” da Areia da Praia de Ipanema, obtida dos ensaios de cisalhamento direto.

E) Quanto à interpretação do fenômeno da dilatação à luz do modelo de Taylor (1948) aprimorado por Atkinson & Bransby (1978)

- A aplicabilidade do modelo de dilatação proposto por Taylor (1948) e aprimorado por Atkinson & Bransby (1978) foi avaliada nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova moldados nos domínios de compacidade relativa (CR) médio 2, compacto e muito compacto, os quais apresentaram dilatação no cisalhamento sob todos os valores de  $\sigma_n$ . Observou-se que o modelo se aplicou bem aos corpos de prova que dilataram sob valores de  $\sigma_n \geq 300$  kPa, mas não se aplicou bem aos corpos de prova que dilataram sob valores de  $\sigma_n \leq 150$  kPa.
- O ângulo de atrito a volume constante ( $\phi'_{cv}$ ) da Areia da Praia de Ipanema parece estar situado entre  $30^\circ$  e  $32^\circ$ . O limite inferior desse intervalo corresponde ao ângulo de atrito no repouso da Areia da Praia de Ipanema determinado por Martins (2020).

F) Quanto ao fenômeno *stick-slip* observado nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  e  $\delta v \times \delta h$

- O fenômeno *stick-slip* foi observado nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  e  $\delta v \times \delta h$  de todos os ensaios de cisalhamento direto, isto é, em todos os domínios de compacidade relativa (CR) e sob todos os valores de tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ) aplicados.
- Ao fixar o domínio de compacidade relativa (CR), observou-se que quanto maior a tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), com menor amplitude ocorreu o fenômeno *stick-slip*. Por outro lado, fixando a tensão normal ( $\sigma_n$ ), observou-se que, para valores de  $\sigma_n \leq 100$  kPa, ocorreu uma leve tendência de diminuição da amplitude do fenômeno com o aumento da compacidade relativa (CR). Todavia, para valores de  $\sigma_n \geq 150$  kPa, não se observou nenhuma tendência de alteração da magnitude do fenômeno com a variação de CR.

G) Quanto à avaliação da eficácia do dispositivo utilizado para impedir o adernamento do *top cap*

- O dispositivo utilizado para impedir o adernamento (rotação) do *top cap* cumpriu muito bem a função para a qual foi concebido, haja visto que, ao final de todos os ensaios de cisalhamento direto, a superfície superior do corpo de prova era perfeitamente horizontal, além do dispositivo não ter apresentado nenhum sinal aparente de deformação no final da campanha.

## 5.2. Sugestões para futuros trabalhos

Como pesquisas futuras, sugere-se:

- Realizar a mesma campanha de ensaios de caracterização e de ensaios de cisalhamento direto desta pesquisa, porém em outras areias do litoral do Estado do Rio de Janeiro, que possuam granulometrias e/ou formato de grãos diferentes da Areia da Praia de Ipanema.
- Realizar uma campanha de ensaios de cisalhamento direto na Areia de Ipanema estrategicamente planejada para avaliar a influência da velocidade de cisalhamento na ocorrência do fenômeno *stick-slip*. Para isso, sugere-se realizar ensaios com diferentes combinações de compacidade relativa (CR) e tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), executando, para cada combinação, três ensaios com três velocidades de cisalhamento de diferentes ordens de grandeza.
- Realizar uma campanha de ensaios de cisalhamento direto na Areia de Ipanema estrategicamente planejada para avaliar a influência da utilização do dispositivo desenvolvido para bloquear a rotação do *top cap* nas curvas  $\tau/\sigma \times \delta h$  e  $\delta v \times \delta h$ . Para isso, sugere-se realizar ensaios com diferentes combinações de compacidade relativa (CR) e tensão normal nominal ( $\sigma_n$ ), executando, para cada combinação, dois ensaios, sendo um com e o outro sem uso do dispositivo.

## 6 Referências bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Análise granulométrica.** NBR – 7181, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. –. NBR – 6502, 1995.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** NBR – 6508, 1984.

ADJÉMIAN, F.; EVESQUE, P. **Experimental Stick-Slip Behaviour In Triaxial Test on Granular Matter.** In **Powders & Grains 2001**, pp. 115-121, 2001.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.** D – 4254, 2016.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (*Unified Soil Classification System*).** D – 2487, 2017.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions.** D – 3080/3080M, 2011.

ATKINSON J. H.; BRANSBY P. L. **The Mechanics of Soils. An Introduction to Critical State Soil Mechanics.** McGraw – Hill Book Company (UK) Limited. University séries in civil engineering, 1978.

BLAKER, Ø. LUNNE, T., VESTGÅRDEN, T., KROGH, L. THOMSEN, N.V., POWELL, J.J.M, WALLACE, C.F. Method dependency for determining maximum

and minimum dry unit weights of sands. **Frontiers in Offshore Geotechnics**, Vol. III (Meyer), pp. 1159-1166, 2015.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The Friction and Lubrification of Solids**. Oxford University Press, Clarendon, Oxford, 1950.

CASAGRANDE, A. **Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills**. Contributions to Soil Mechanics, 1925 – 1940. Boston Society of Civil Engineers, 1940.

CHO, G.; DODDS, J.; SANTAMARINA, J. C.; Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 132, N° 5, May, 2006.

COSTA, R. C. Ensaio de Caracterização e de Permeabilidade na Areia da Praia de Ipanema, RJ. 2020. 258 f. Dissertação (Mestre em Geotecnia em Engenharia Civil). Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Comunicação pessoal de Gustavo Domingos, em 10 de Junho de 2020, recebida virtualmente.

DOANH, T. et al. **Stick-slip behaviour of model granular materials in drained triaxial compression**. Granular Matter. 15. 10.1007/s10035-012-0384-6, 2013

GERSCOVICH, D. M. S. **Apostila Resistência ao Cisalhamento**. Faculdade de Engenharia/UERJ. Departamento de Estruturas e Fundações. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

HOULSBY, G. T. **How the dilatancy of soils affects their behaviour**. Oxford, UK.: University of Oxford, 1991.

KOLBUSZEWSKI, J. J. An experimental study of maximum and minimum porosities of sands, In: **Proceedings of the second international conference on soil mechanics and foundation engineering**, Vol. 1, p. 158 – 165, 1948.

KRUMBEIN, W. C.; SLOSS, L. L. 1963. **Stratigraphy and Sedimentation**. 2ª Ed, San Francisco, Freeman and Company.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil mechanics**, John Wiley and Sons, Inc., New York. 1967.

LEE, K.L.; SEED, H.B. Drained strength characteristics of sands. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE 93, SM 6, 1967.

MARTINS, I.S.M. (2020). **Notas de aula do curso de Resistência ao Cisalhamento dos Solos**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.

MIURA, S.; TOKI, S. A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation – strenght properties of sand. **Soils and Foundations**, Vol. 22, No. 1, pp. 1 – 17, Mar., 1982.

NUNES, V. P. **Ensaio de caracterização geotécnica da areia da praia de Itaipuaçu**. 2014. 153 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Obtenção do título de Engenheiro). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ª Edi. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RATTON, R. B. **Ensaio triaxiais em areia saturada**. 1993. 186 p. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

REYNOLDS, O. **On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact**. With experimental illustrations. *Phil. Mag.* 20, 1885.

Rowe, P. W. **The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact**. *Proceedings, Royal Society* 269, 1962.

SIMÕES, F. B. **Caracterização geotécnica da areia da praia de Ipanema**. 2015. 148 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**, John Wiley and Sons, Inc. New York. 1948.

TERZAGHI, K. V. **The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foudation Engineering, Cambrigde, 1936.

TERZAGHI, K.; FROHLICH, O.K., **Theorie der setzung von tonschichten, Franz Deuticke**. Vienna. (tradução para o francês - Théorie des tassements des couches argileuses. Dunod – 1939. Paris), 1936.

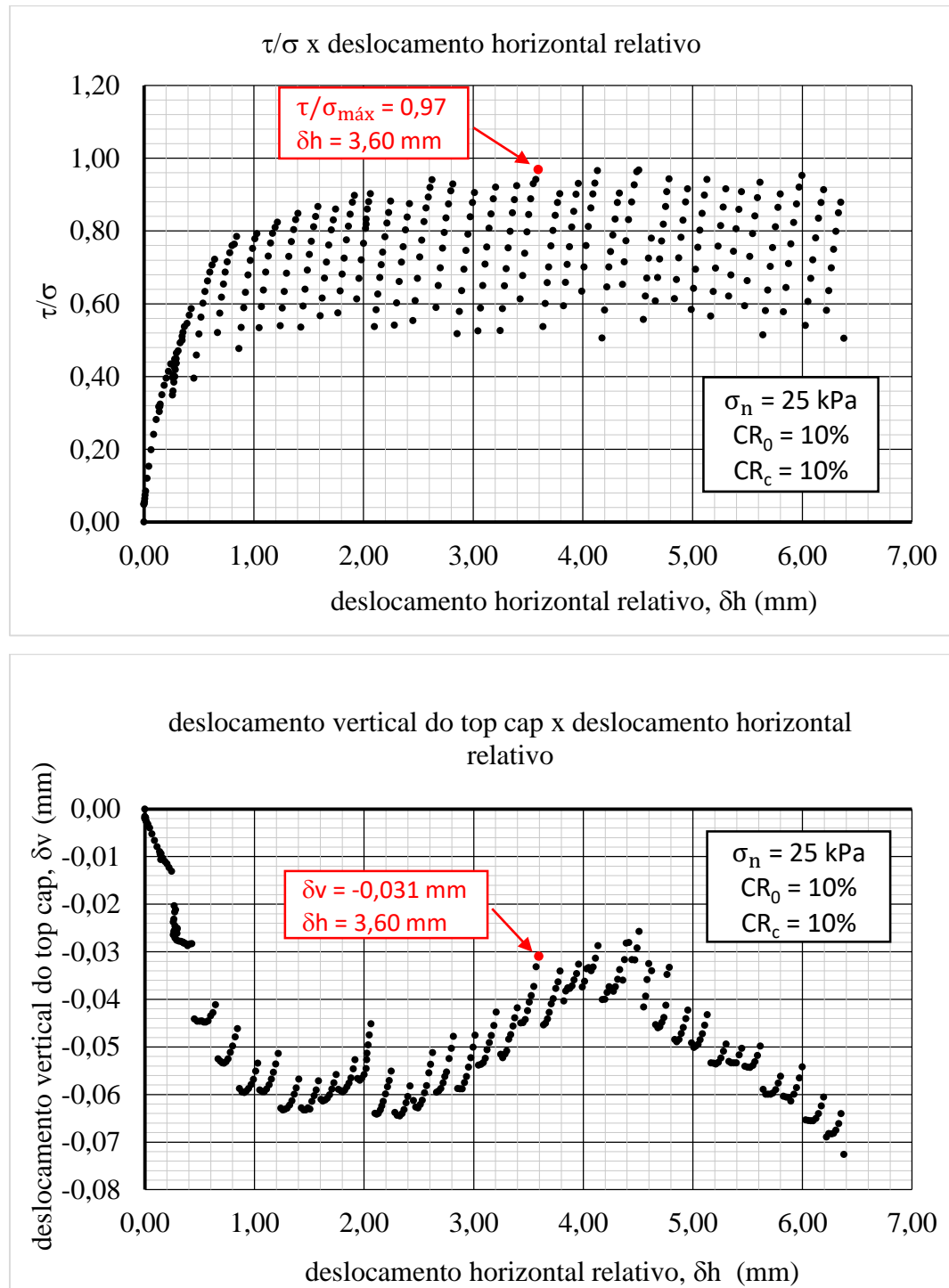
VILLAÇA, S. F.; TABORDA GARCIA, L. F, **Introdução à Teoria da Elasticidade**, Quarta Edição, COPPE/UFRJ, 2000.

XIAO et al. **Effect of Particle Shape on Stress-Dilatancy Responses of Medium-Dense Sands**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019.

## Apêndice 1

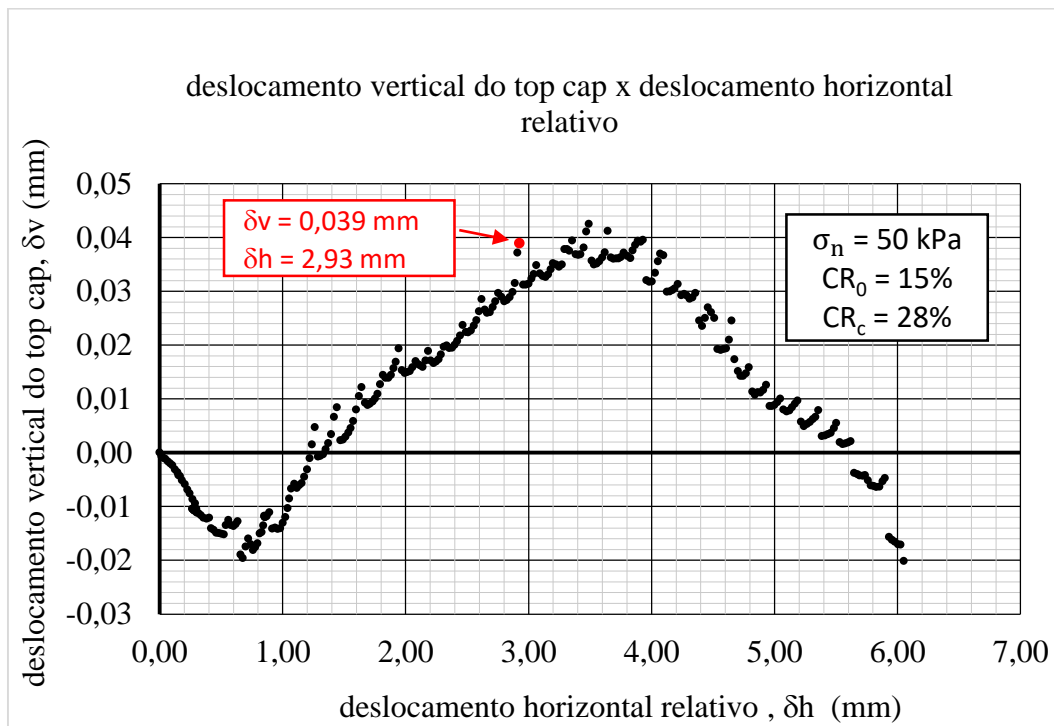
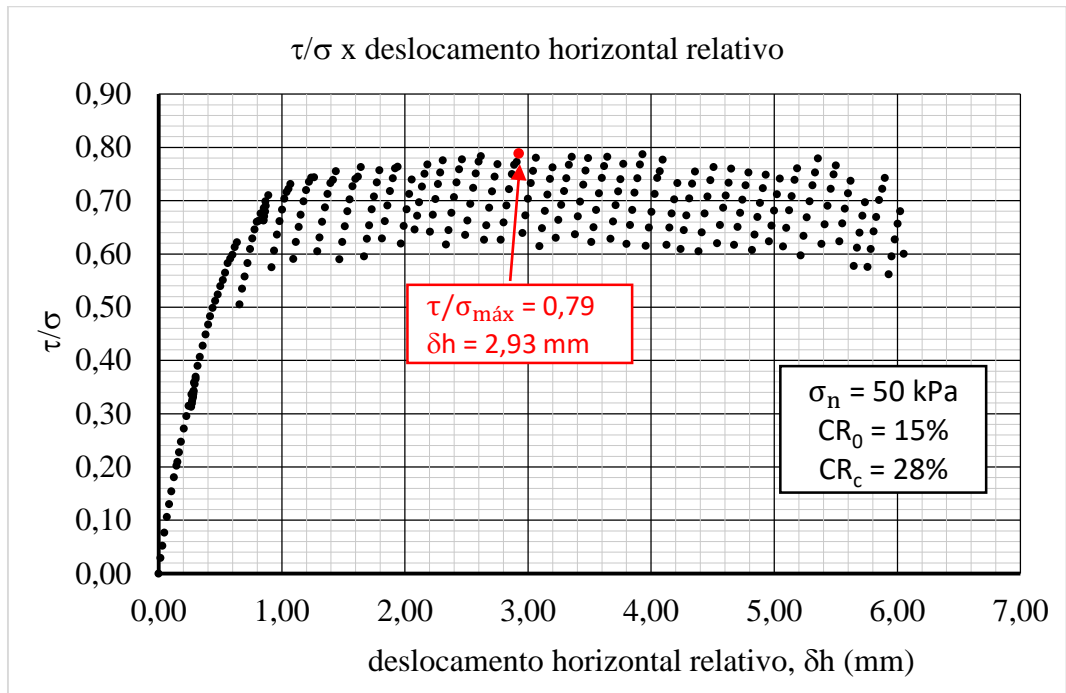
### Resultados individuais dos ensaios de cisalhamento direto

**Ensaio 1: Tensão normal 25 kPa – CR<sub>0</sub> 10%**

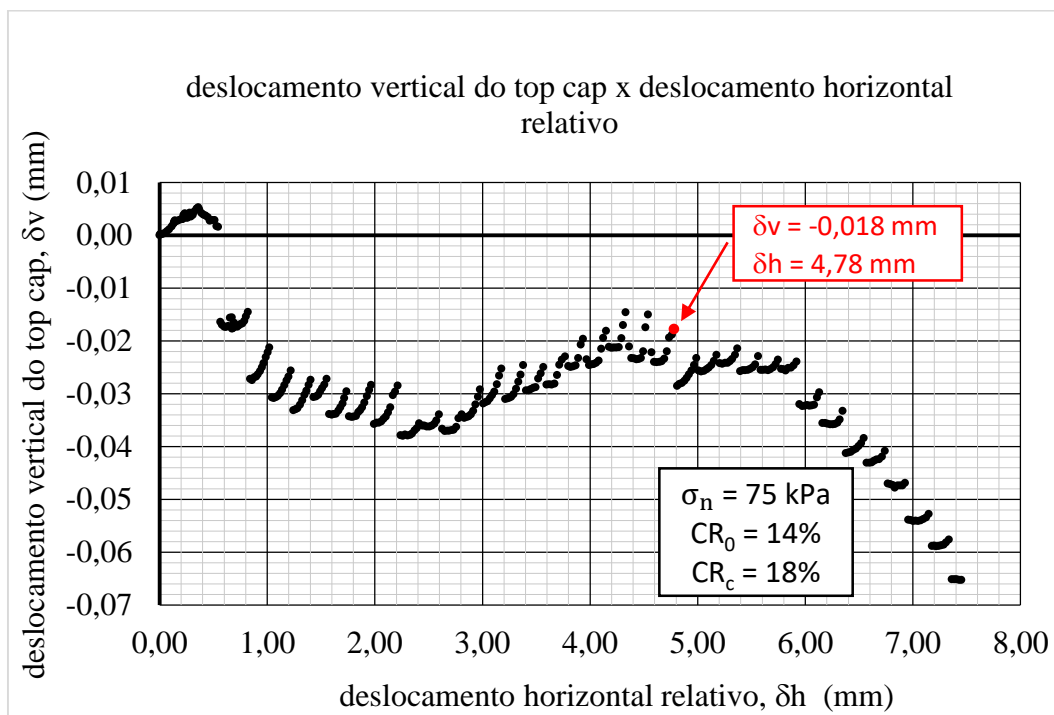
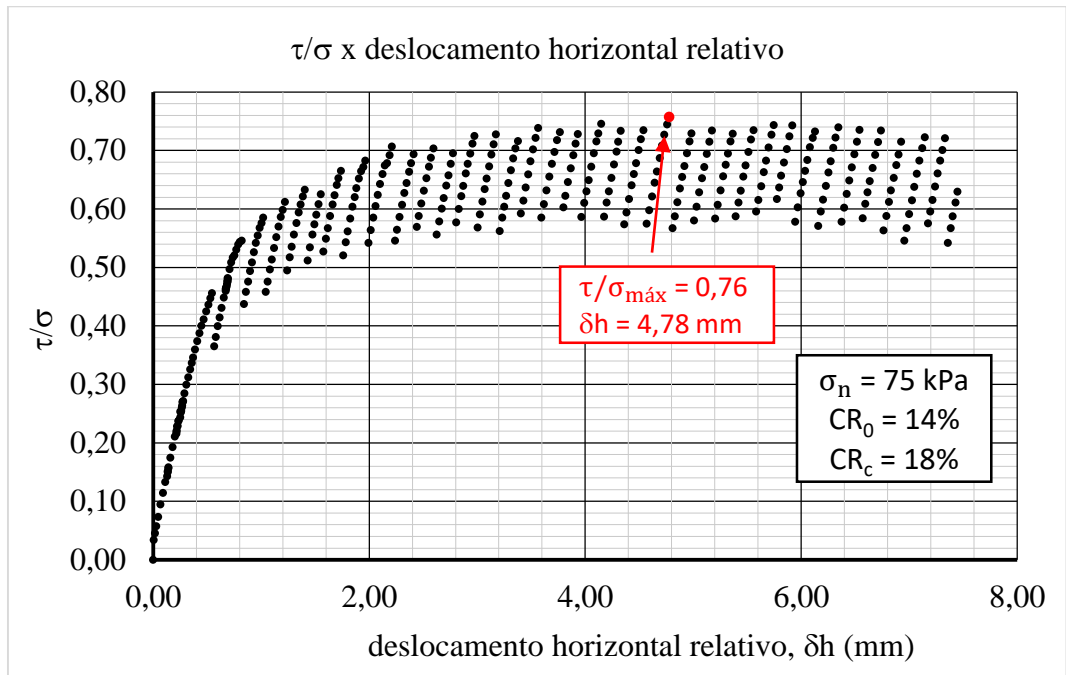




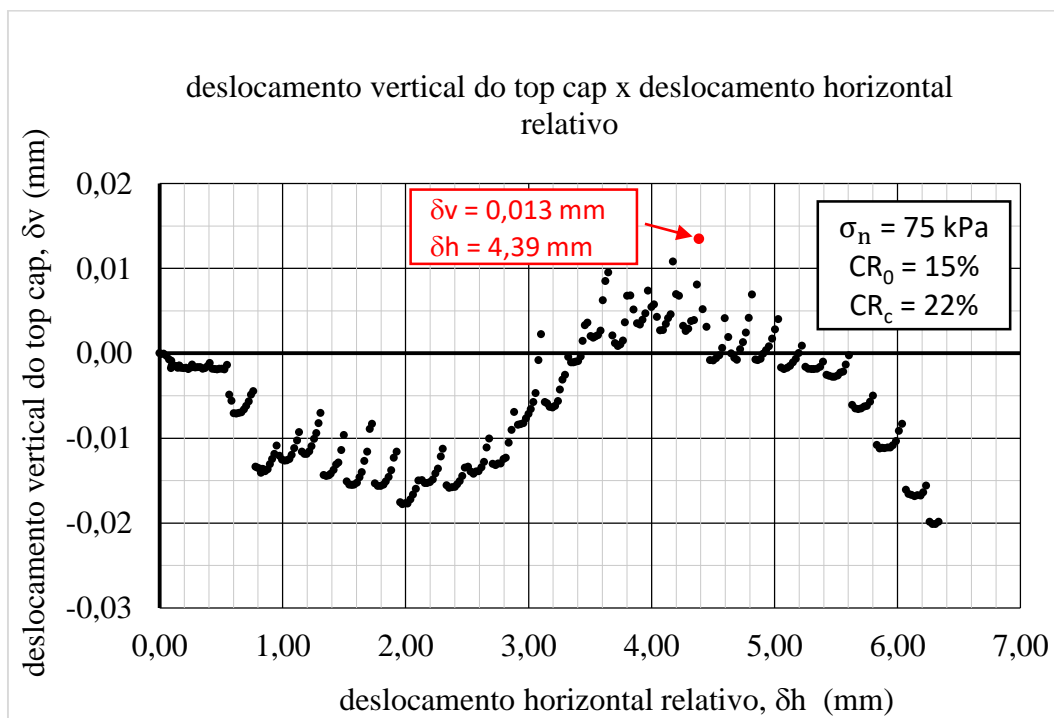
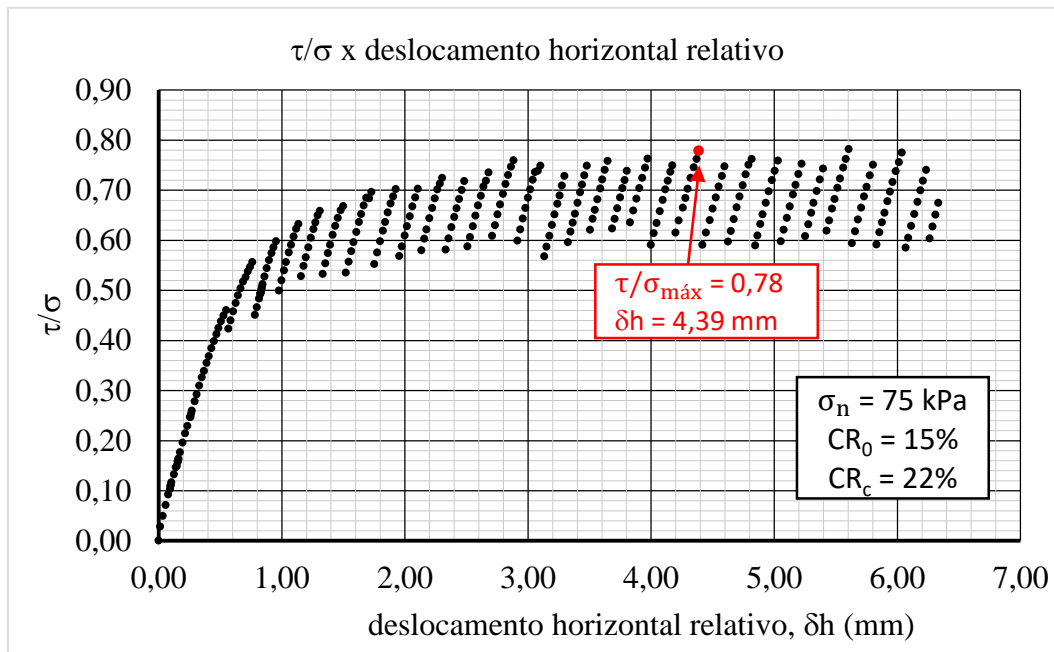
### Ensaio 2: Tensão normal 50 kPa – CR<sub>0</sub> 15%



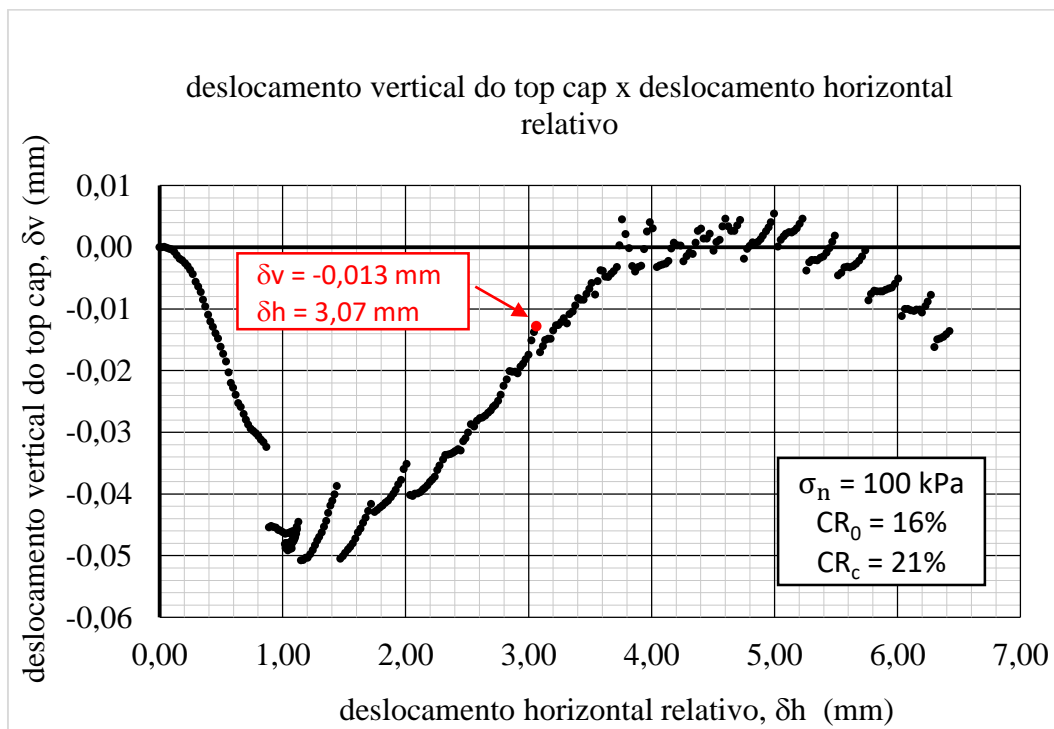
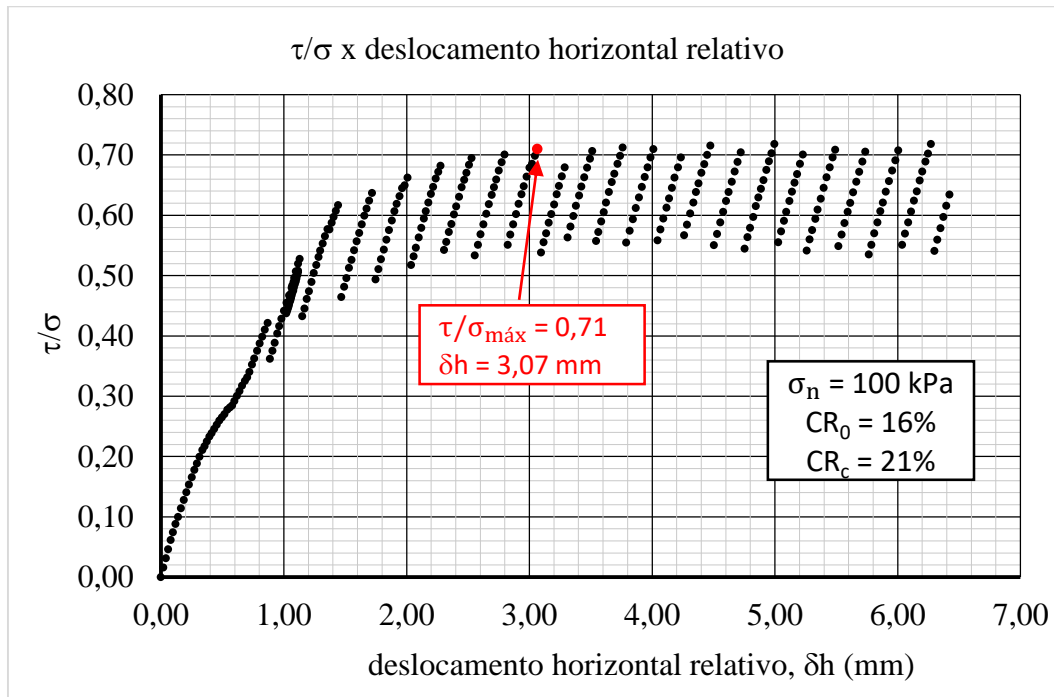
### Ensaio 3: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 14%



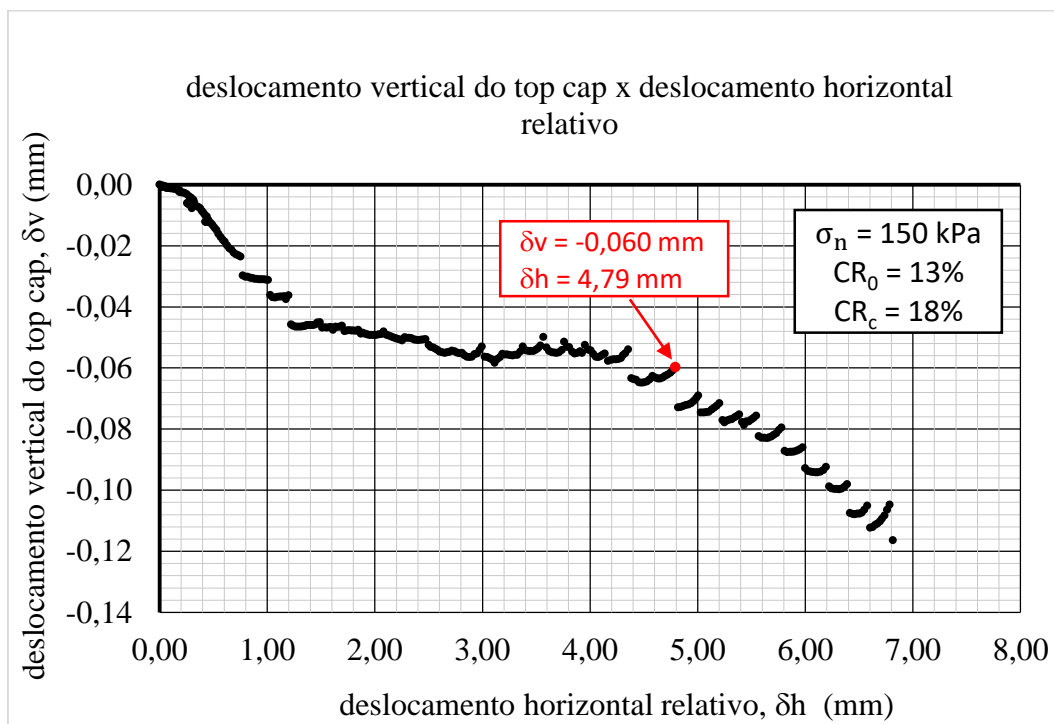
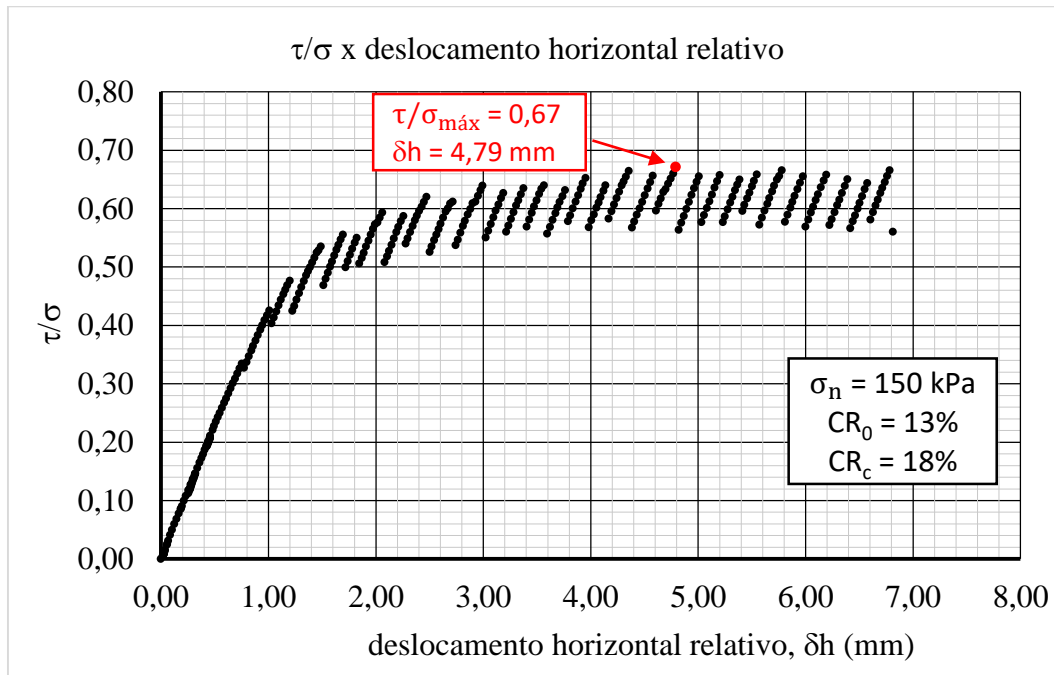
#### Ensaio 4: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 15%



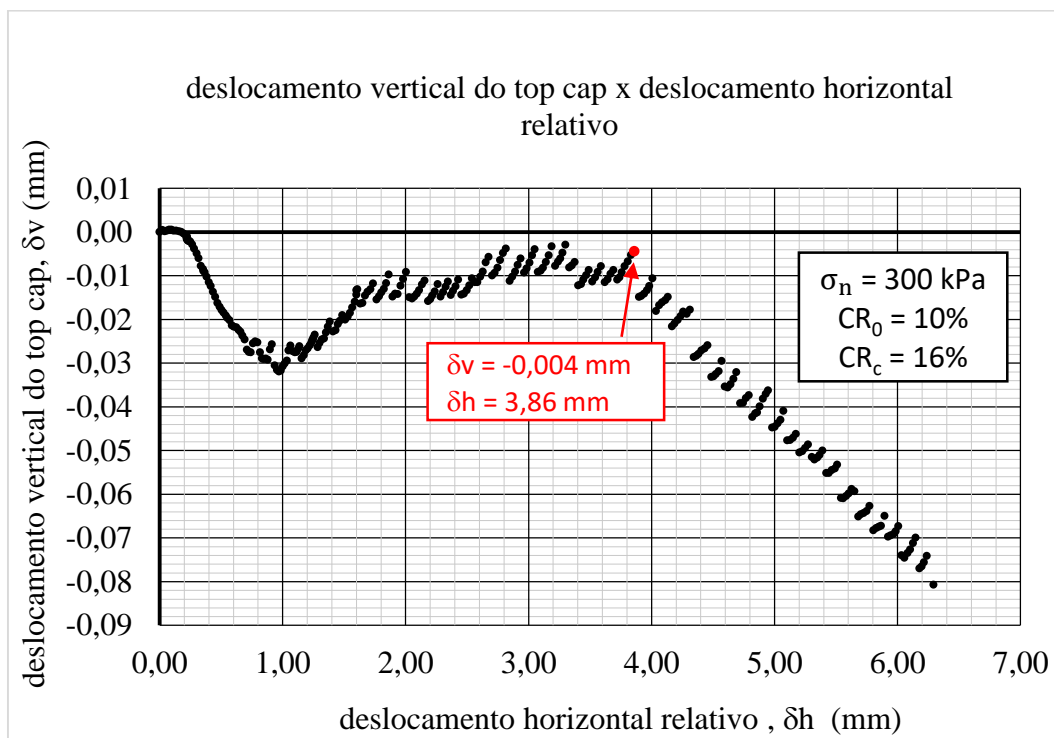
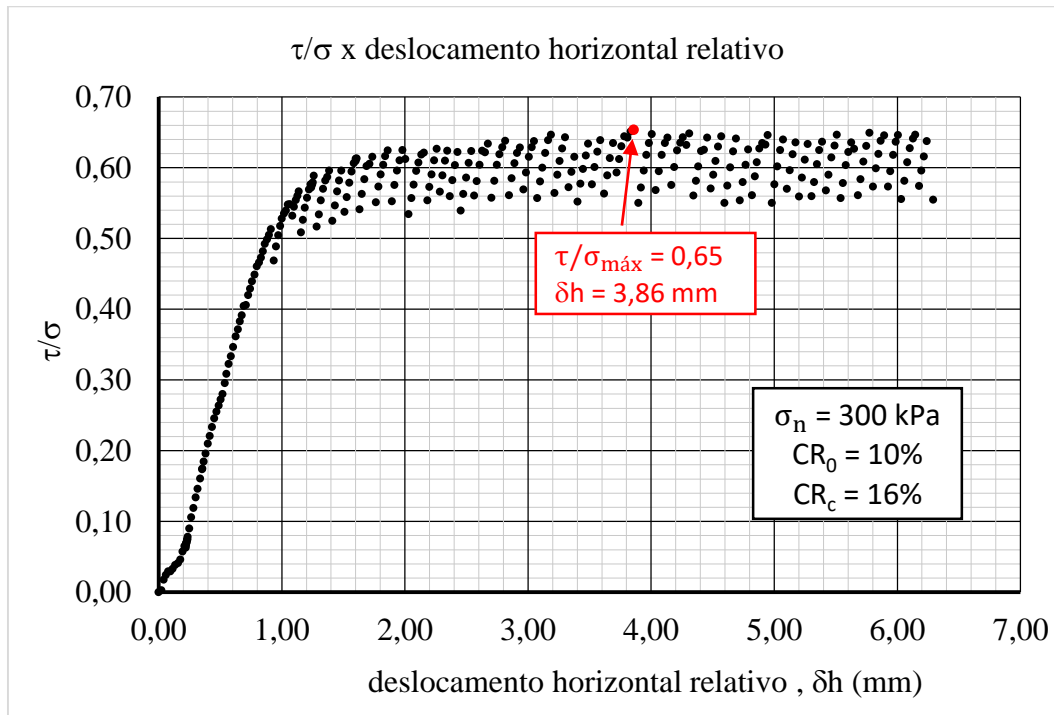
### Ensaio 5: Tensão normal 100 kPa – CR<sub>0</sub> 16%



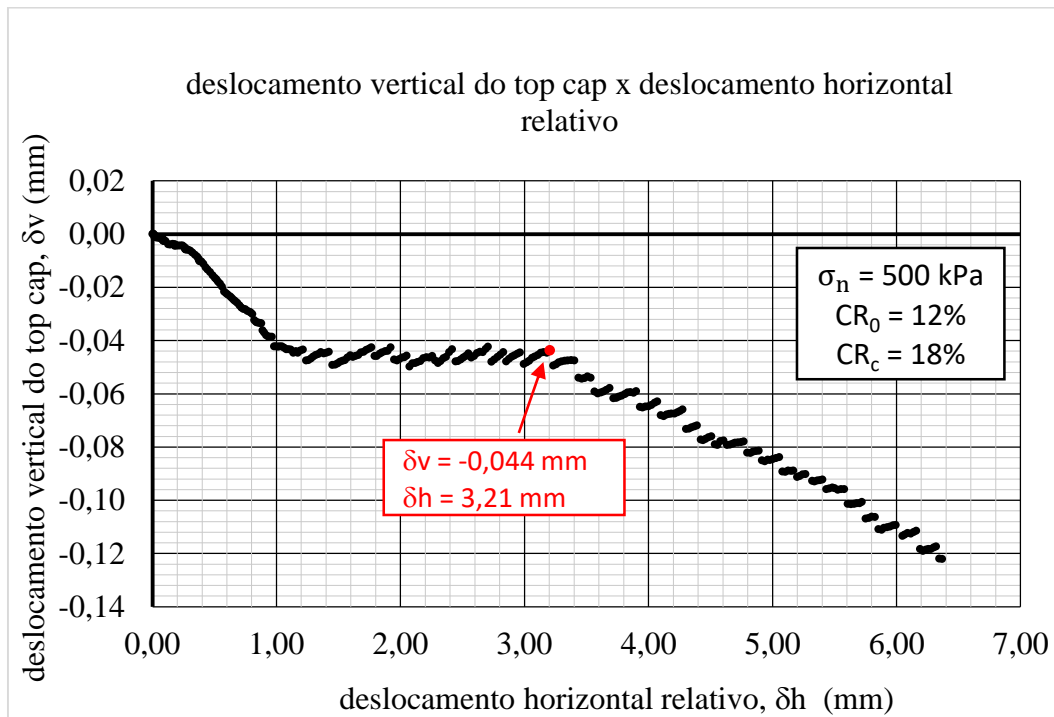
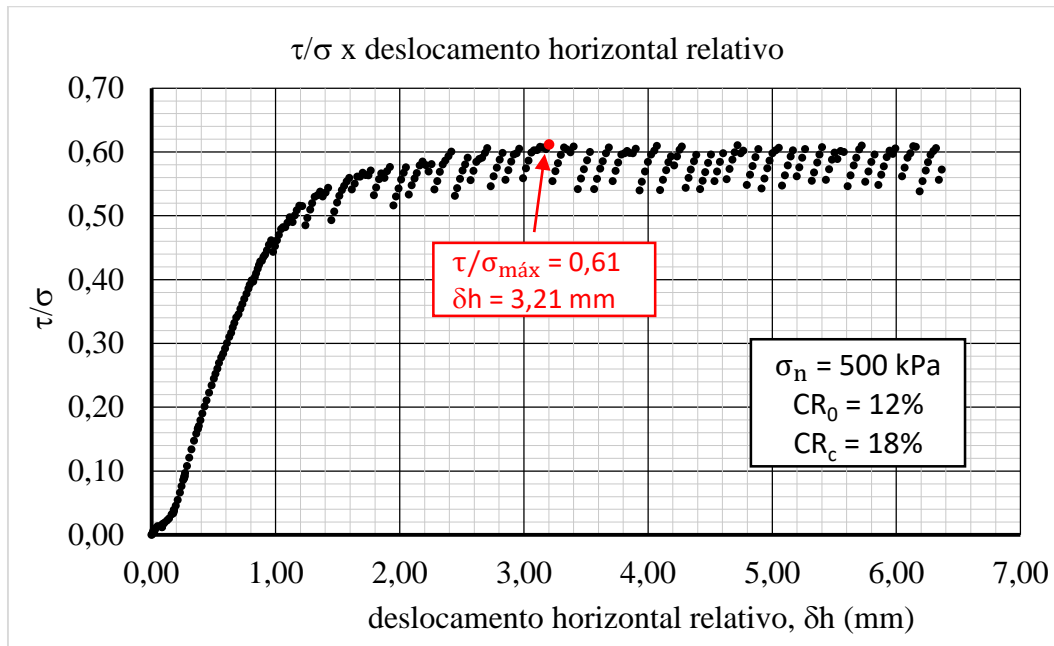
### Ensaio 6: Tensão normal 150 kPa – CR<sub>0</sub> 13%



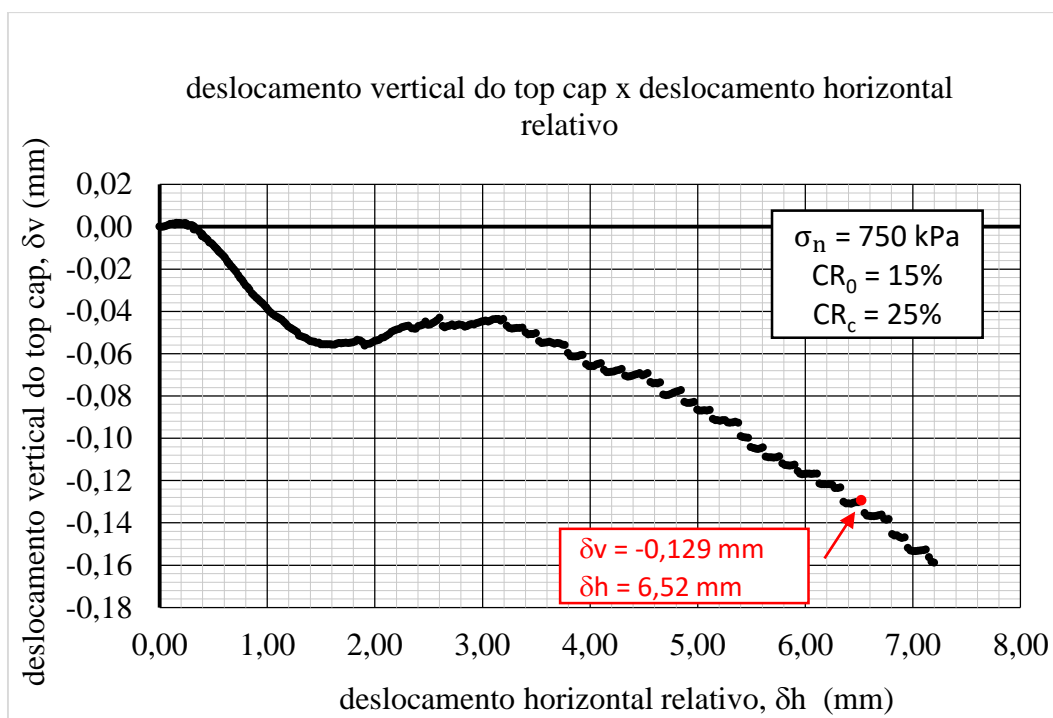
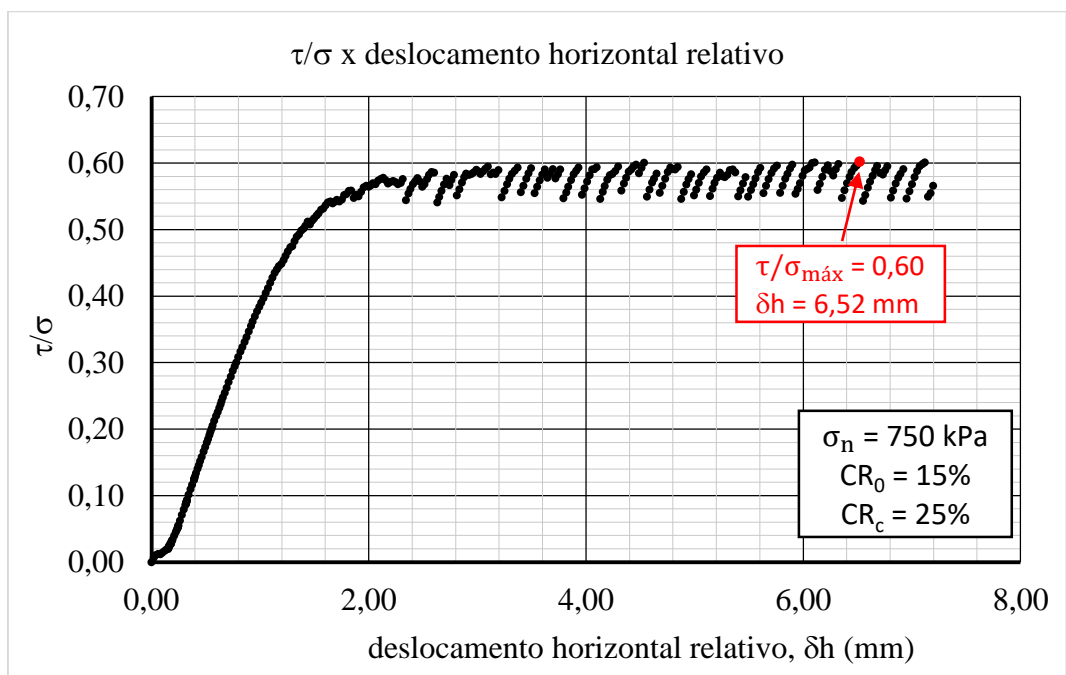
### Ensaio 7: Tensão normal 300 kPa – CR<sub>0</sub> 10%



### Ensaio 8: Tensão normal 500 kPa – CR<sub>0</sub> 12%

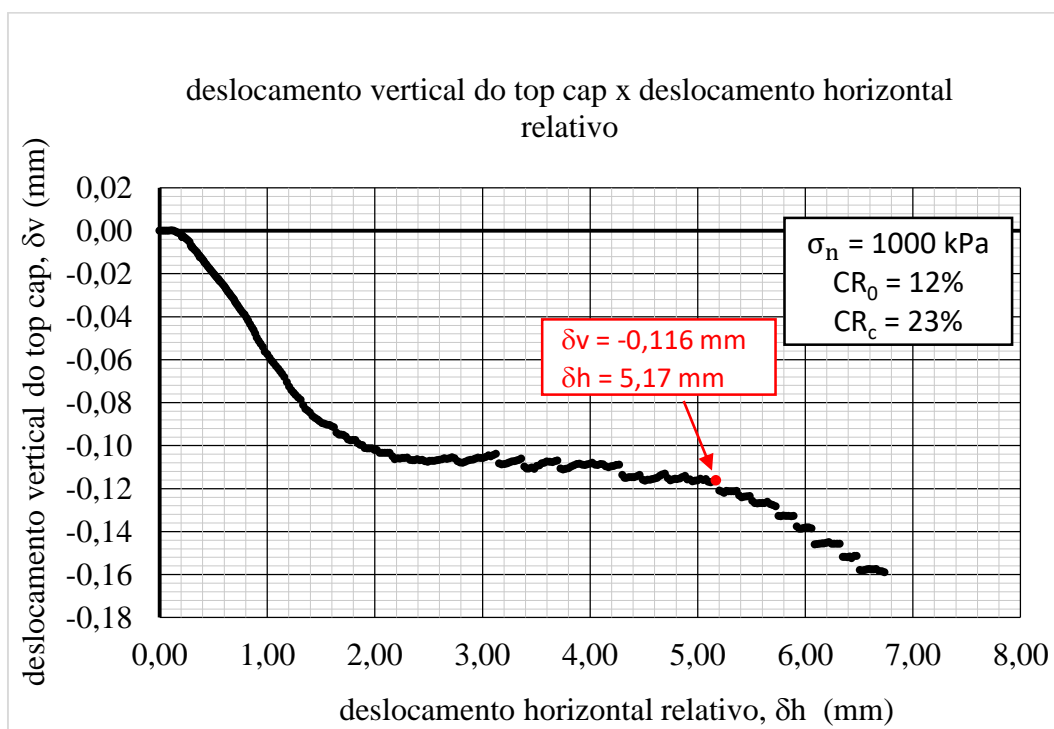
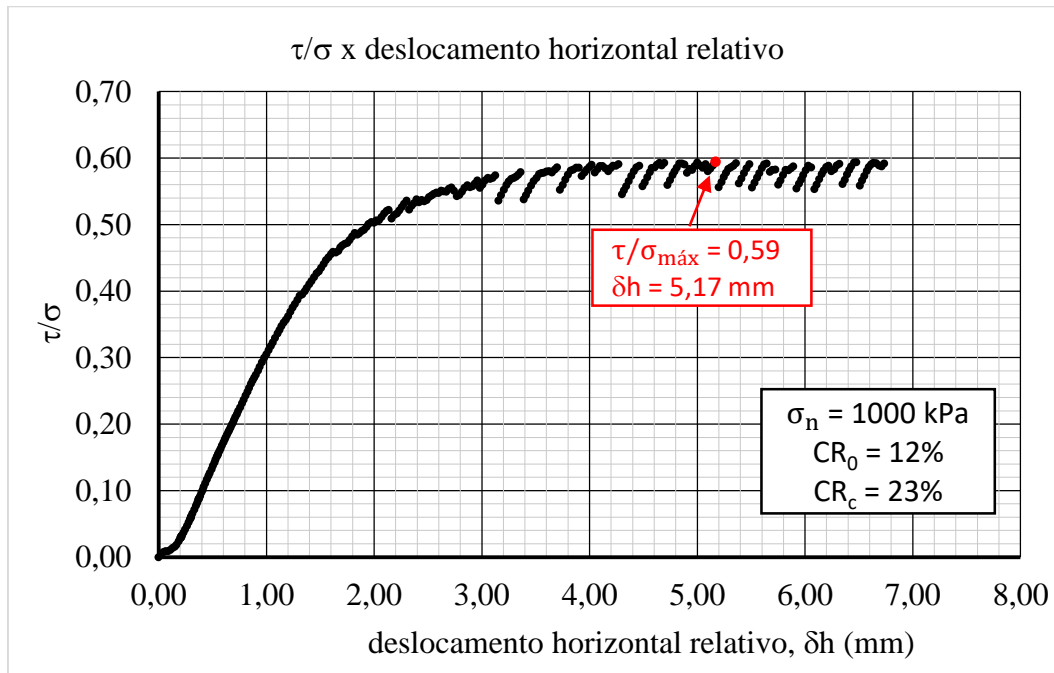


### Ensaio 9: Tensão normal 750 kPa – CR<sub>0</sub> 15%

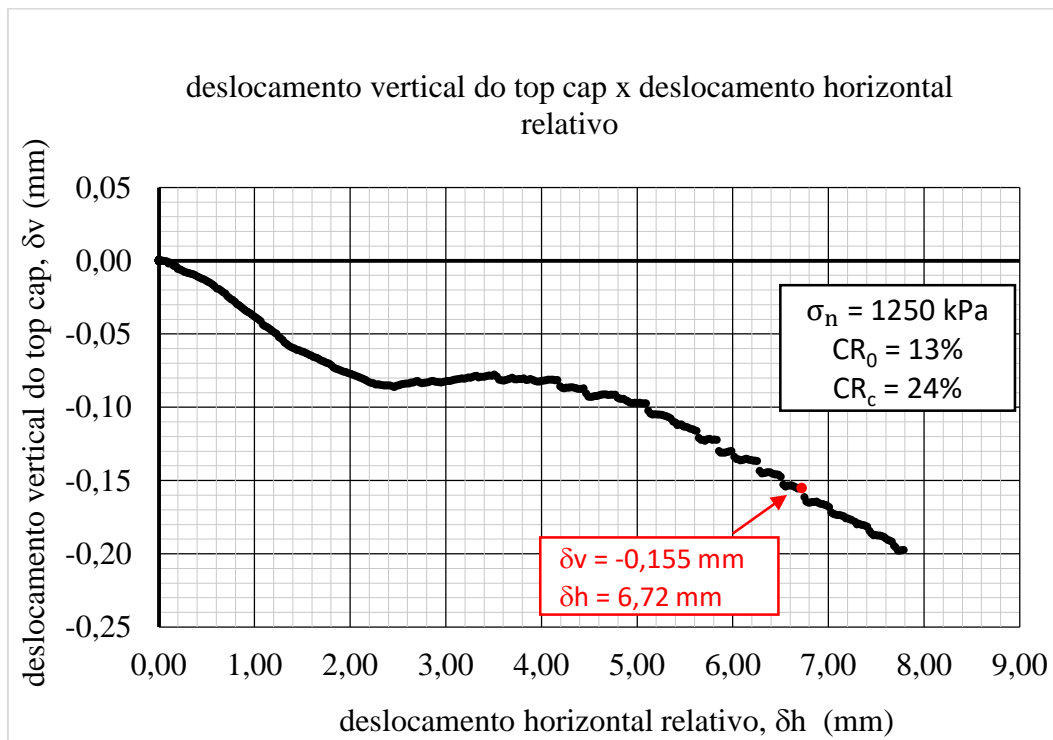
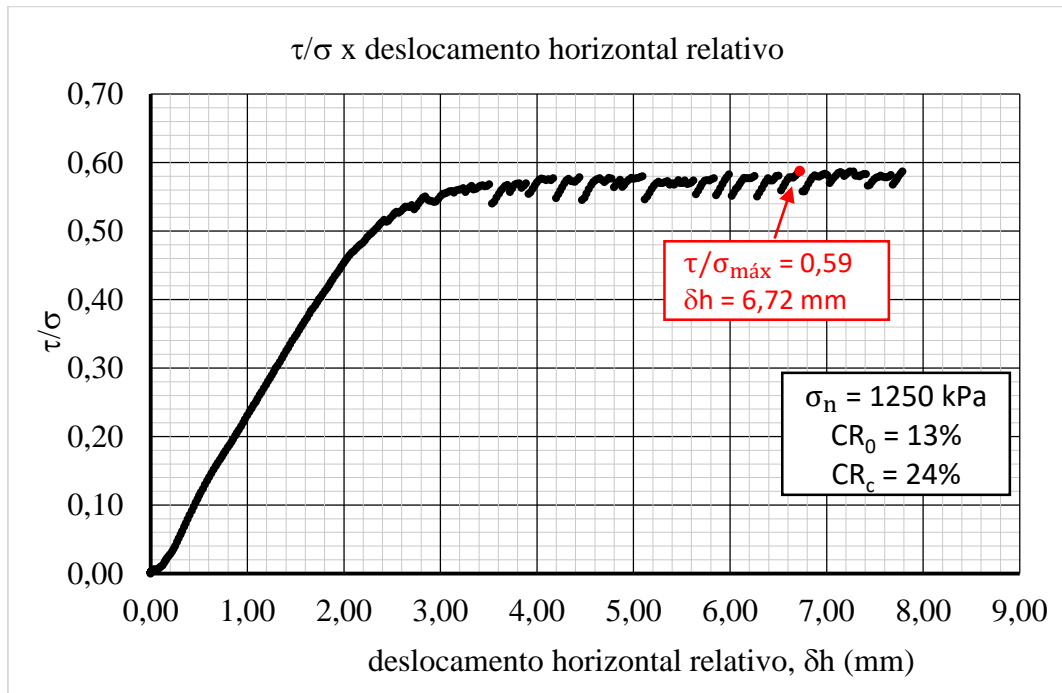




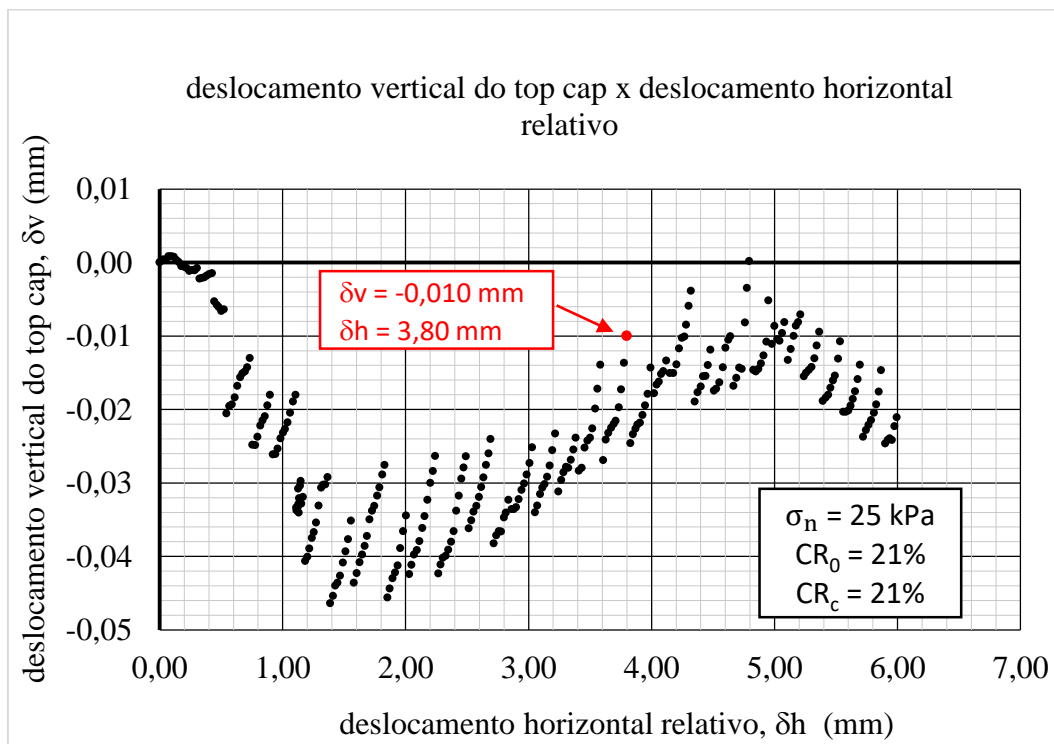
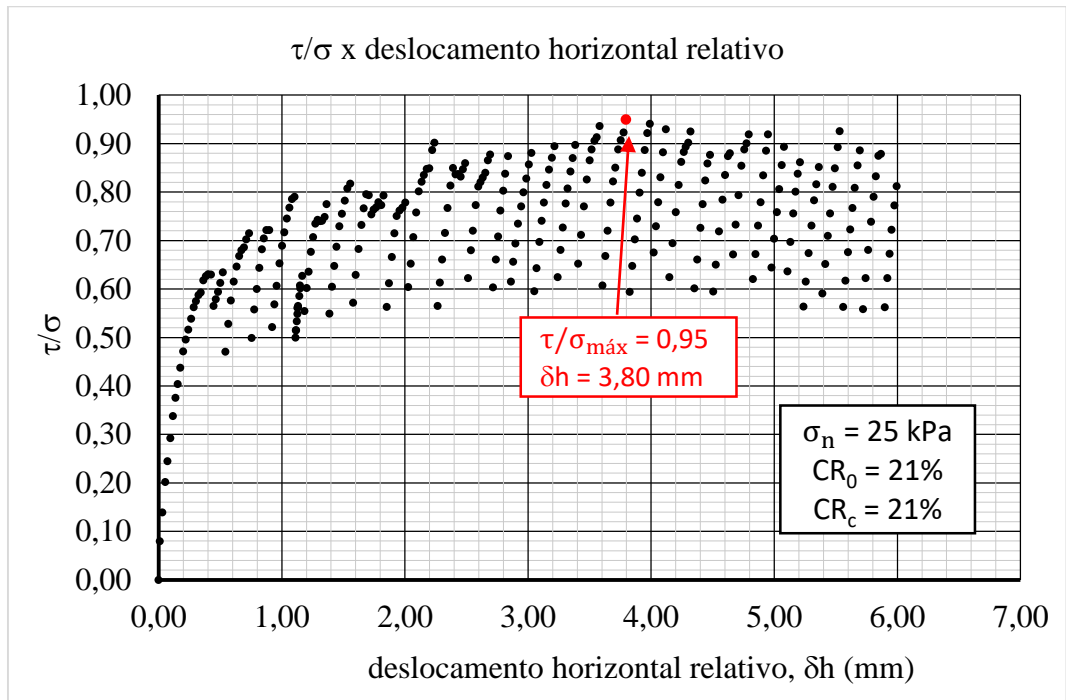
### Ensaio 10: Tensão normal 1000 kPa – CR<sub>0</sub> 12%



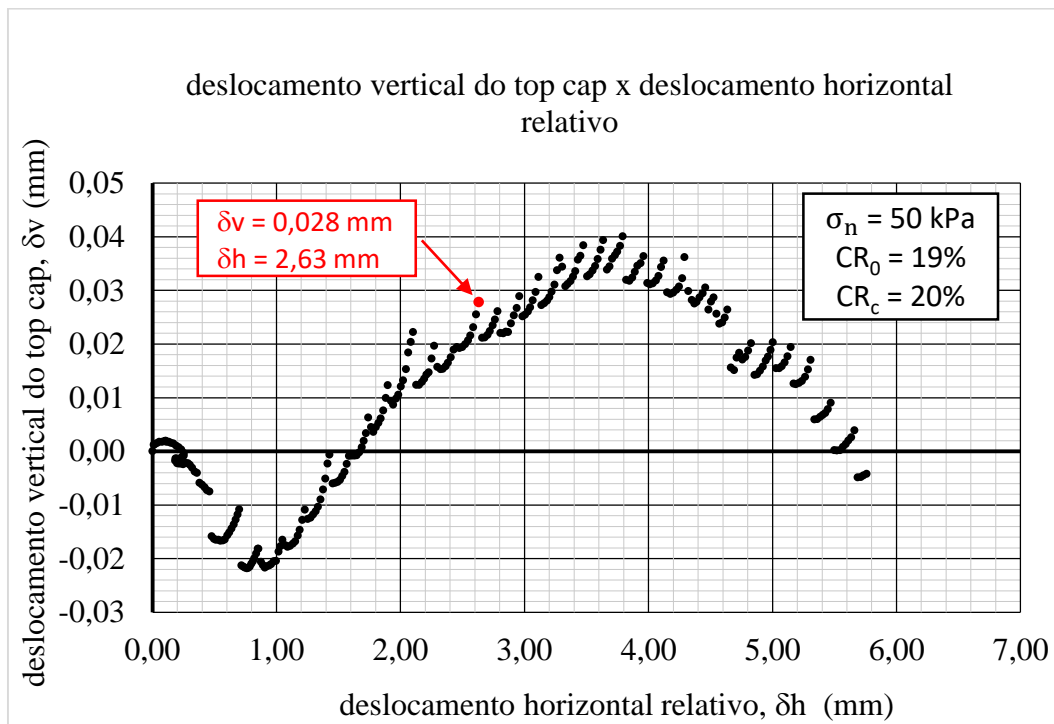
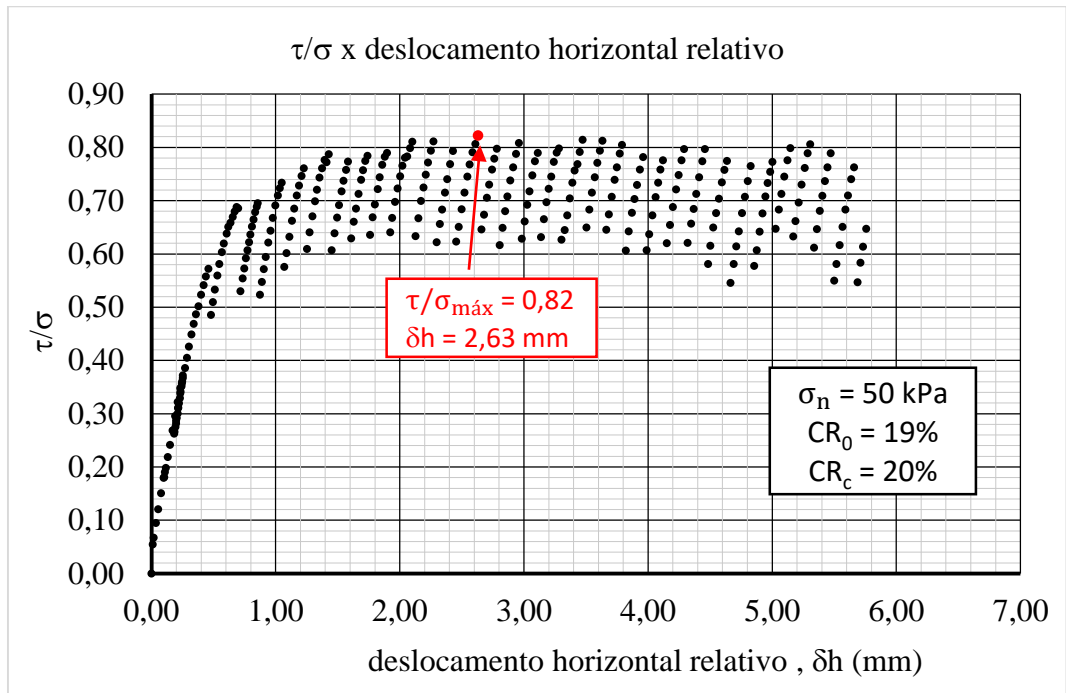
### Ensaio 11: Tensão normal 1250 kPa – CR<sub>0</sub> 13%



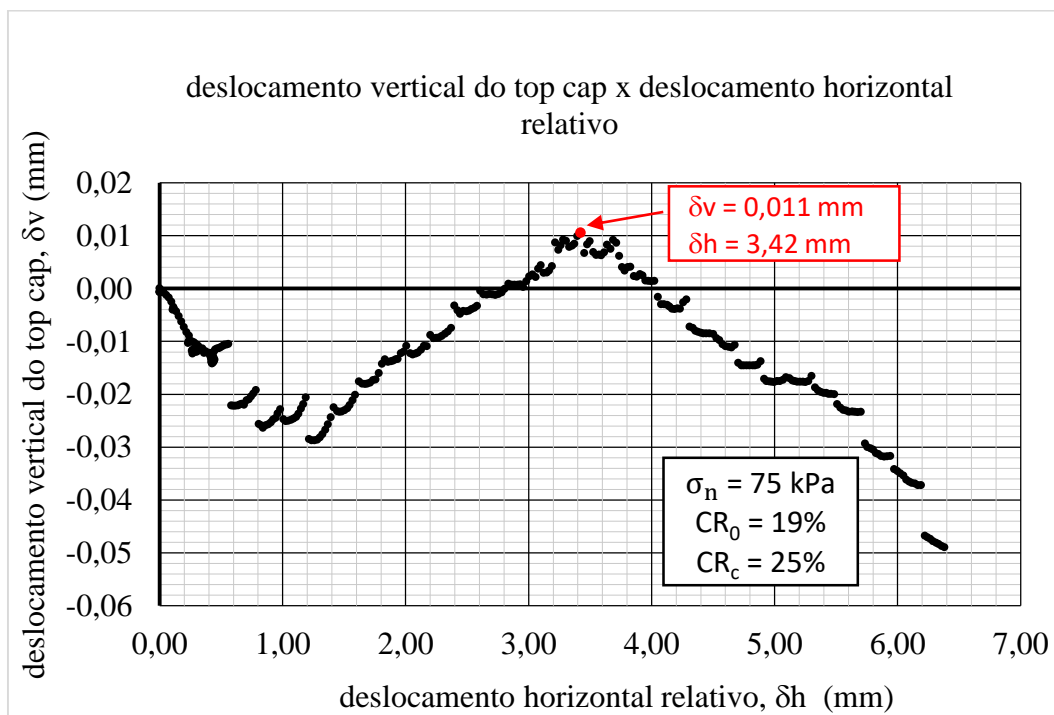
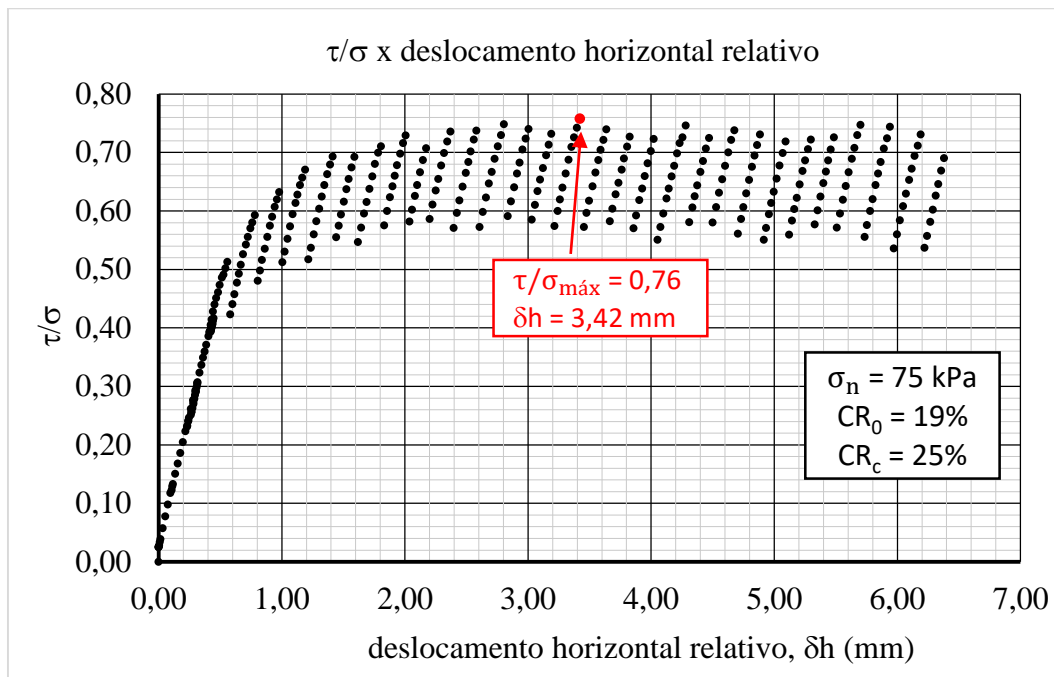
### Ensaio 12: Tensão normal 25 kPa – CR<sub>0</sub> 21%



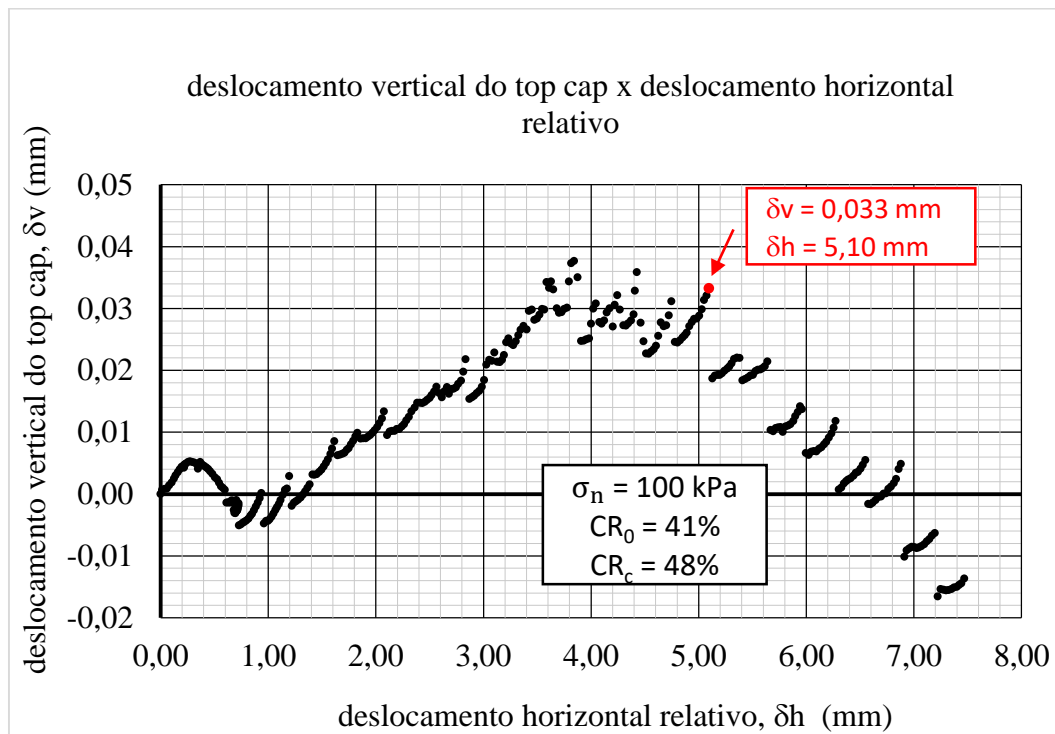
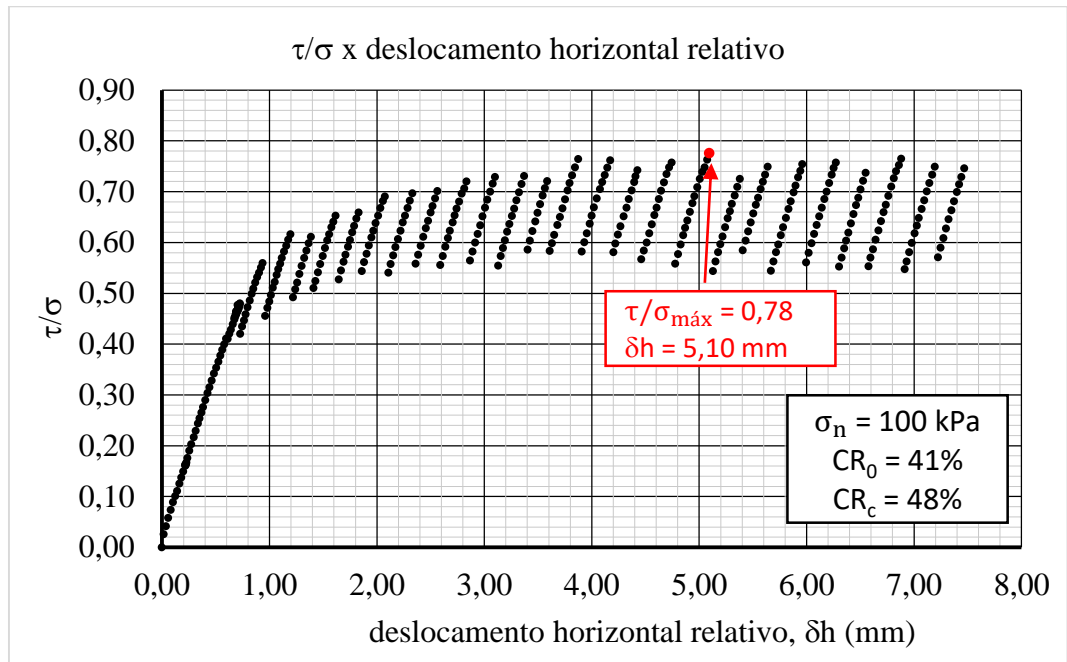
### Ensaio 13: Tensão normal 50 kPa – CR<sub>0</sub> 19%



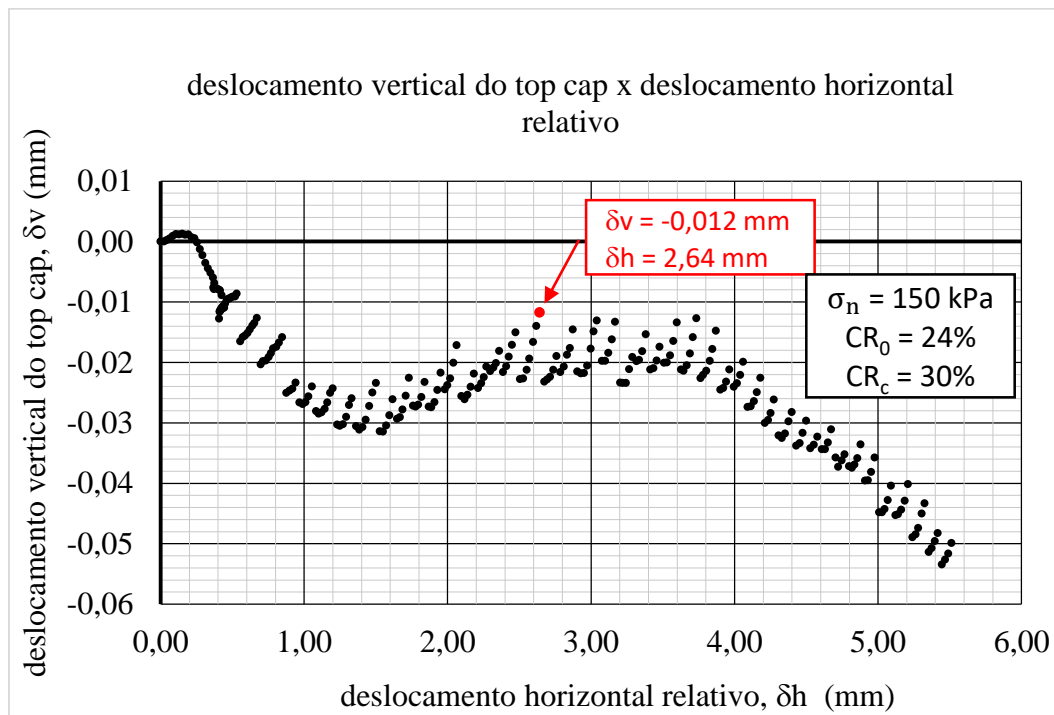
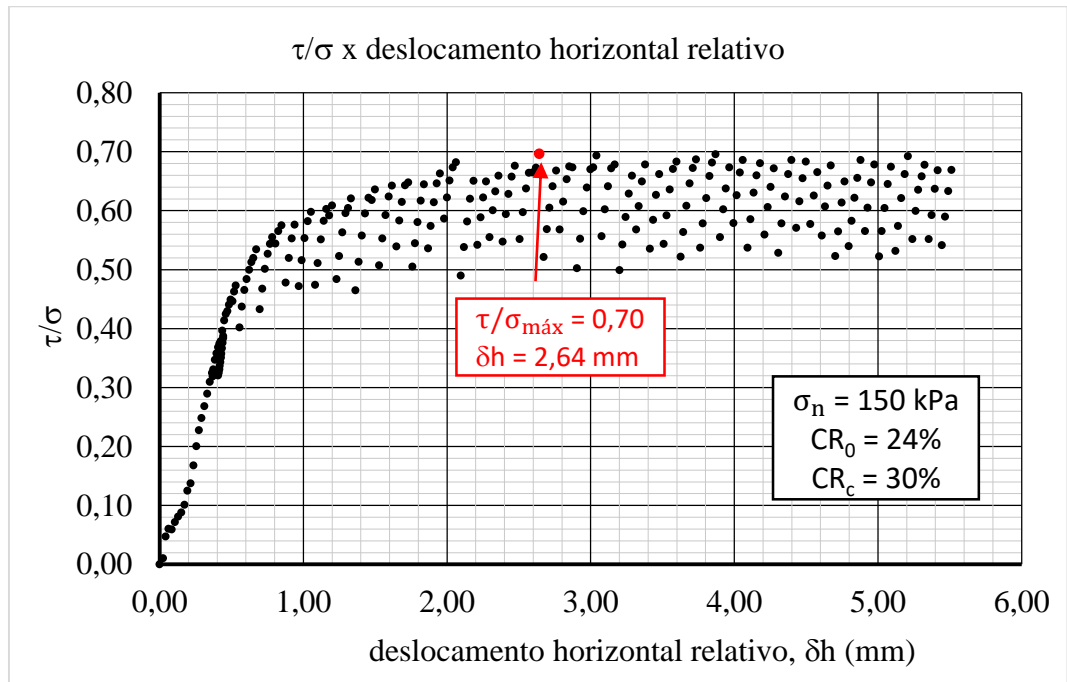
### Ensaio 14: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 19%



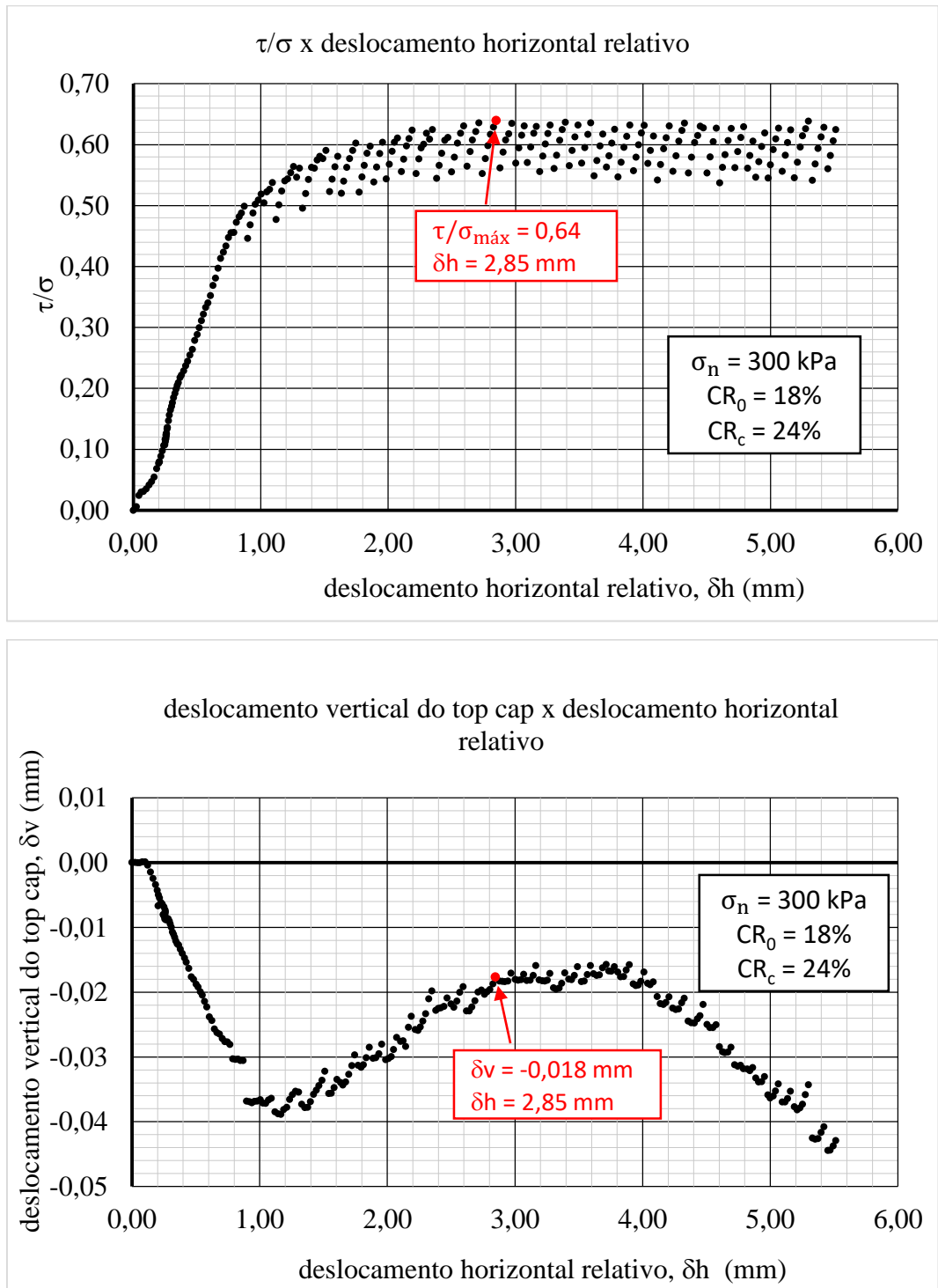
### Ensaio 15: Tensão normal 100 kPa – CR<sub>0</sub> 25%



### Ensaio 16: Tensão normal 150 kPa – CR<sub>0</sub> 24%

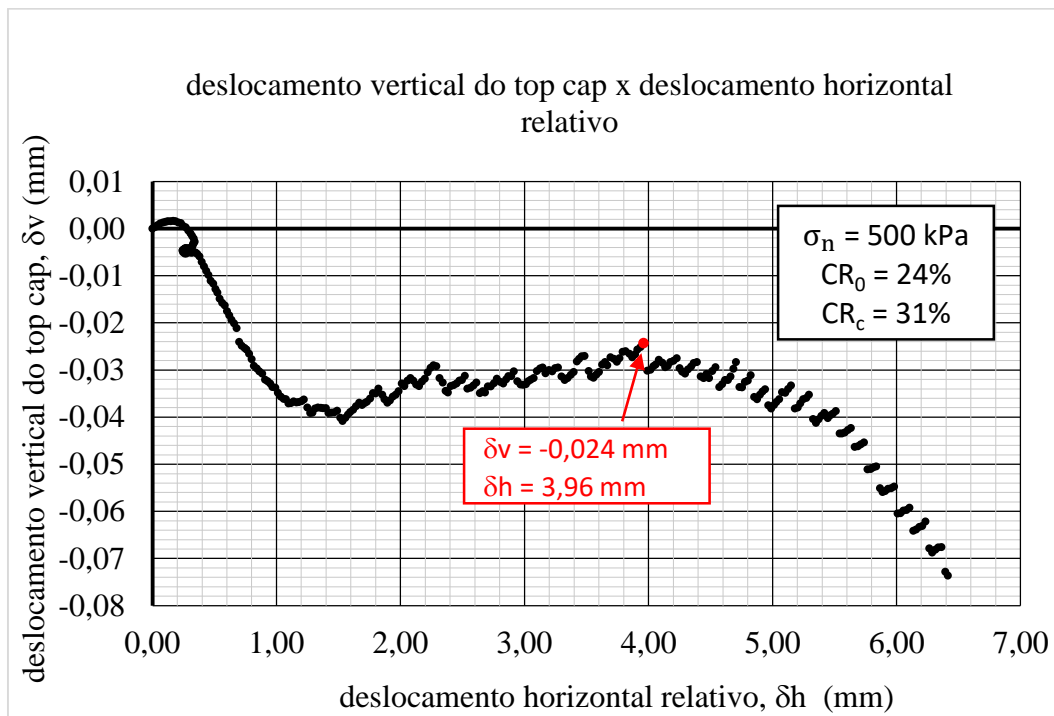
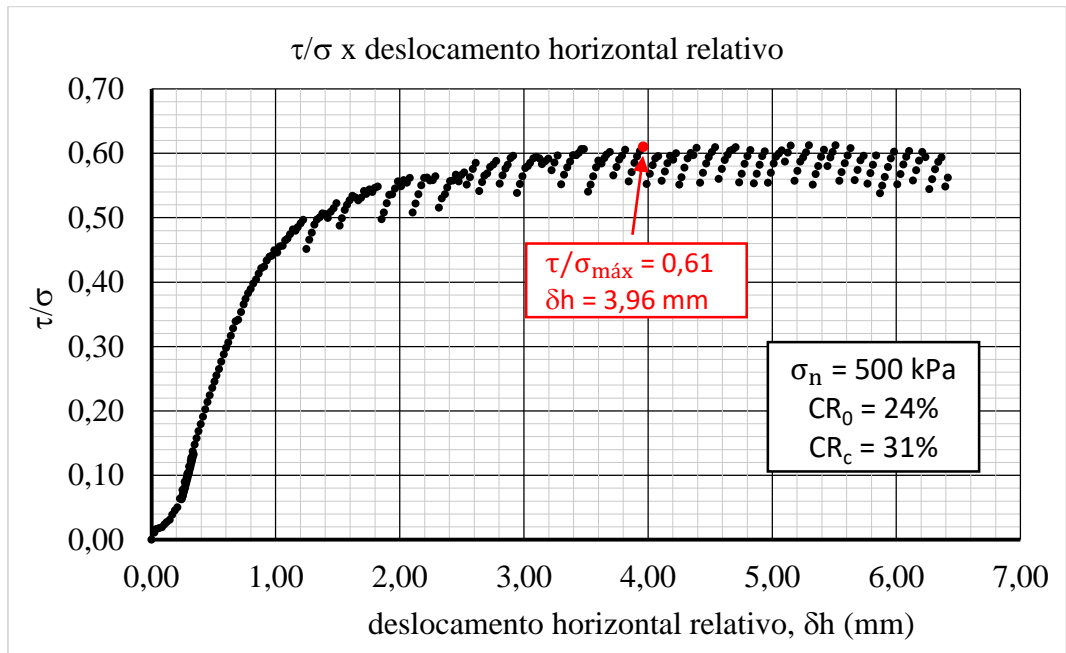


### Ensaio 17: Tensão normal 300 kPa – CR<sub>0</sub> 18%

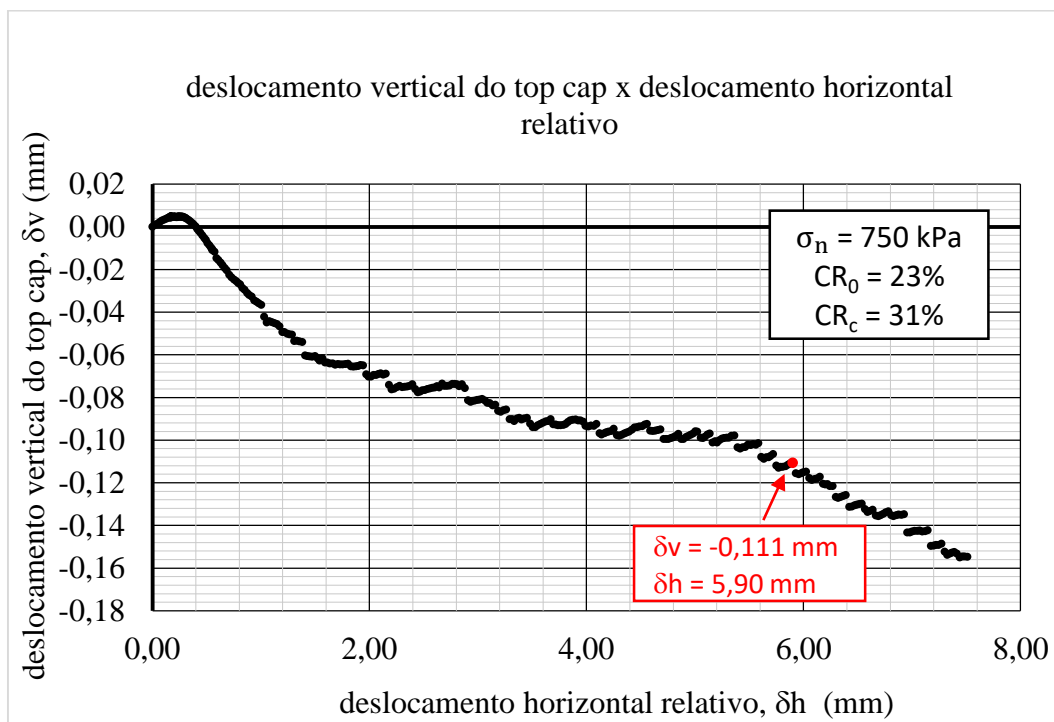
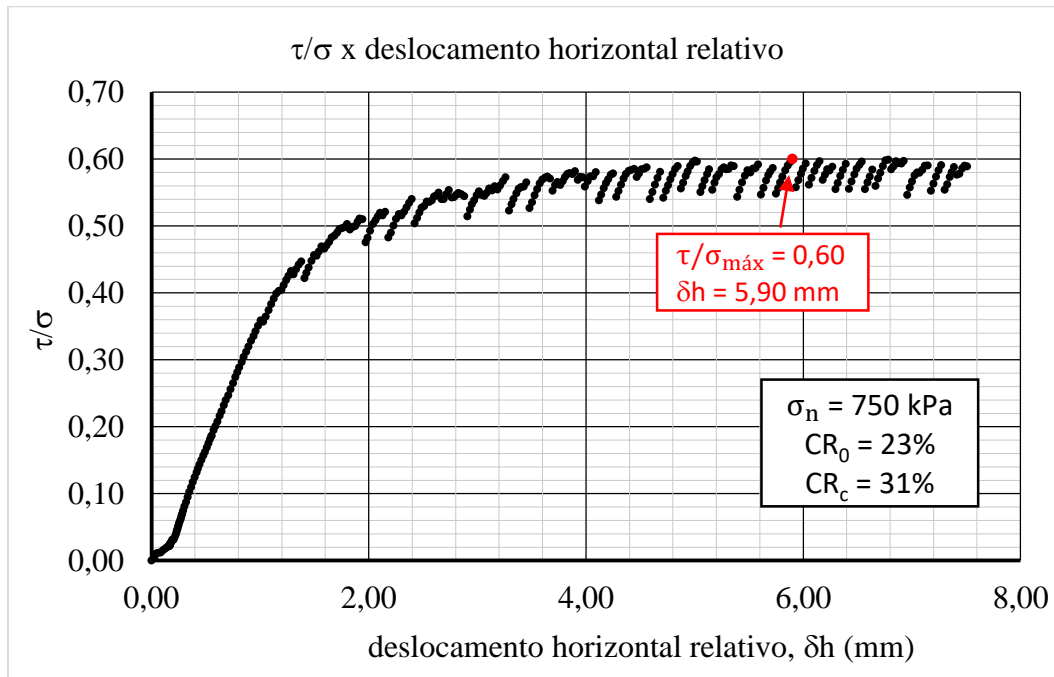




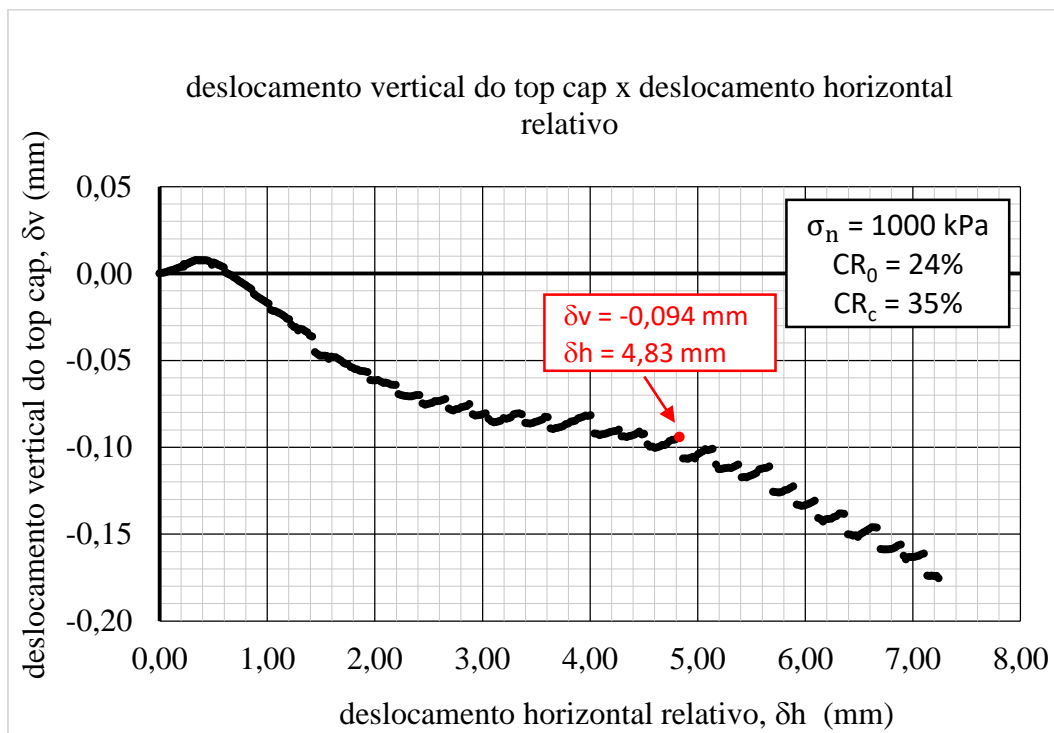
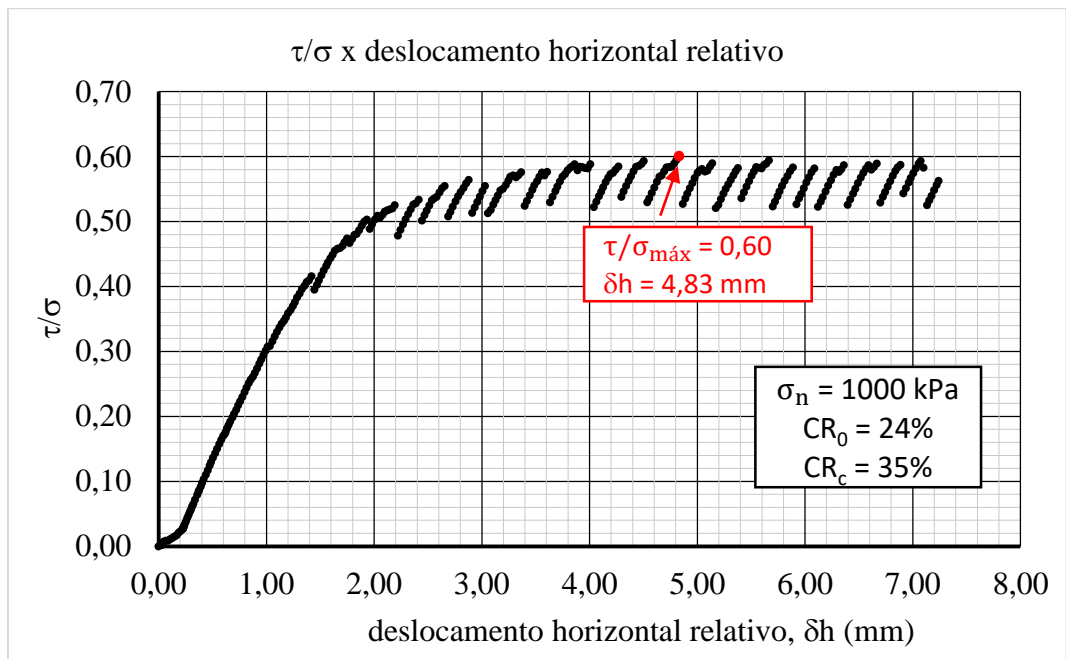
### Ensaio 18: Tensão normal 500 kPa – CR<sub>0</sub> 24%



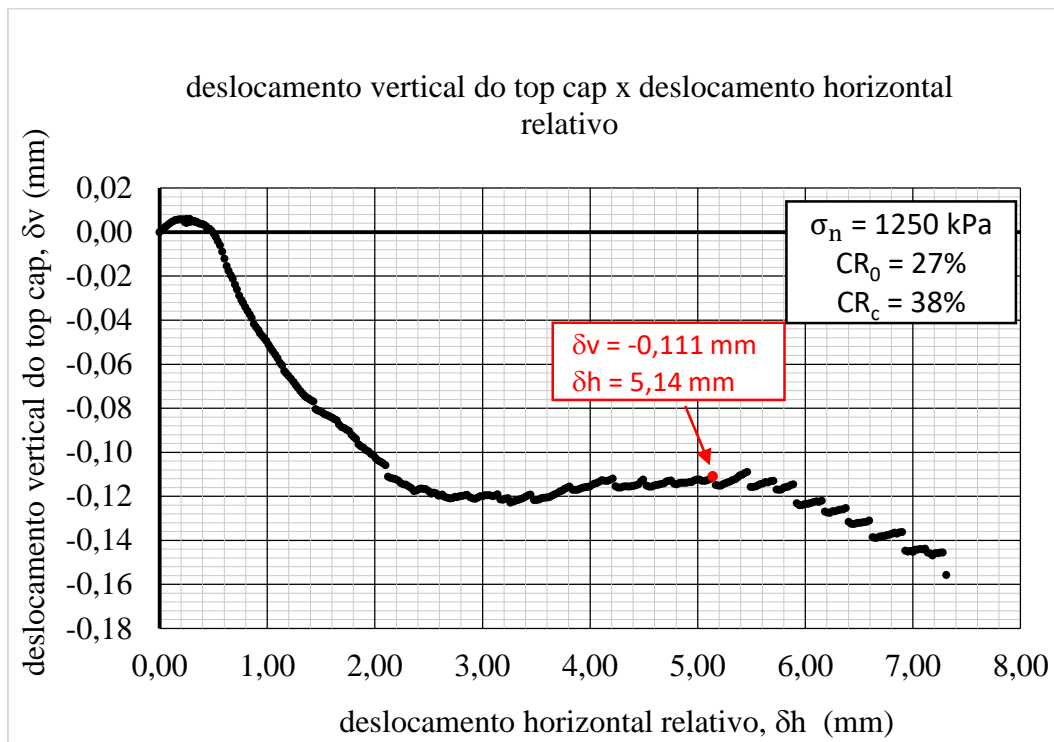
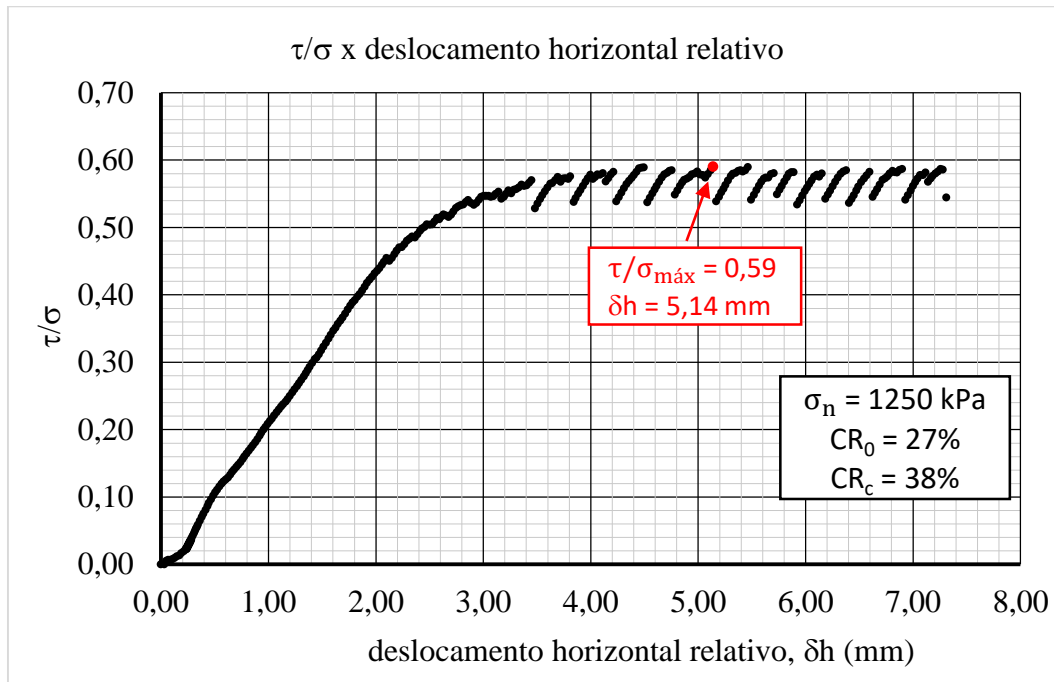
### Ensaio 19: Tensão normal 750 kPa – CR<sub>0</sub> 23%



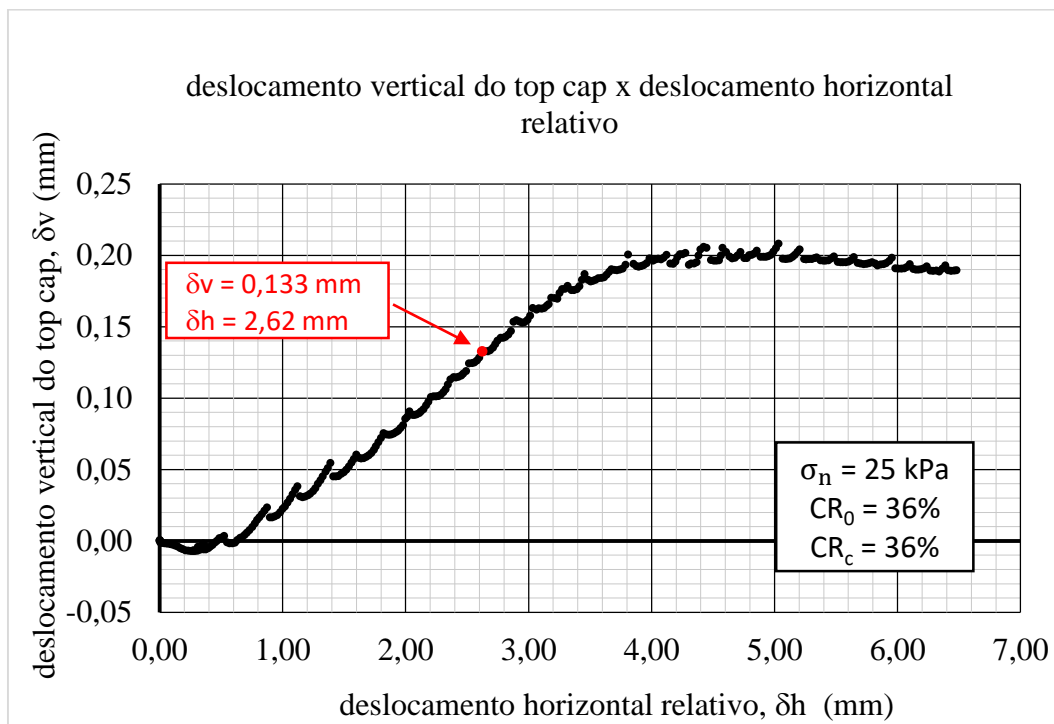
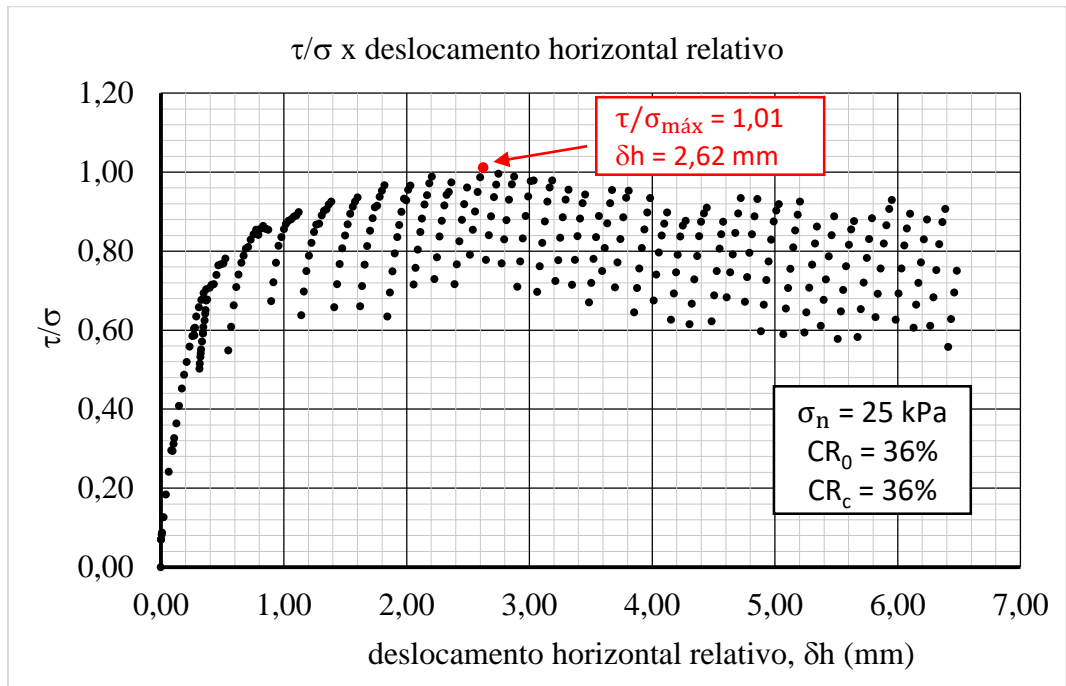
### Ensaio 20: Tensão normal 1000 kPa – CR<sub>0</sub> 24%



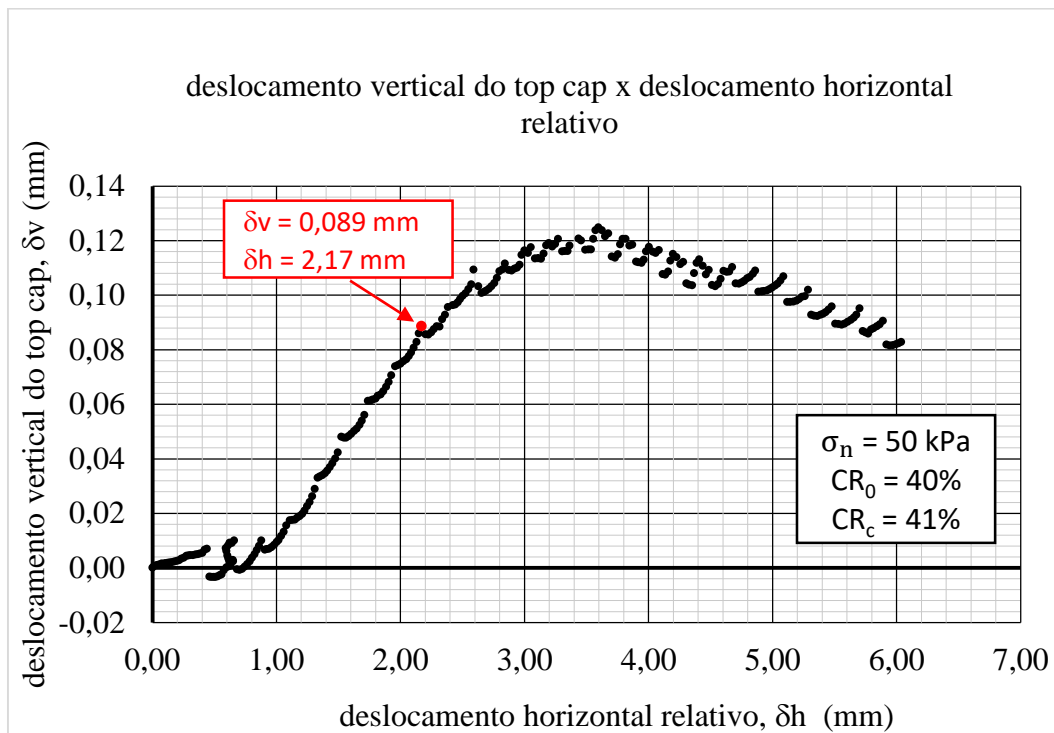
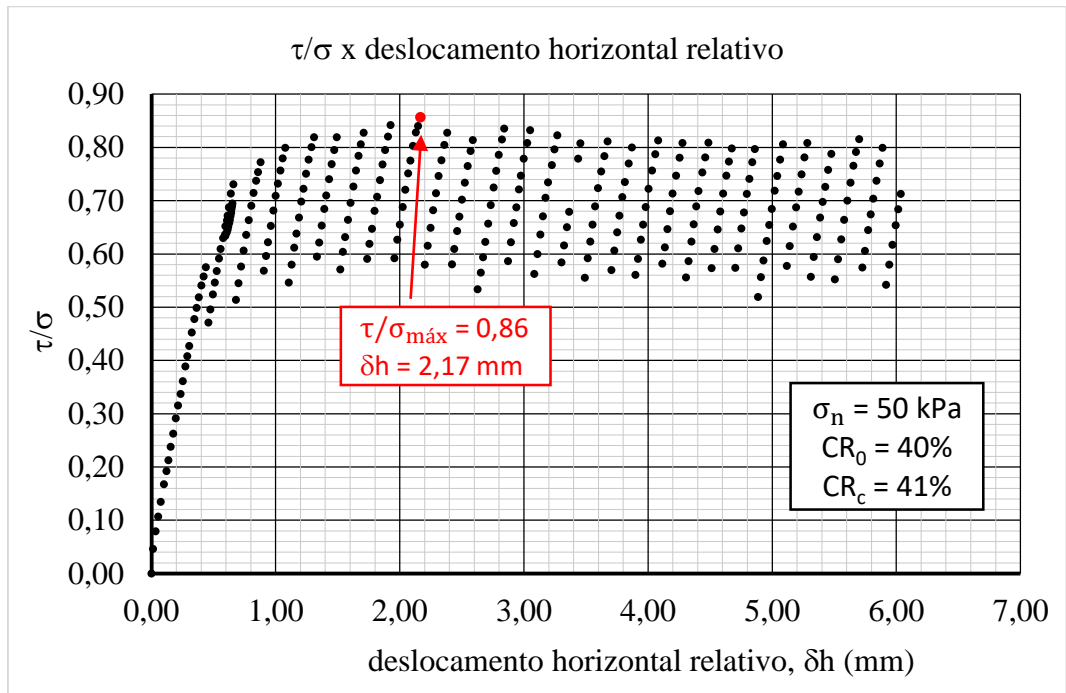
### Ensaio 21: Tensão normal 1250 kPa – CR<sub>0</sub> 27%



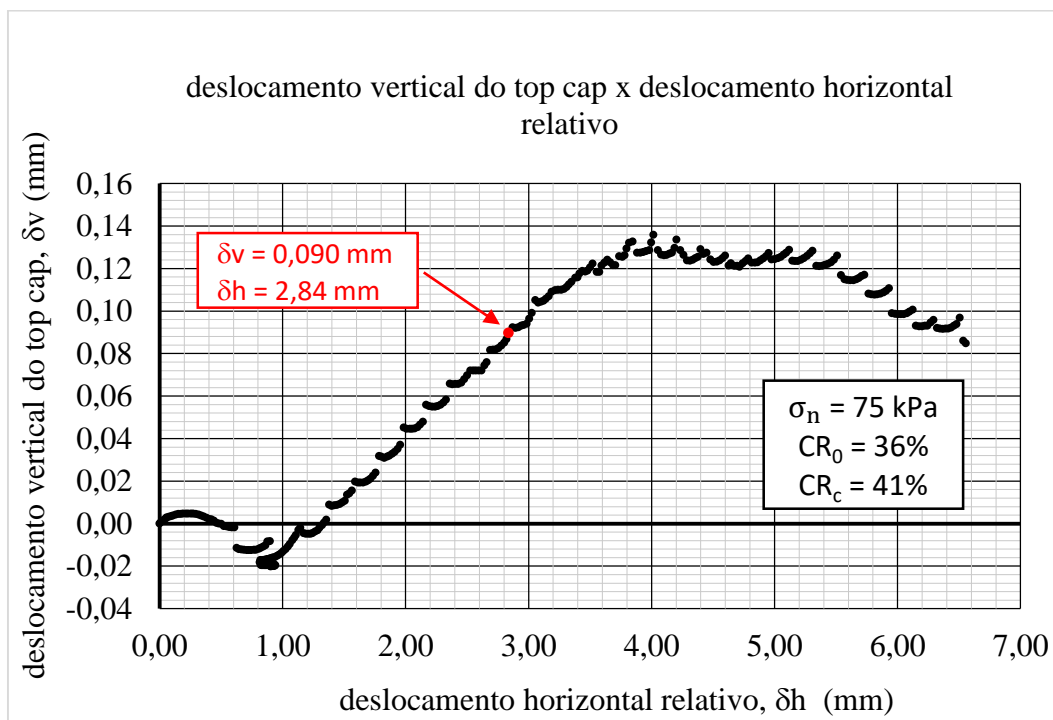
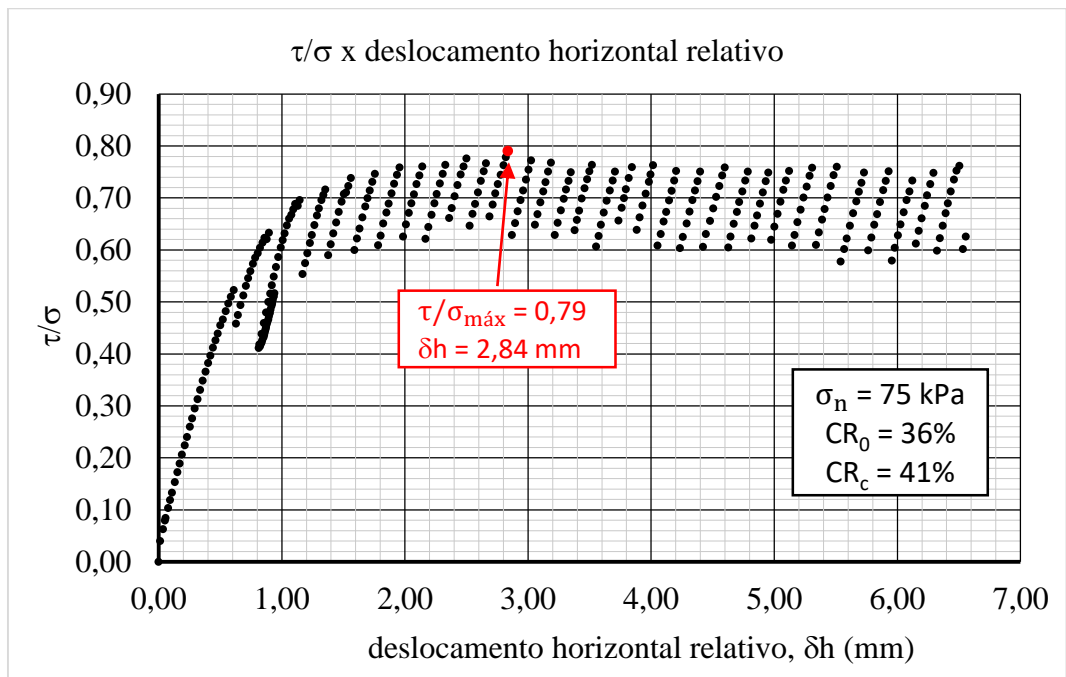
### Ensaio 22: Tensão normal 25 kPa – CR<sub>0</sub> 36%



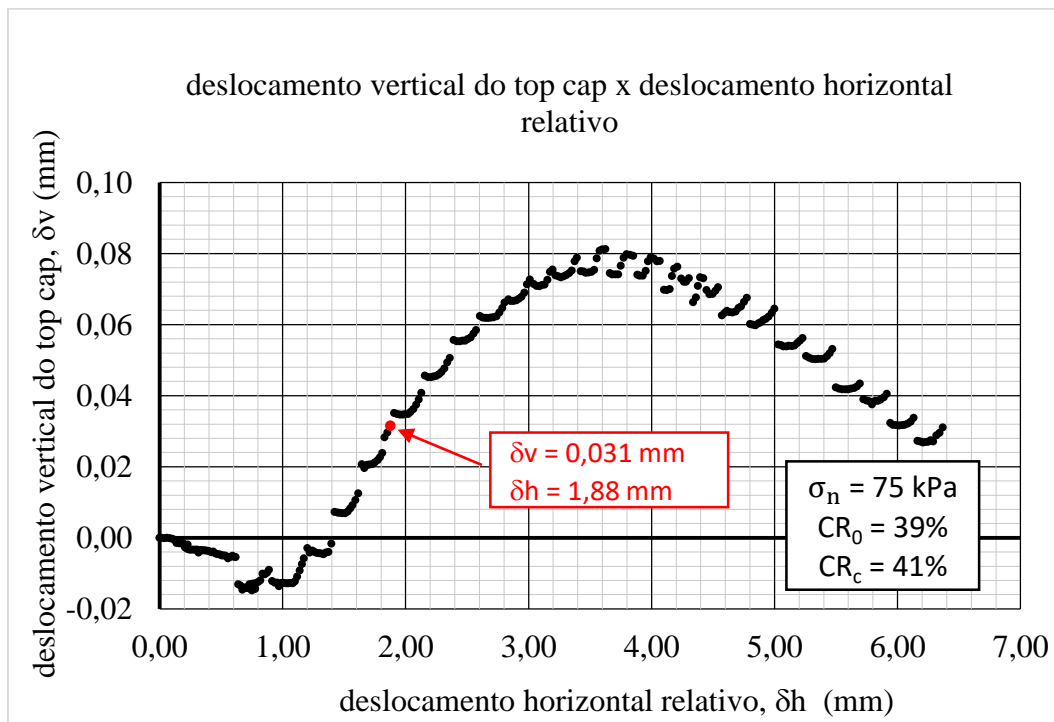
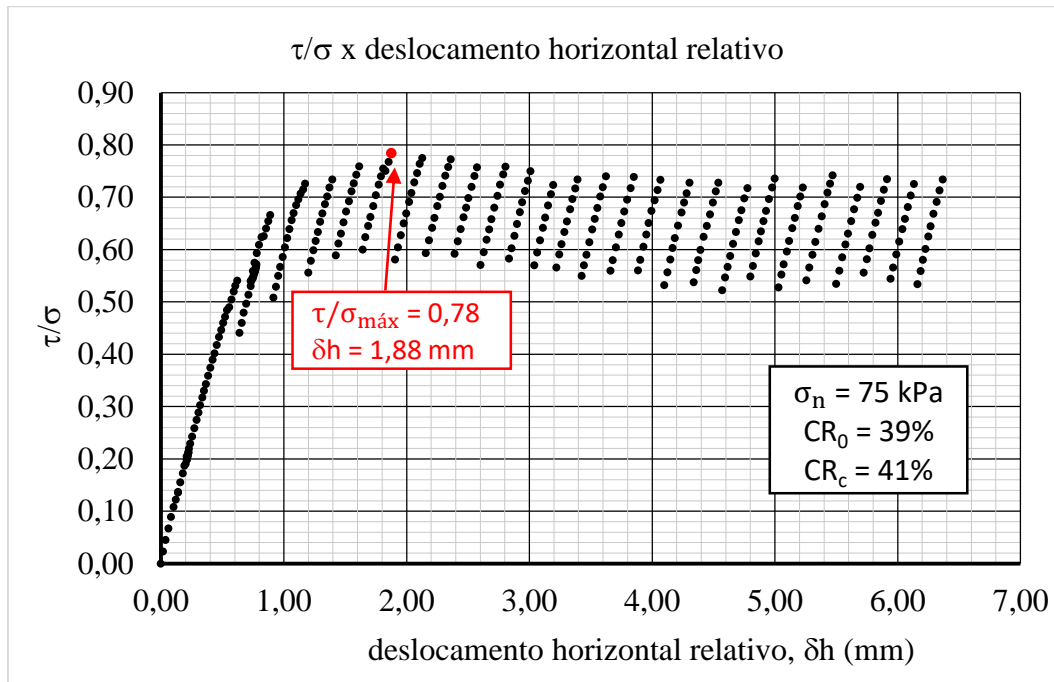
### Ensaio 23: Tensão normal 50 kPa – CR<sub>0</sub> 40%



### Ensaio 24: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 36%

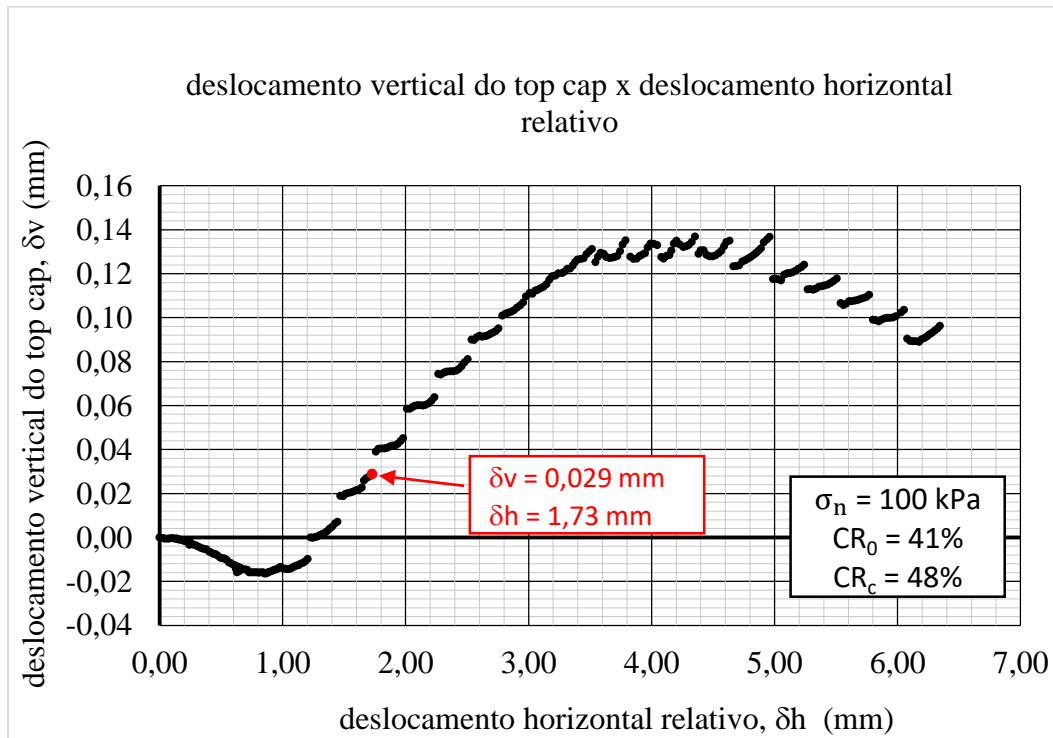
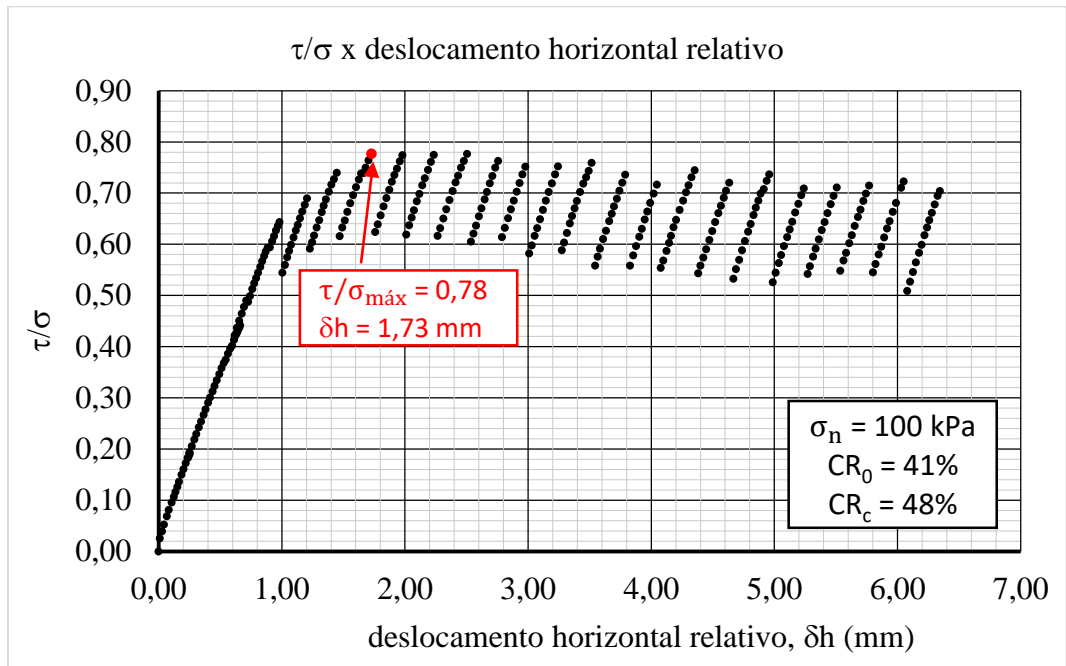


### Ensaio 25: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 39%

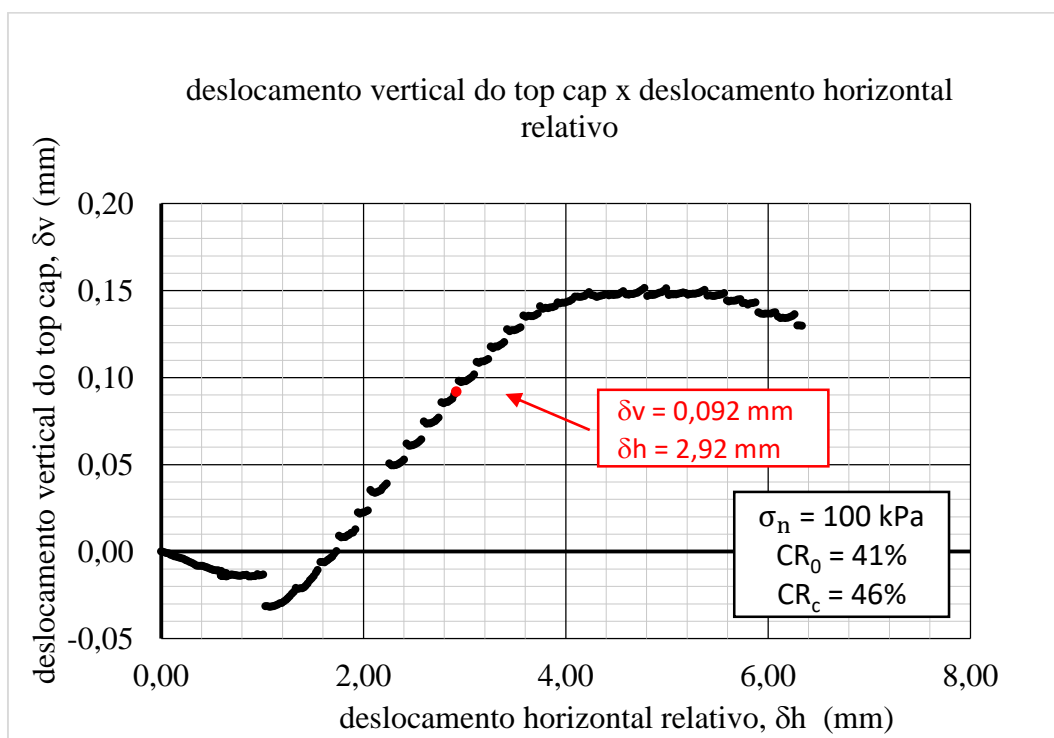
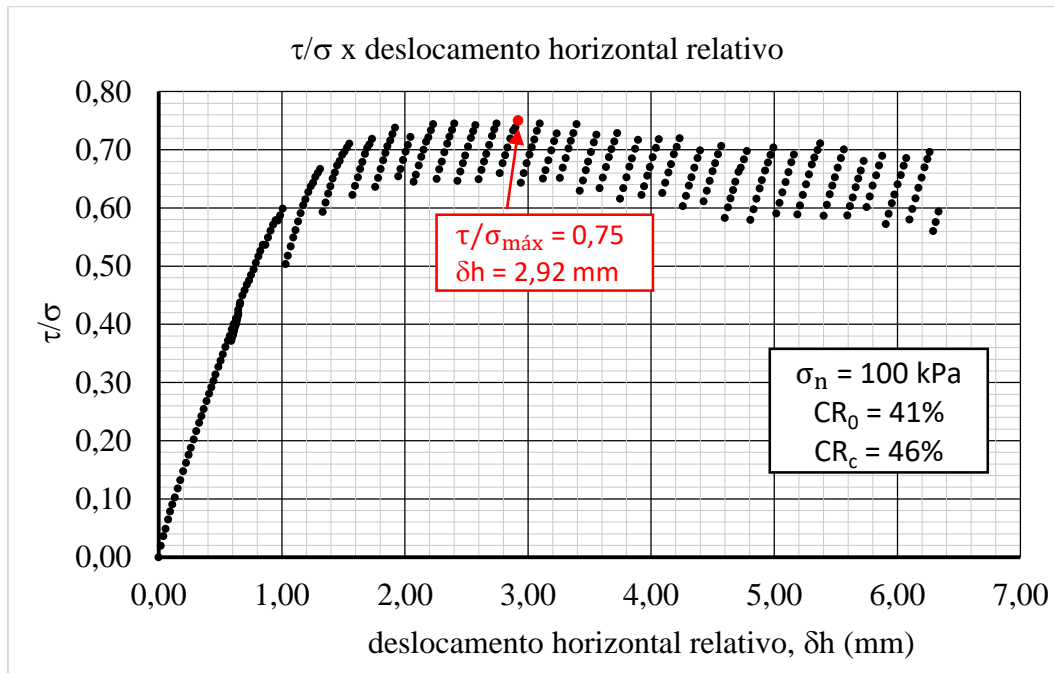




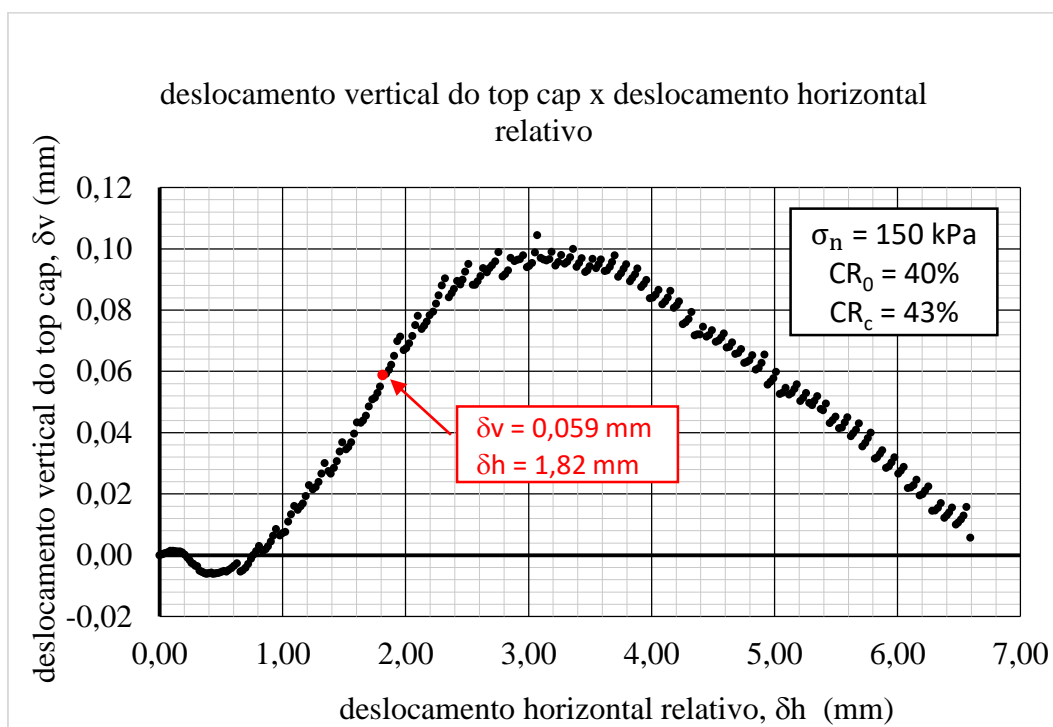
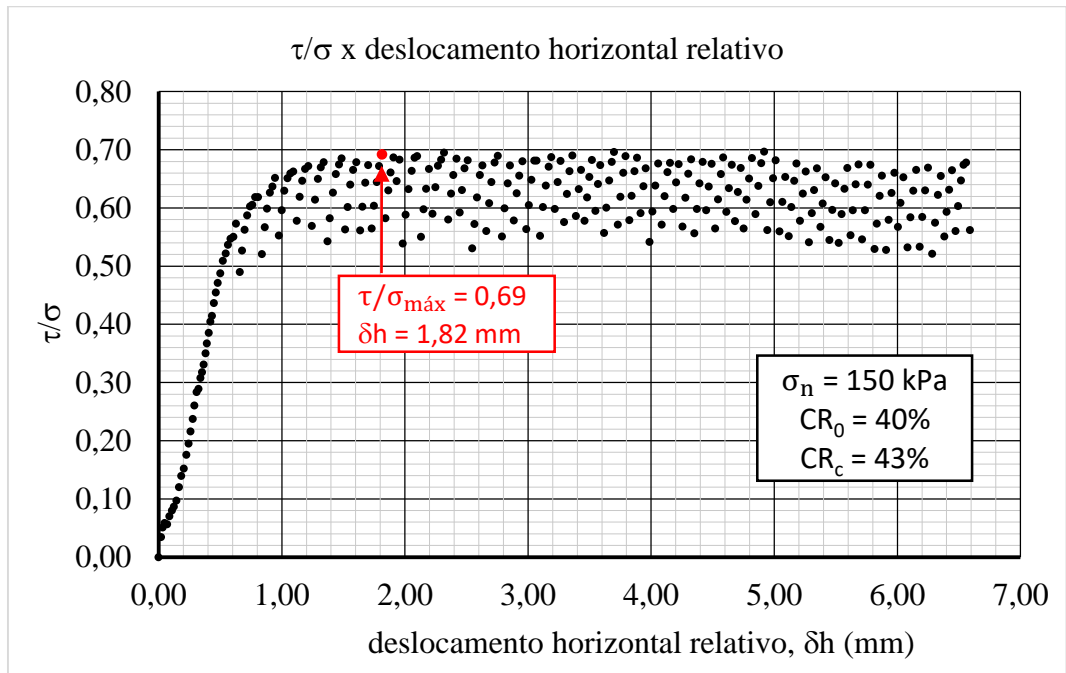
### Ensaio 26: Tensão normal 100 kPa – CR<sub>0</sub> 41%



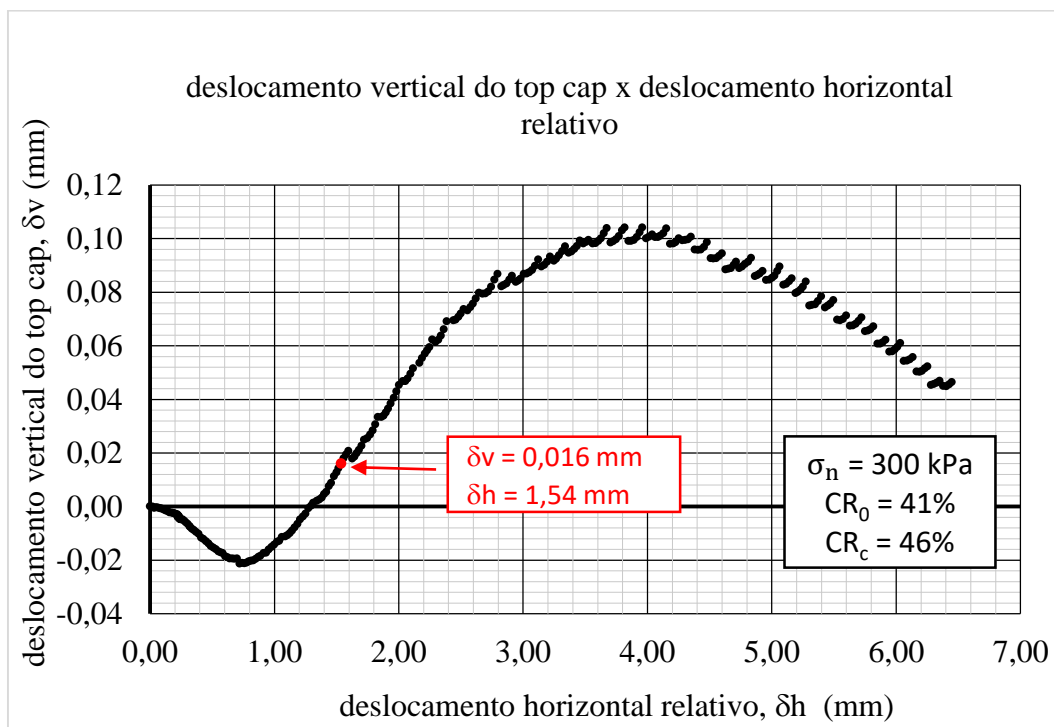
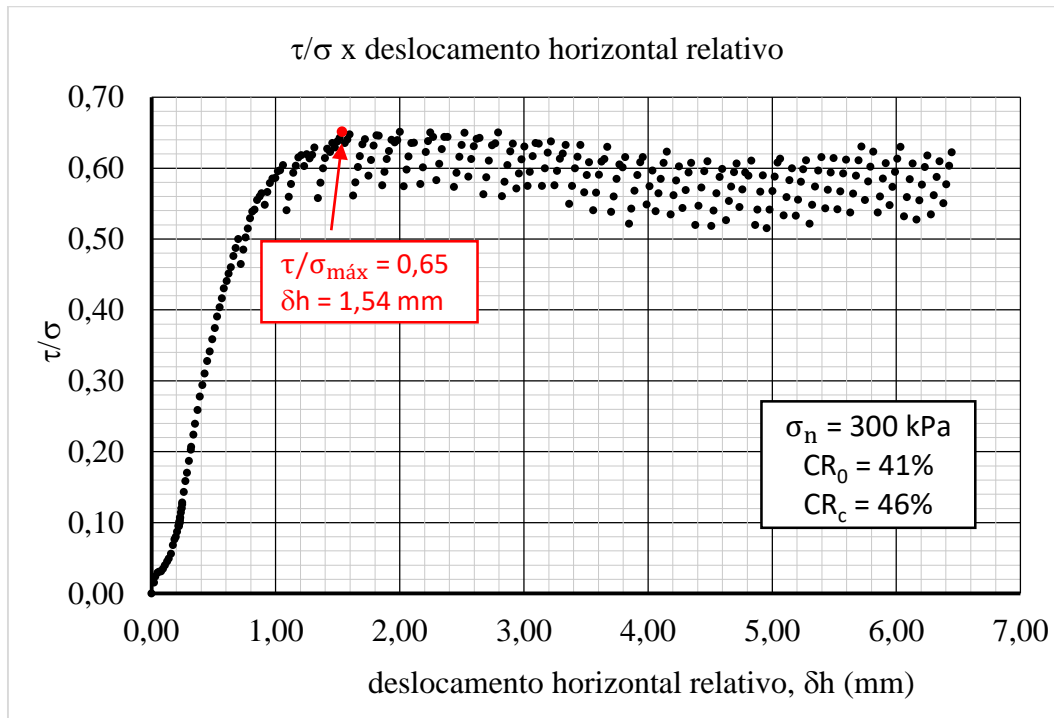
### Ensaio 27: Tensão normal 100 kPa – CR<sub>0</sub> 41%



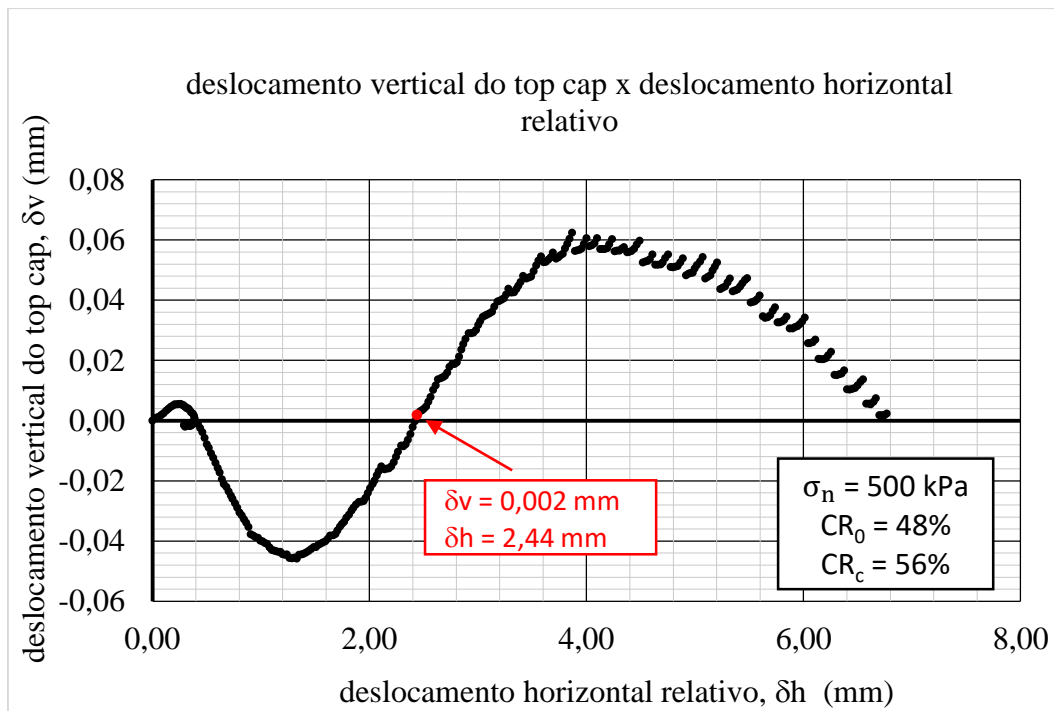
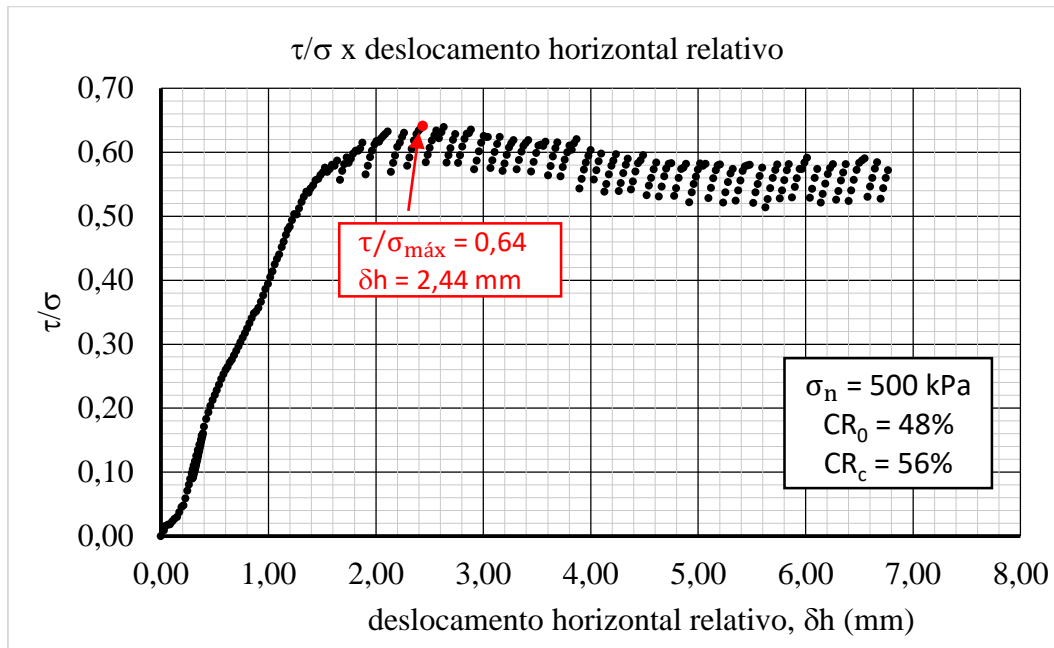
### Ensaio 28: Tensão normal 150 kPa – CR<sub>0</sub> 40%



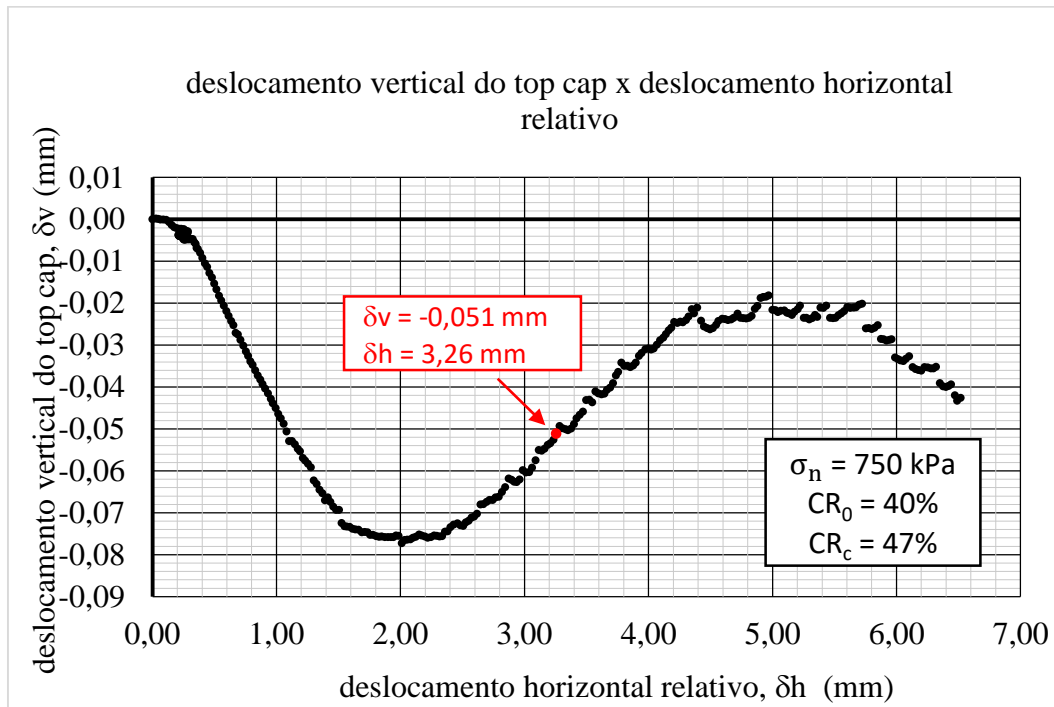
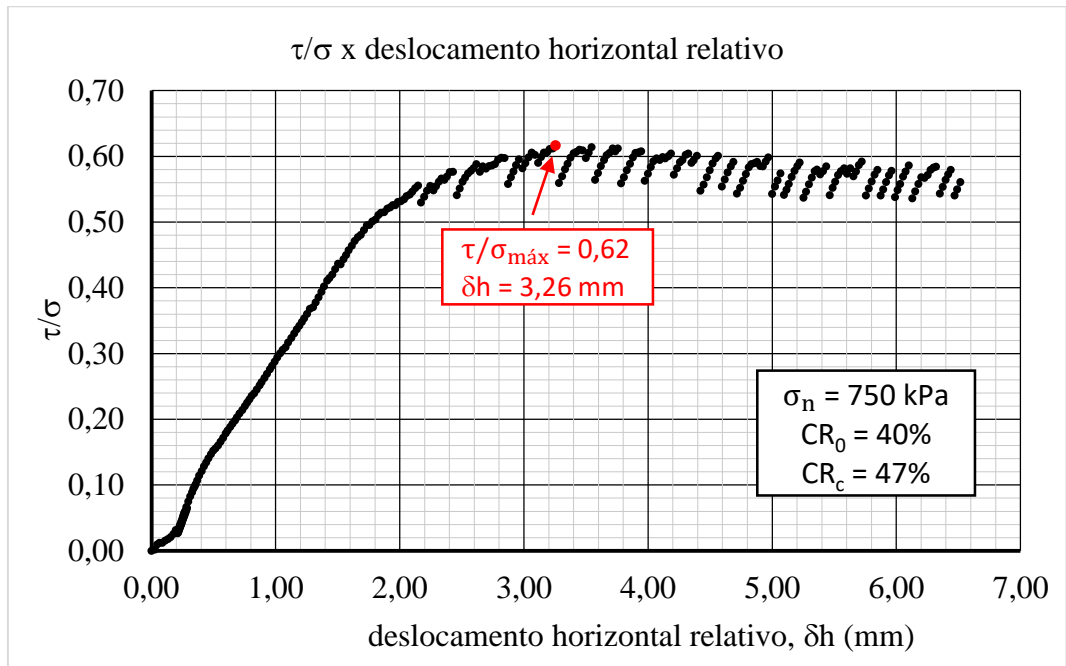
### Ensaio 29: Tensão normal 300 kPa – CR<sub>0</sub> 41%



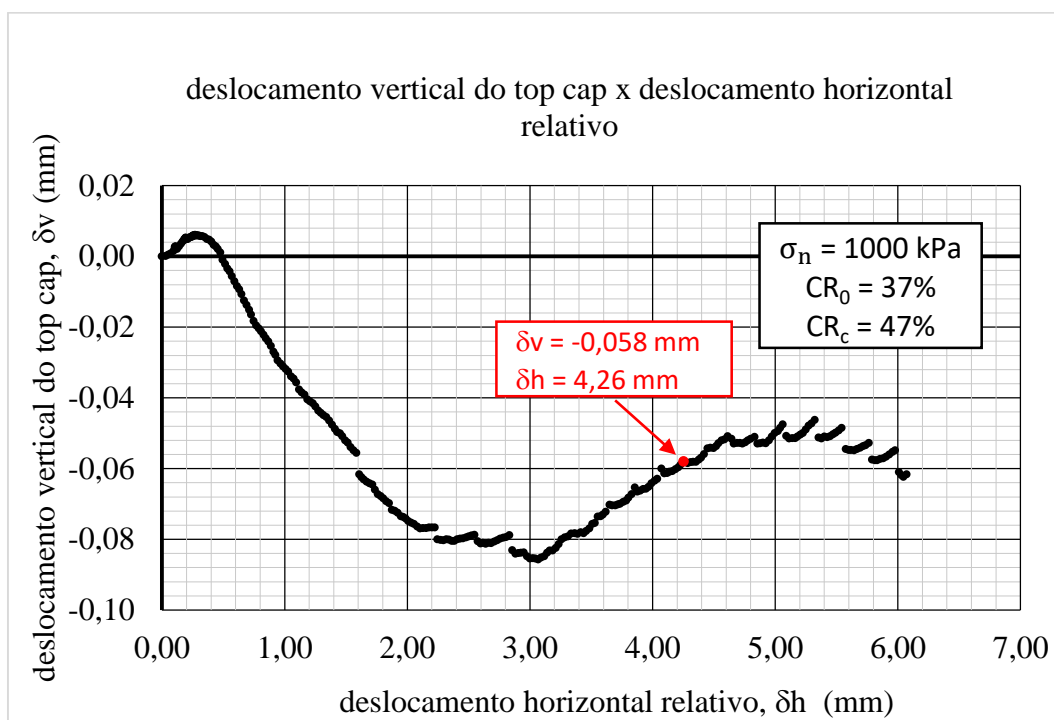
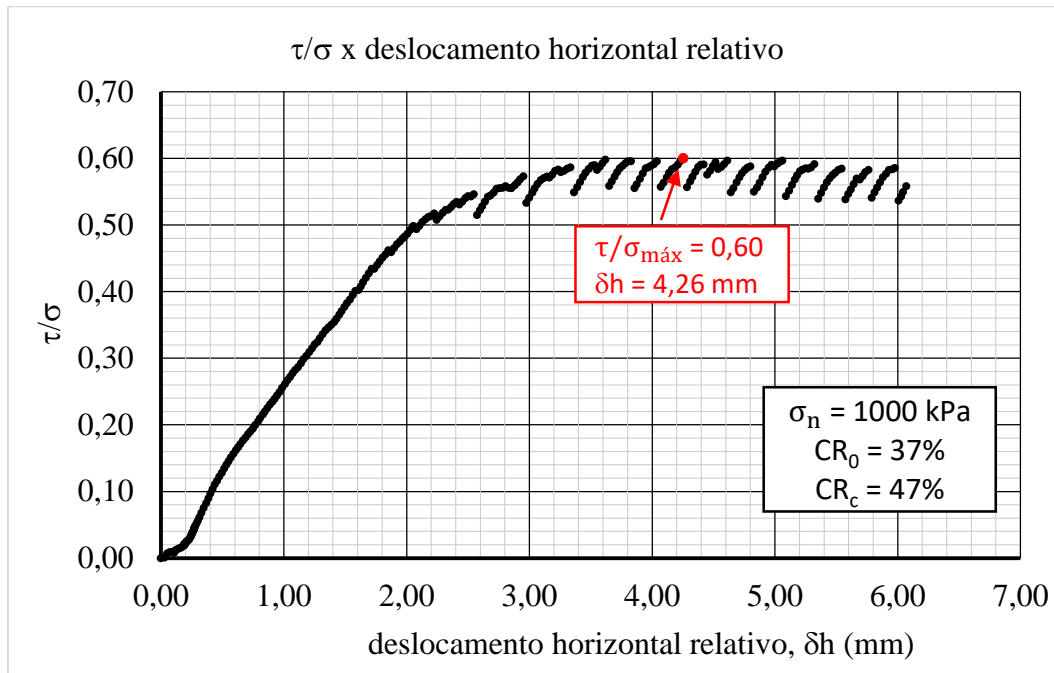
### Ensaio 30: Tensão normal 500 kPa – CR<sub>0</sub> 48%



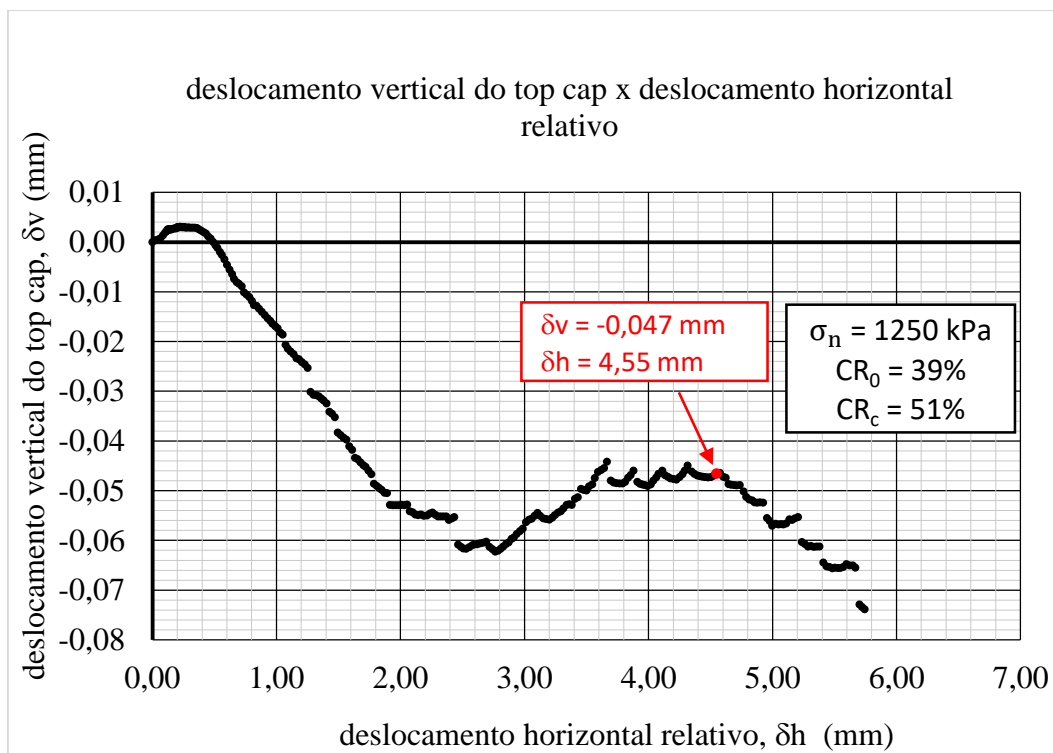
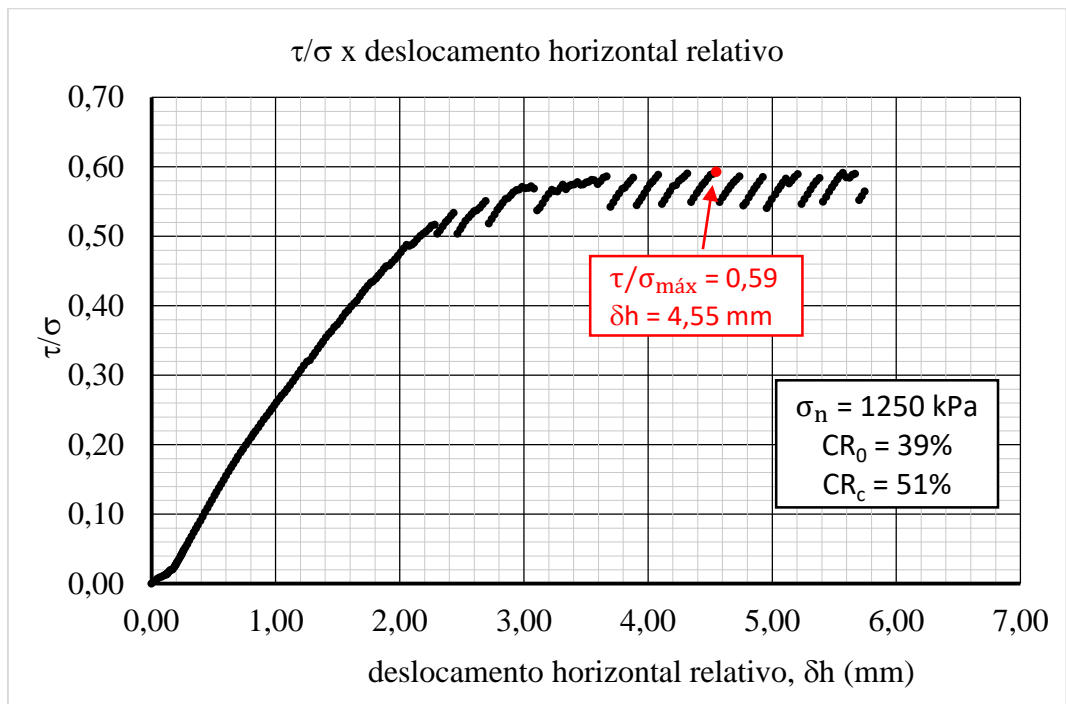
### Ensaio 31: Tensão normal 750 kPa – CR<sub>0</sub> 40%



### Ensaio 32: Tensão normal 1000 kPa – CR<sub>0</sub> 37%

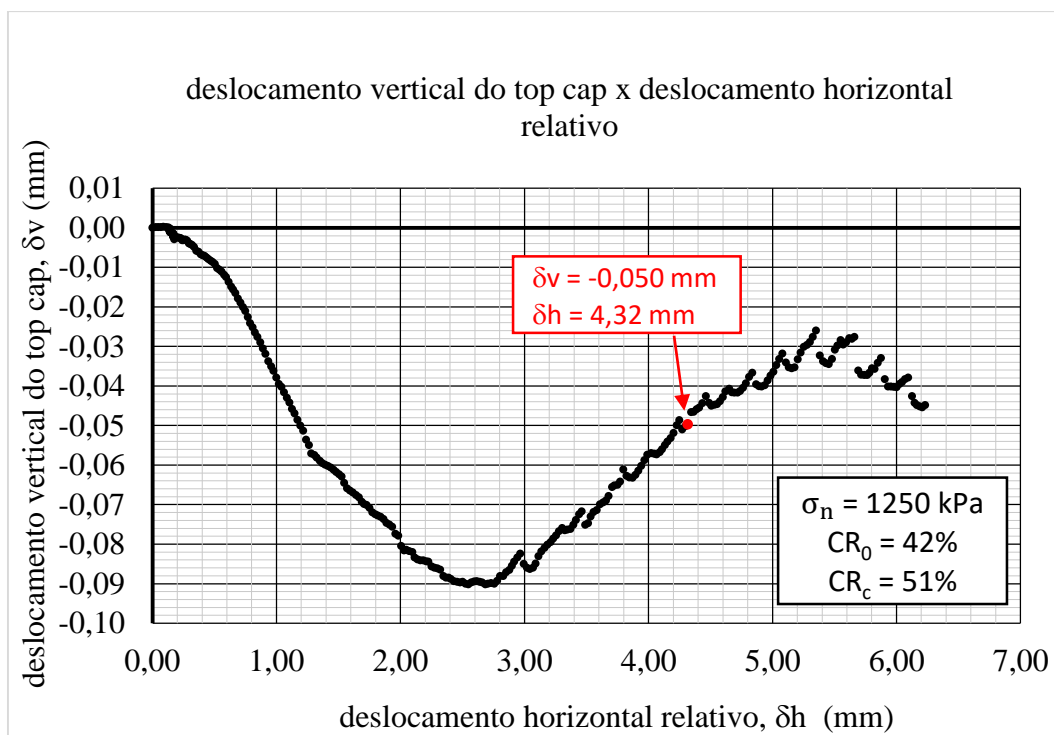
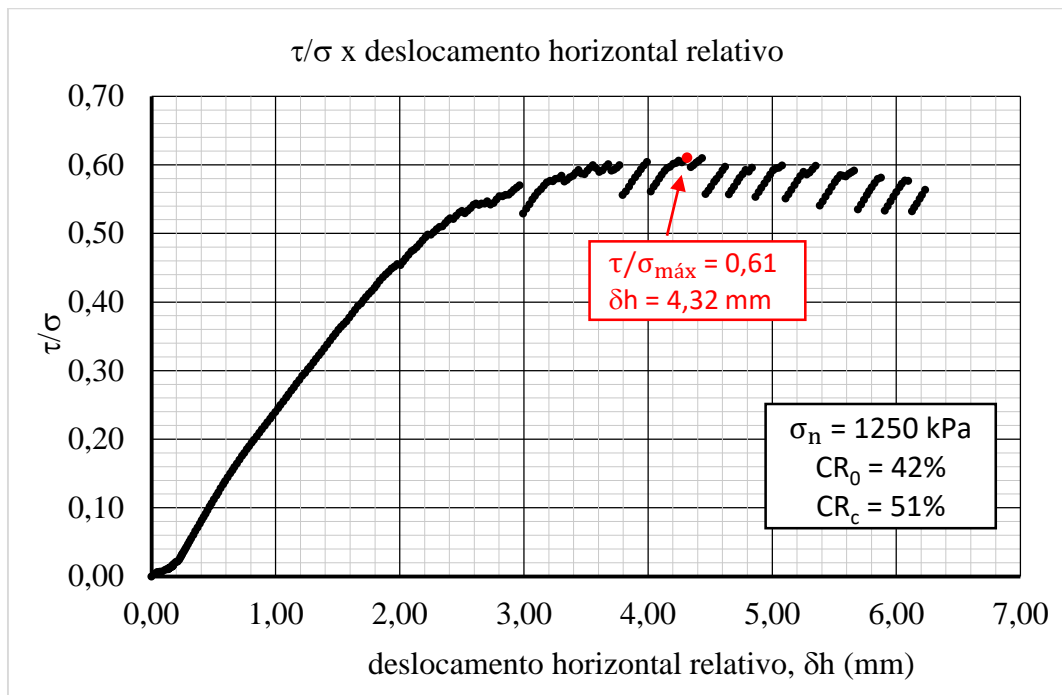


### Ensaio 33: Tensão normal 1250 kPa – CR<sub>0</sub> 39%

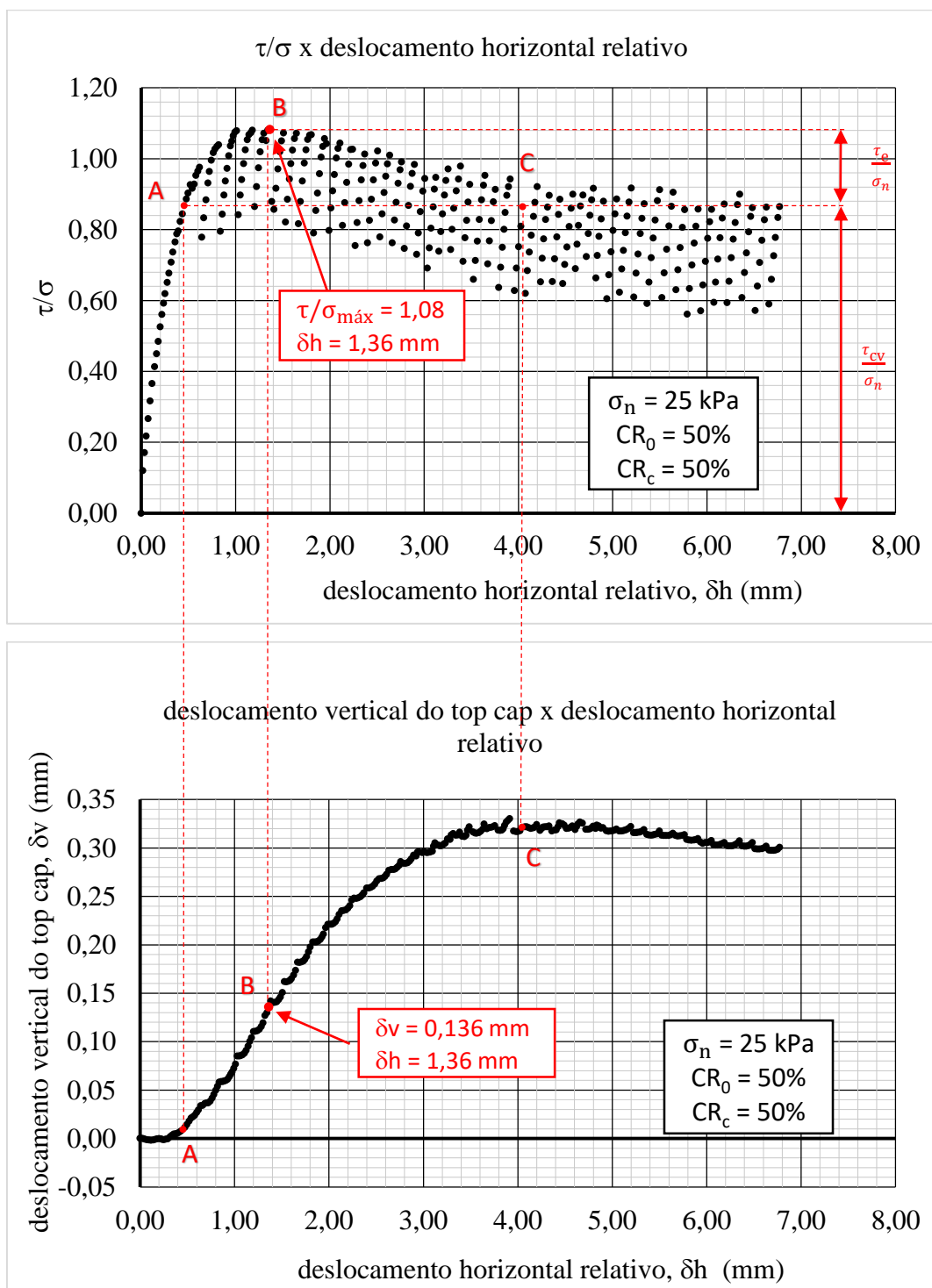




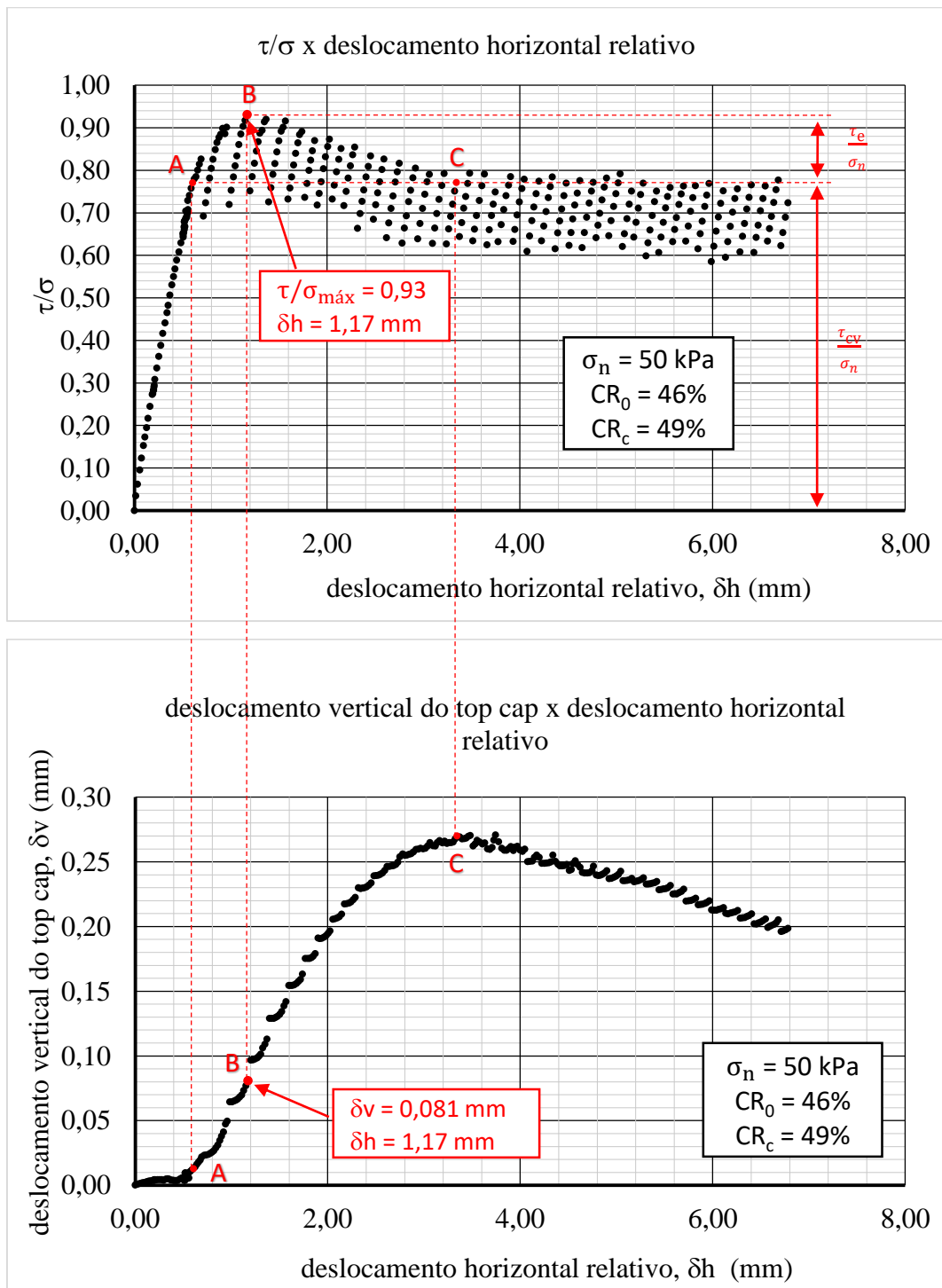
### Ensaio 34: Tensão normal 1250 kPa – CR<sub>0</sub> 42%



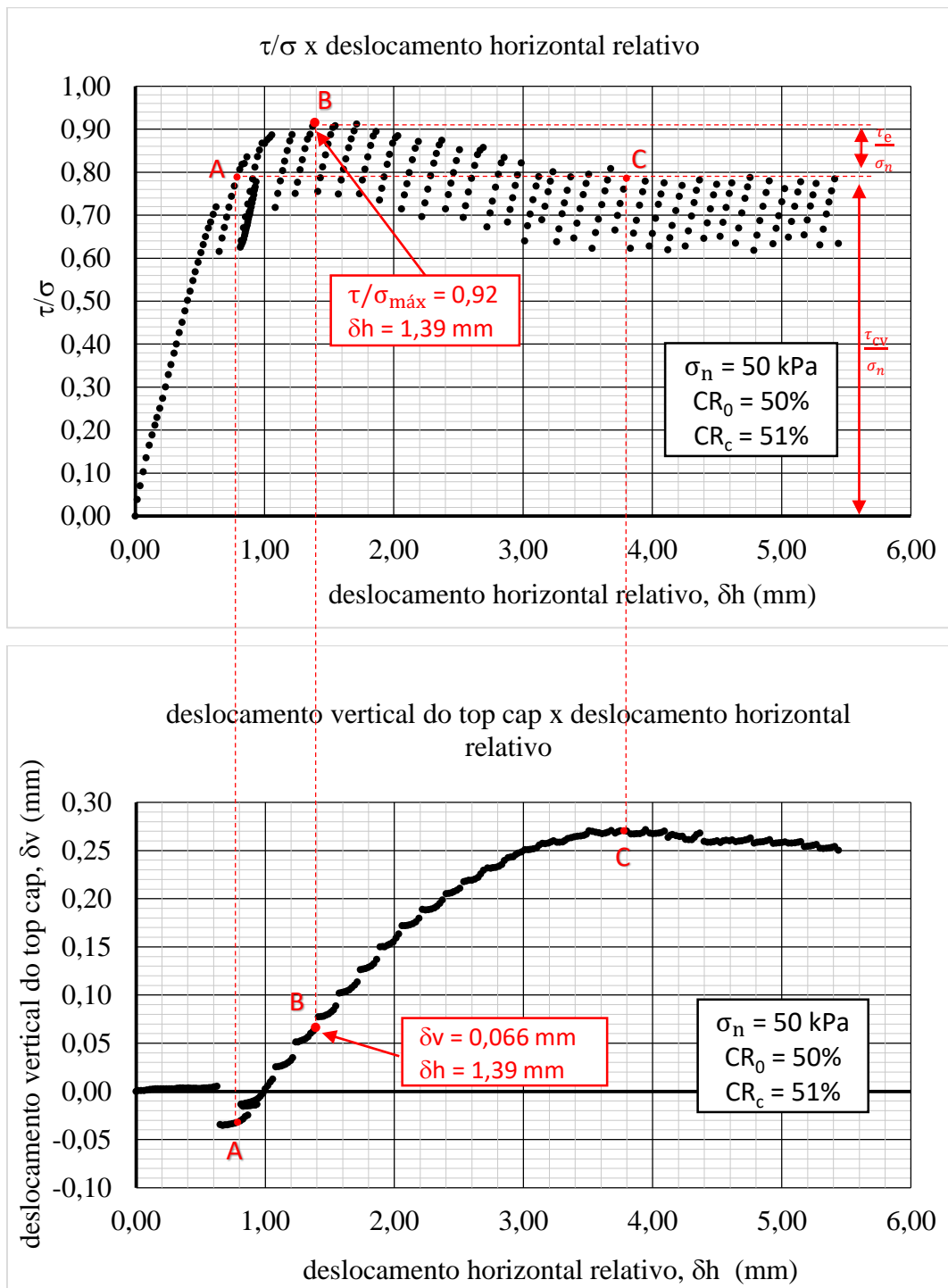
### Ensaio 35: Tensão normal 25 kPa – CR<sub>0</sub> 50%



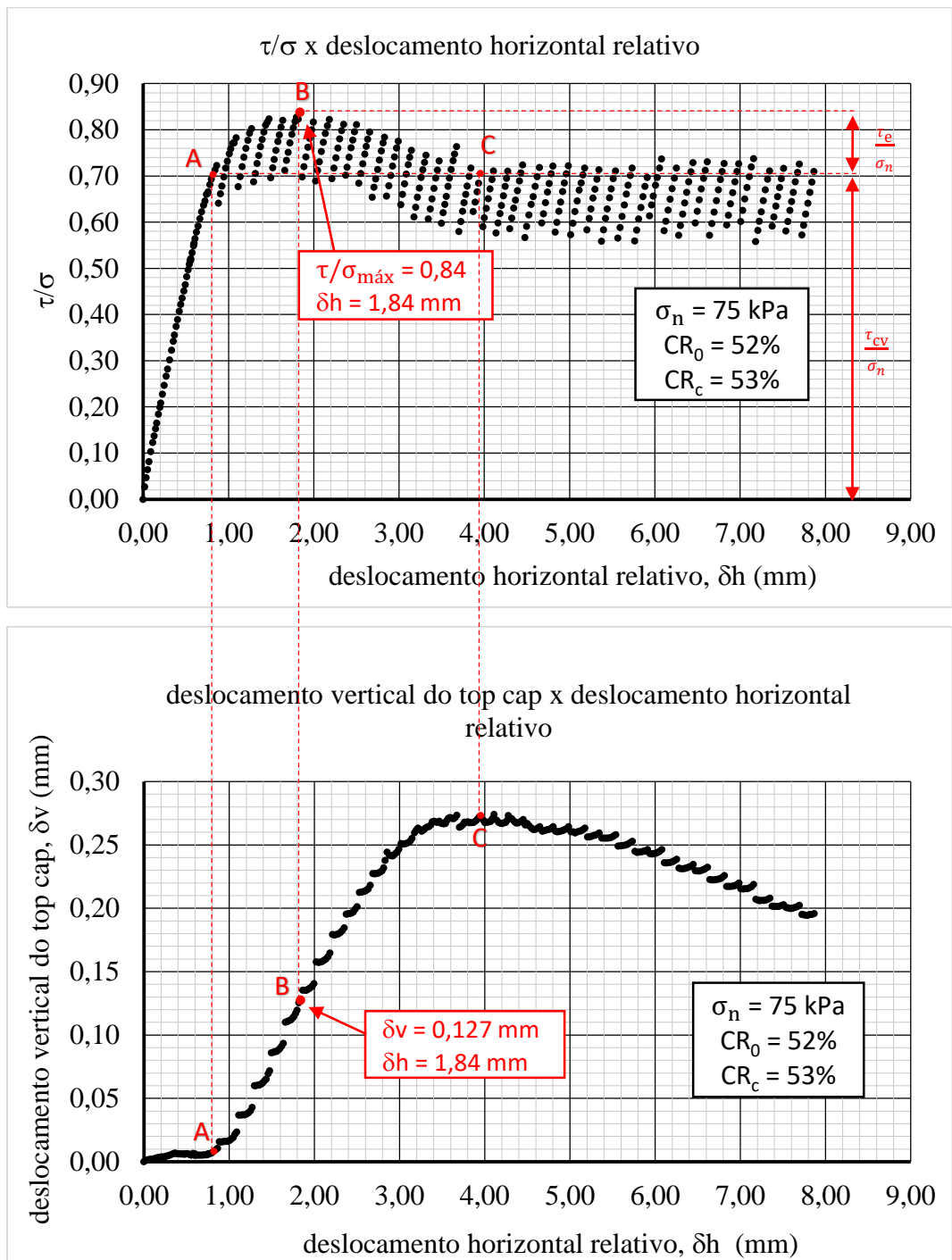
### Ensaio 36: Tensão normal 50 kPa – CR<sub>0</sub> 46%



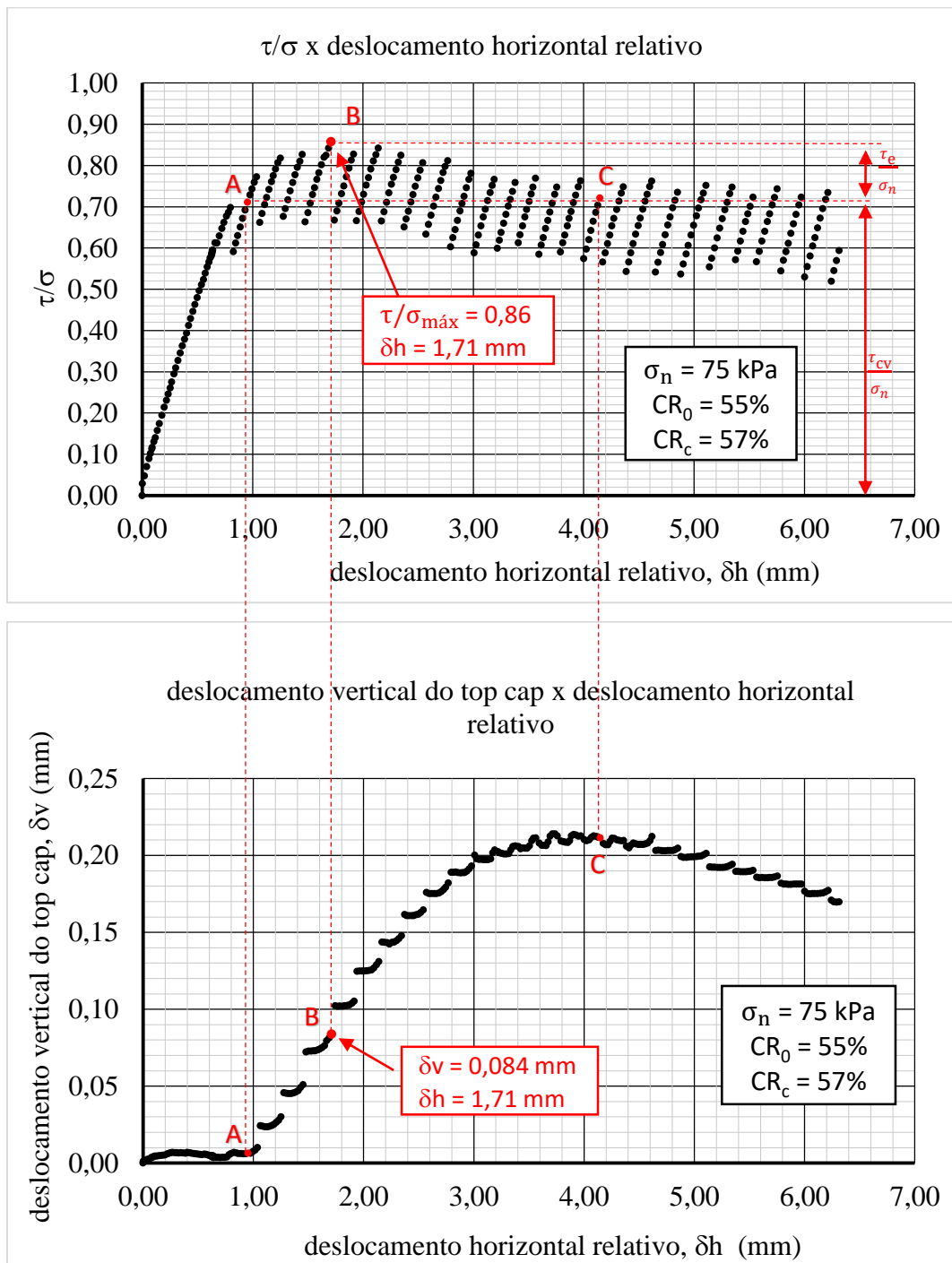
### Ensaio 37: Tensão normal 50 kPa – CR<sub>0</sub> 50%



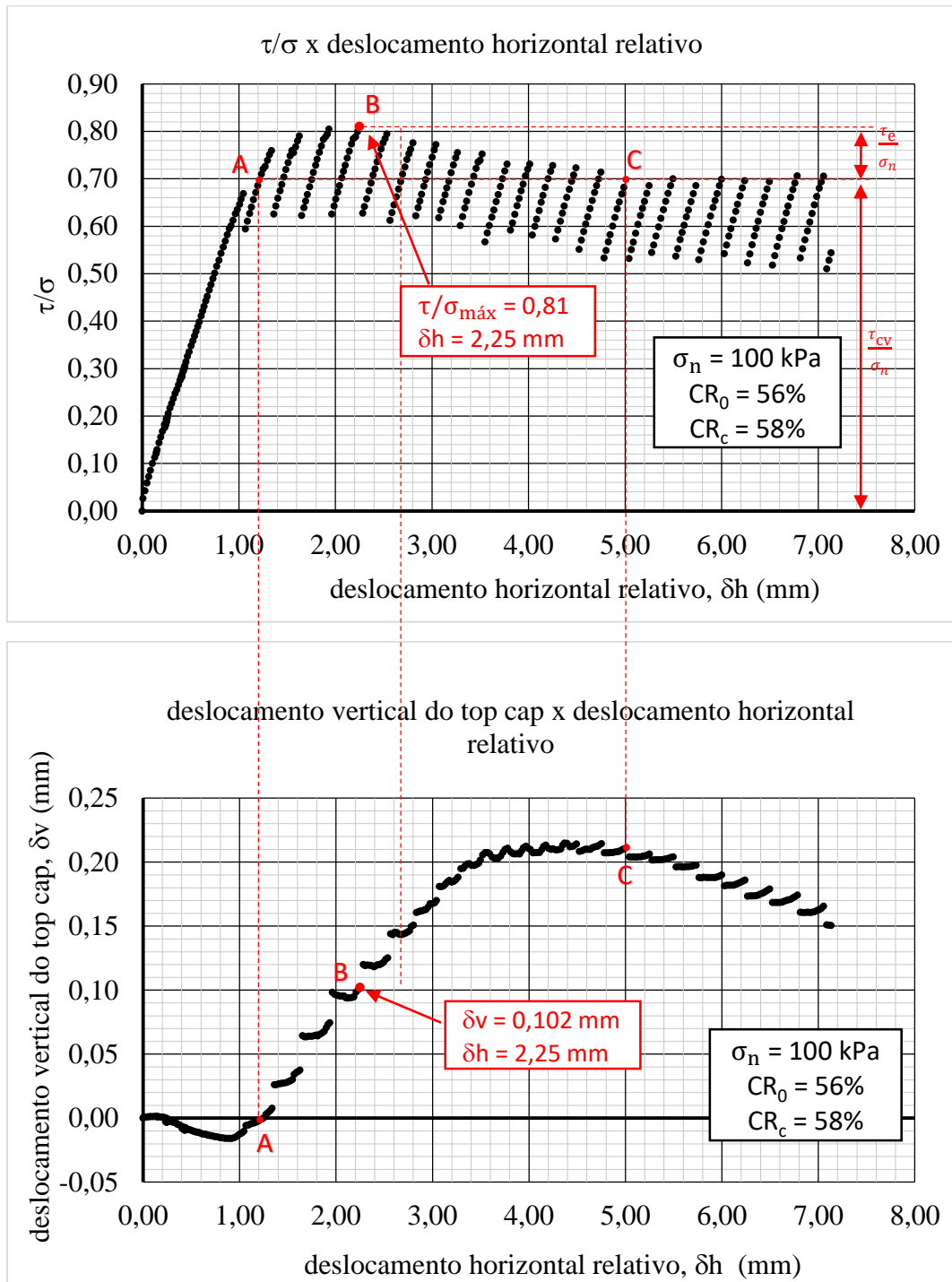
### Ensaio 38: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 52%



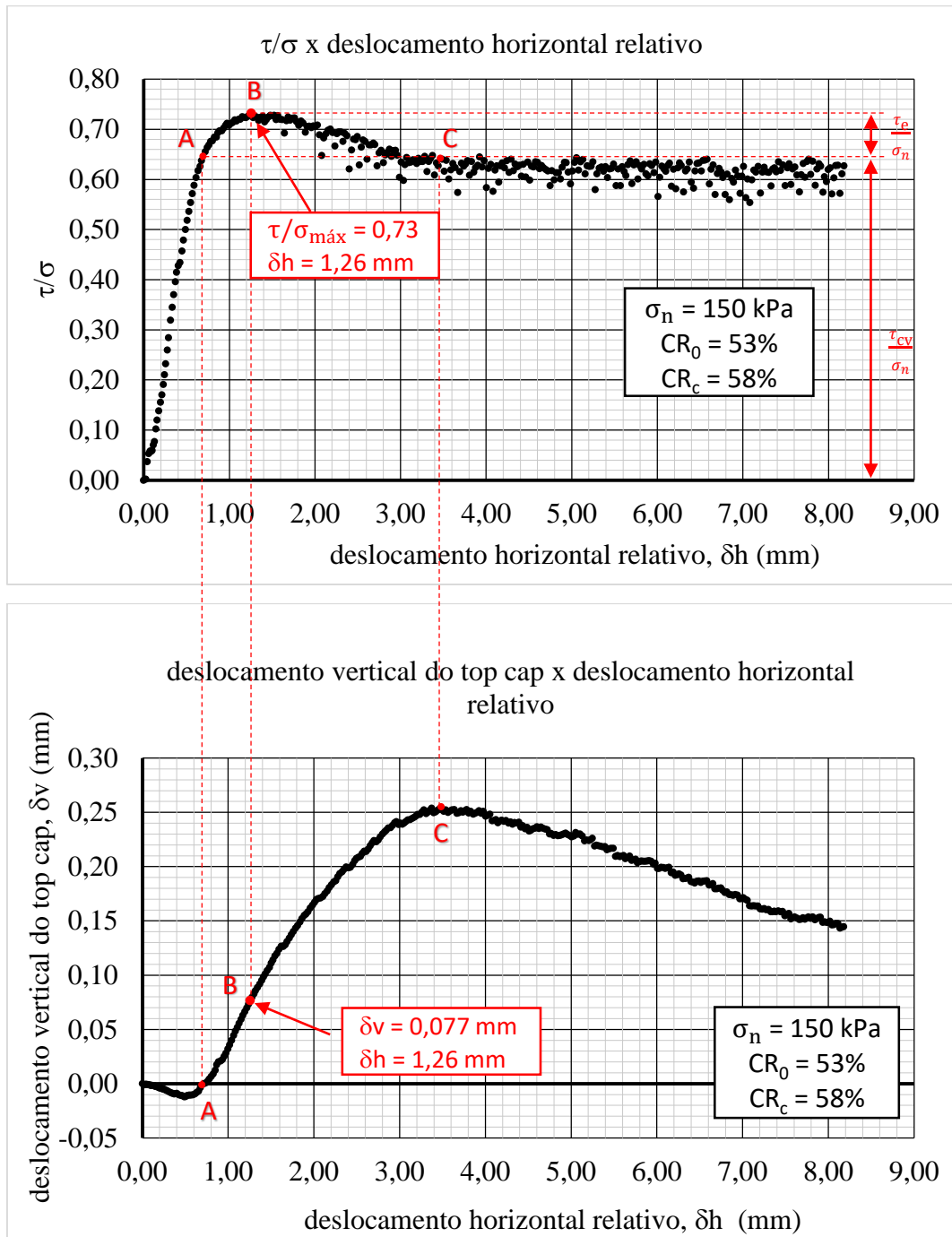
### Ensaio 39: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 55%



### Ensaio 40: Tensão normal 100 kPa – CR<sub>0</sub> 56%

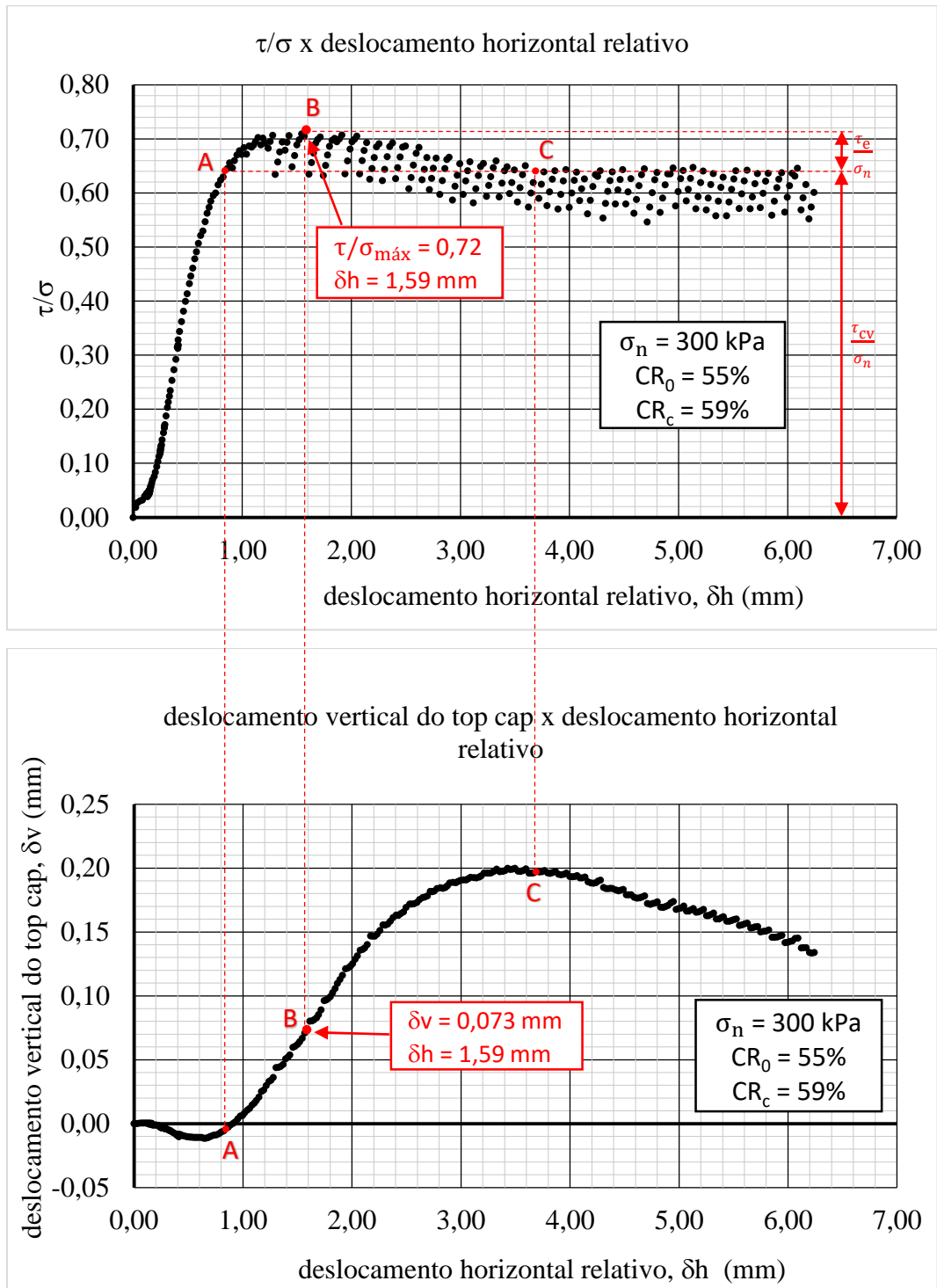


### Ensaio 41: Tensão normal 150 kPa – CR<sub>0</sub> 53%

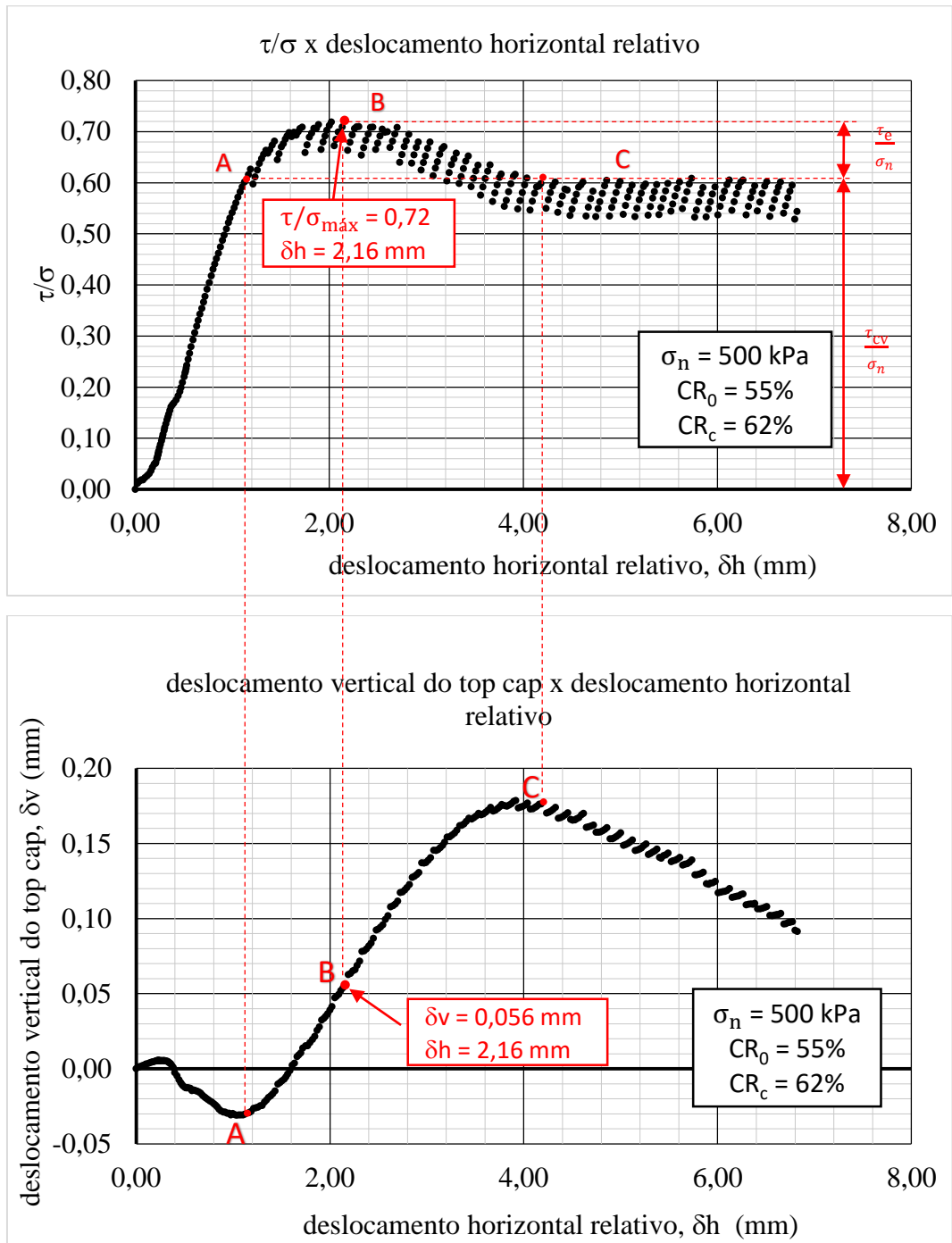




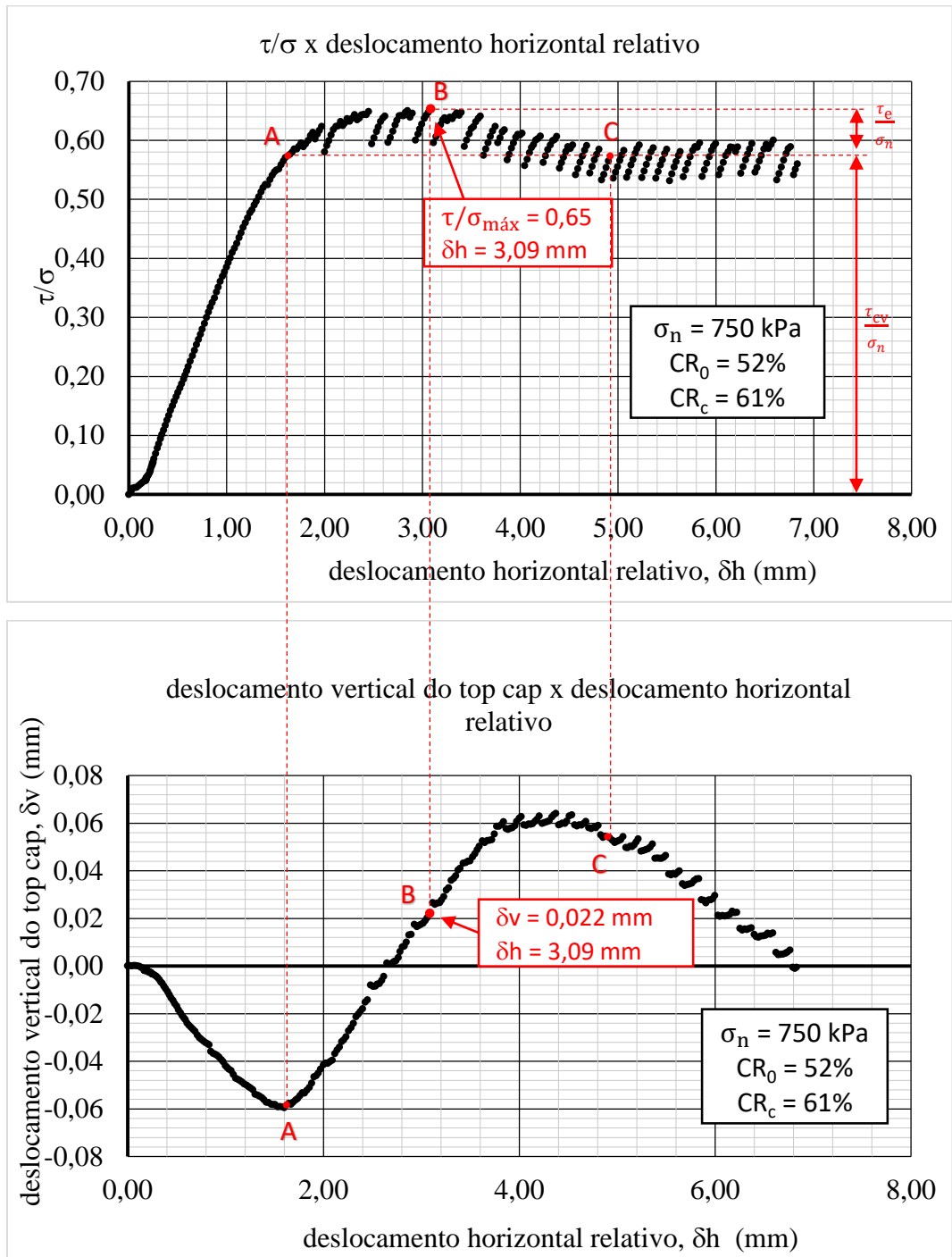
### Ensaio 42: Tensão normal 300 kPa – CR<sub>0</sub> 55%



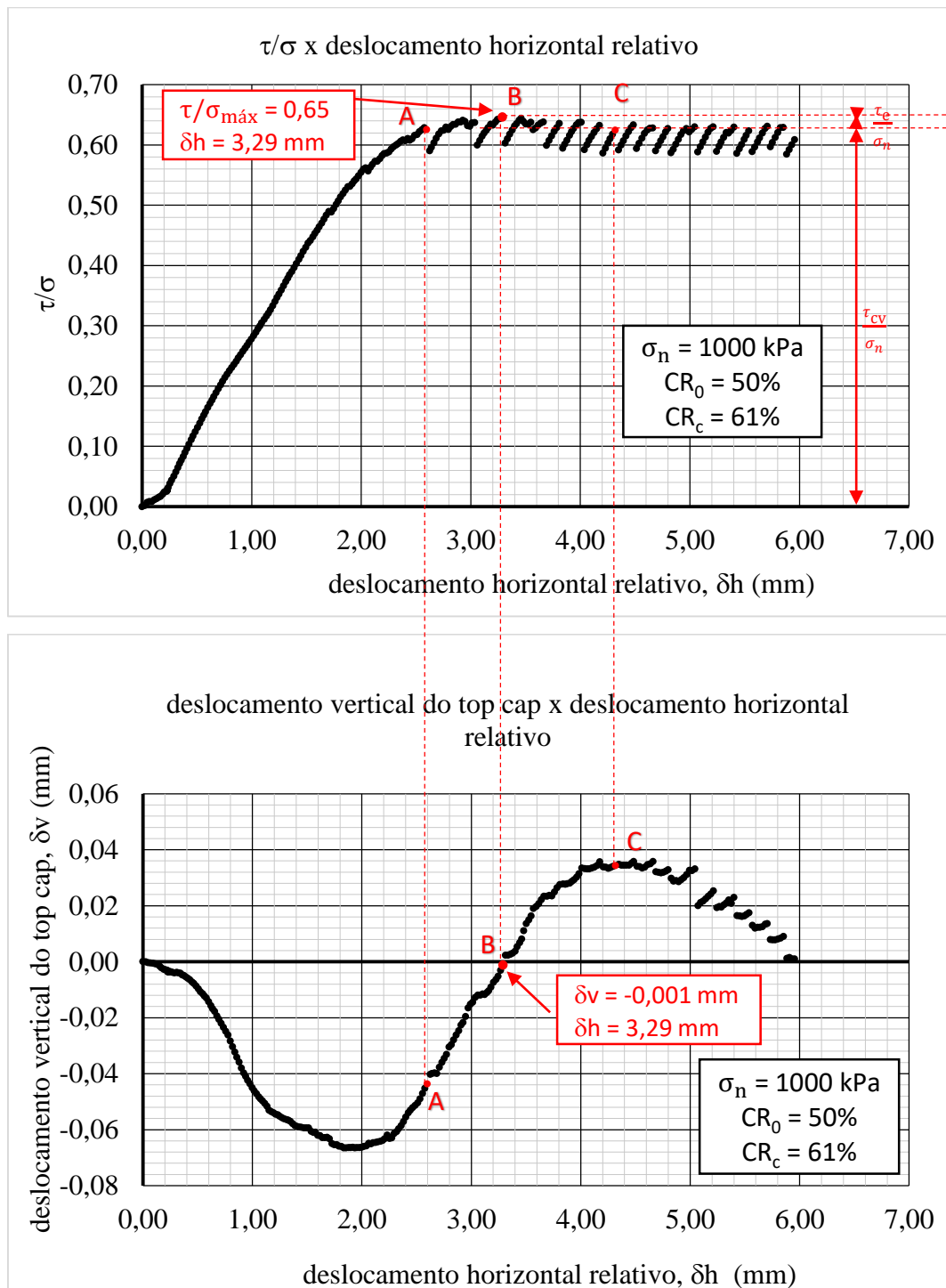
### Ensaio 43: Tensão normal 500 kPa – CR<sub>0</sub> 55%



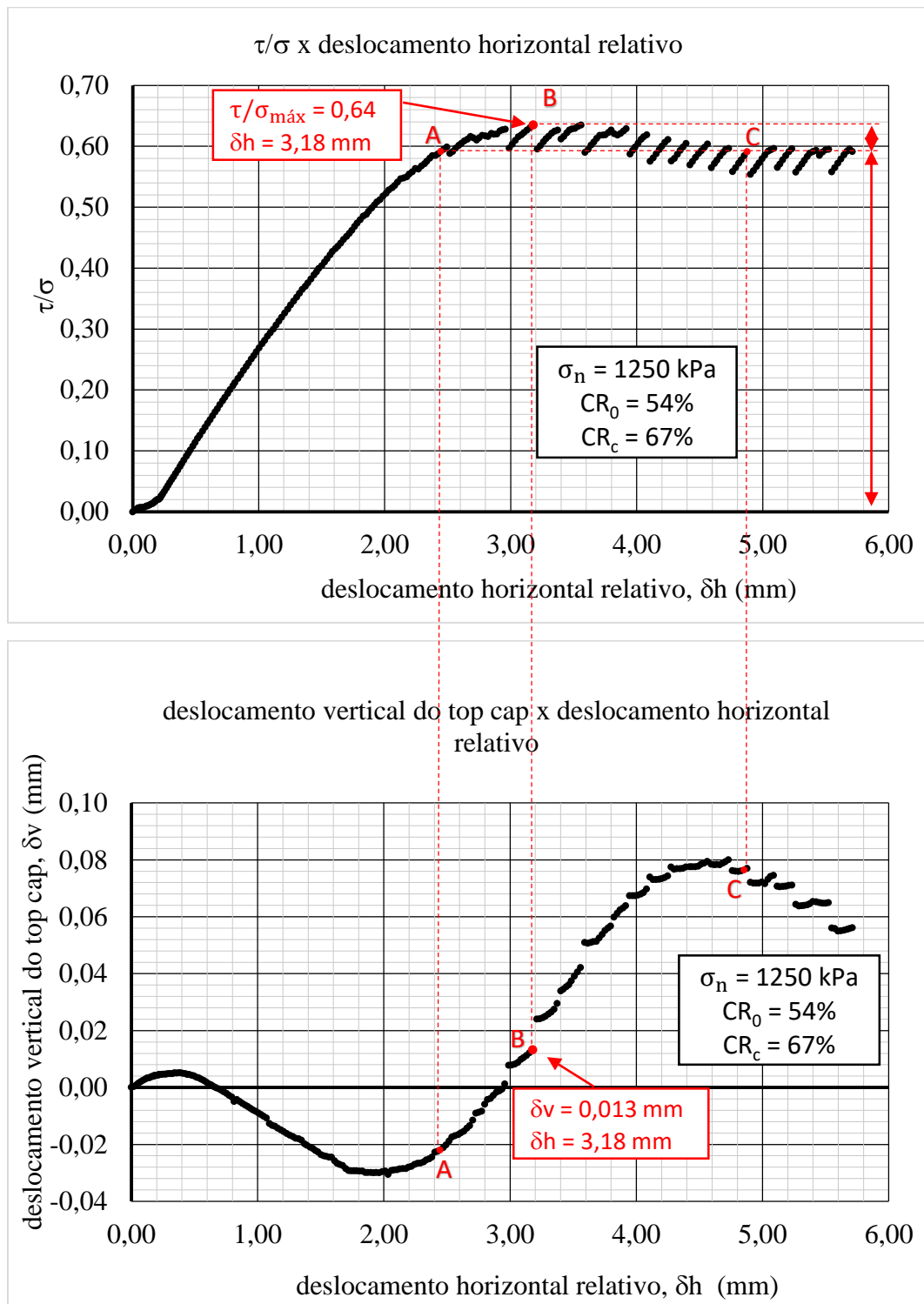
### Ensaio 44: Tensão normal 750 kPa – CR<sub>0</sub> 52%



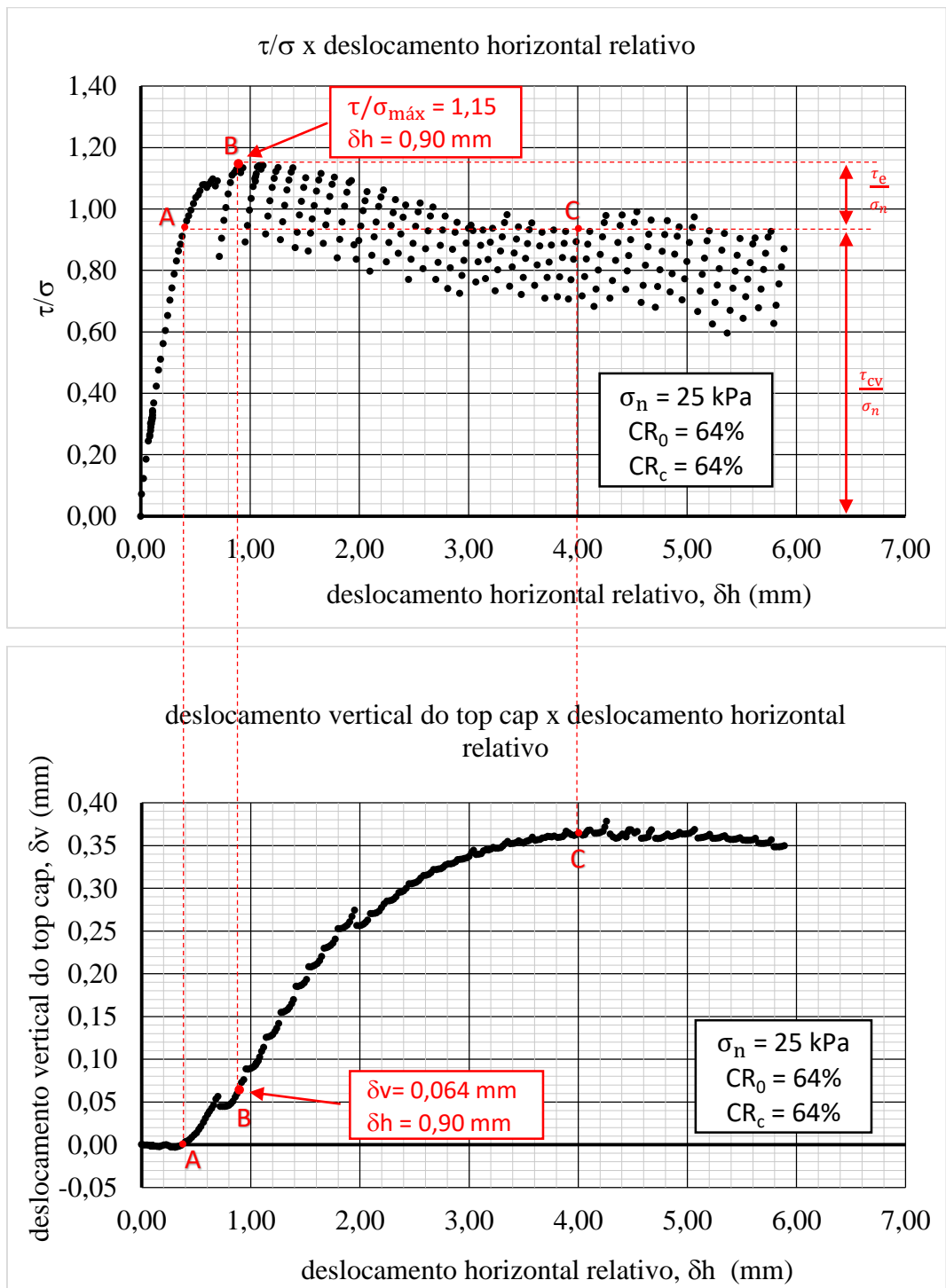
### Ensaio 45: Tensão normal 1000 kPa – CR<sub>0</sub> 50%



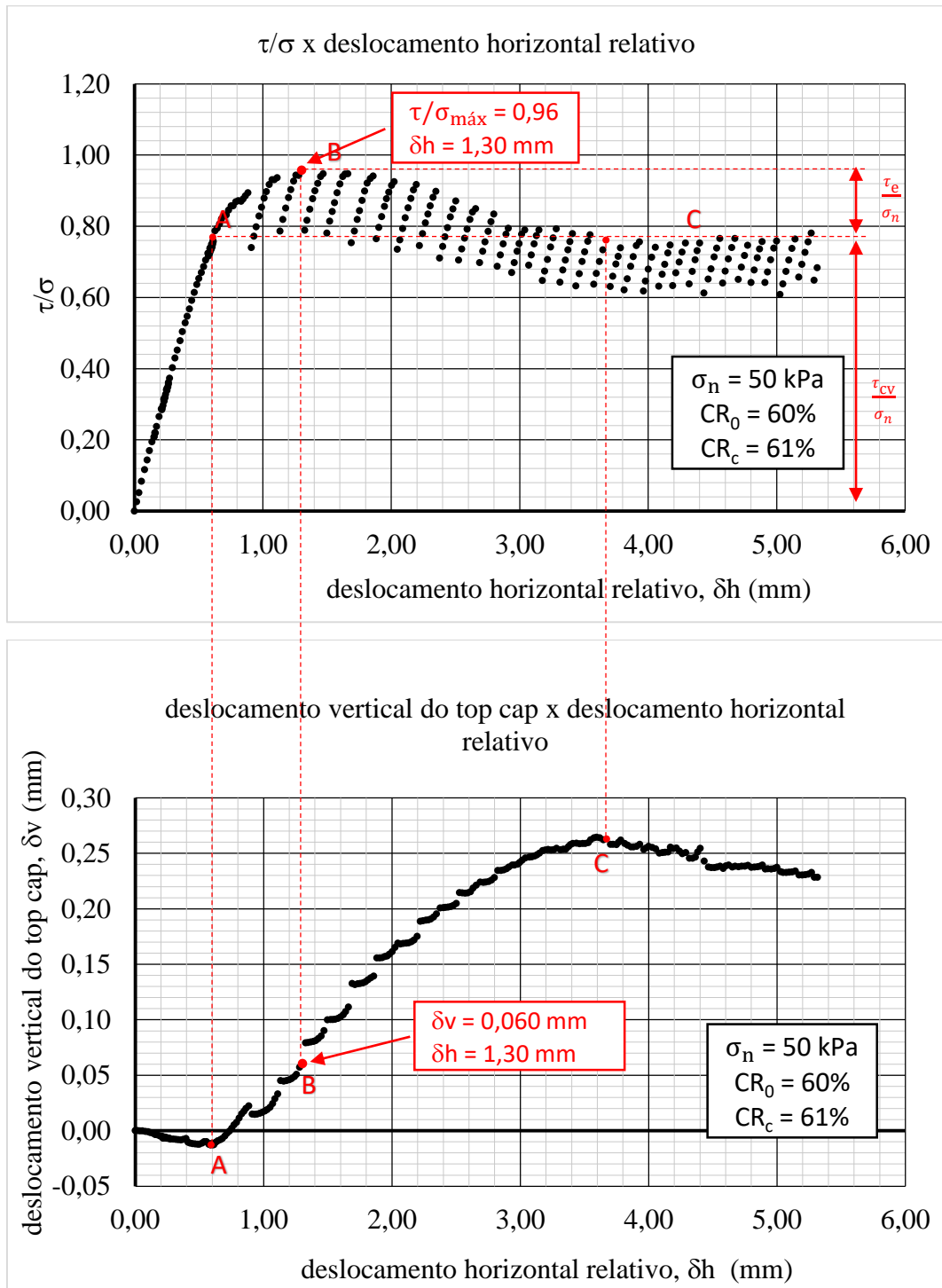
### Ensaio 46: Tensão normal 1250 kPa – CR<sub>0</sub> 54%



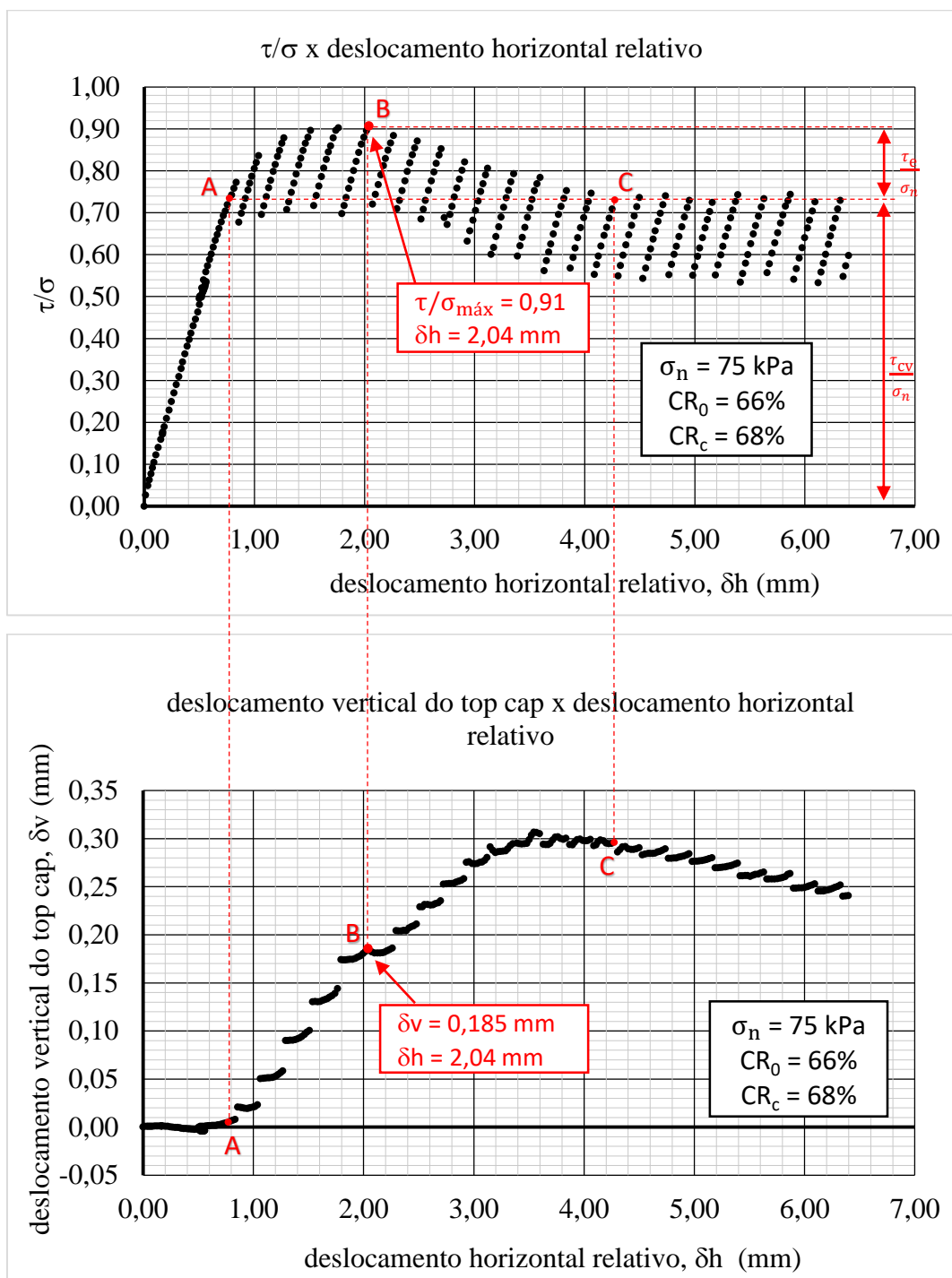
### Ensaio 47: Tensão normal 25 kPa – CR<sub>0</sub> 64%



### Ensaio 48: Tensão normal 50 kPa – CR<sub>0</sub> 60%

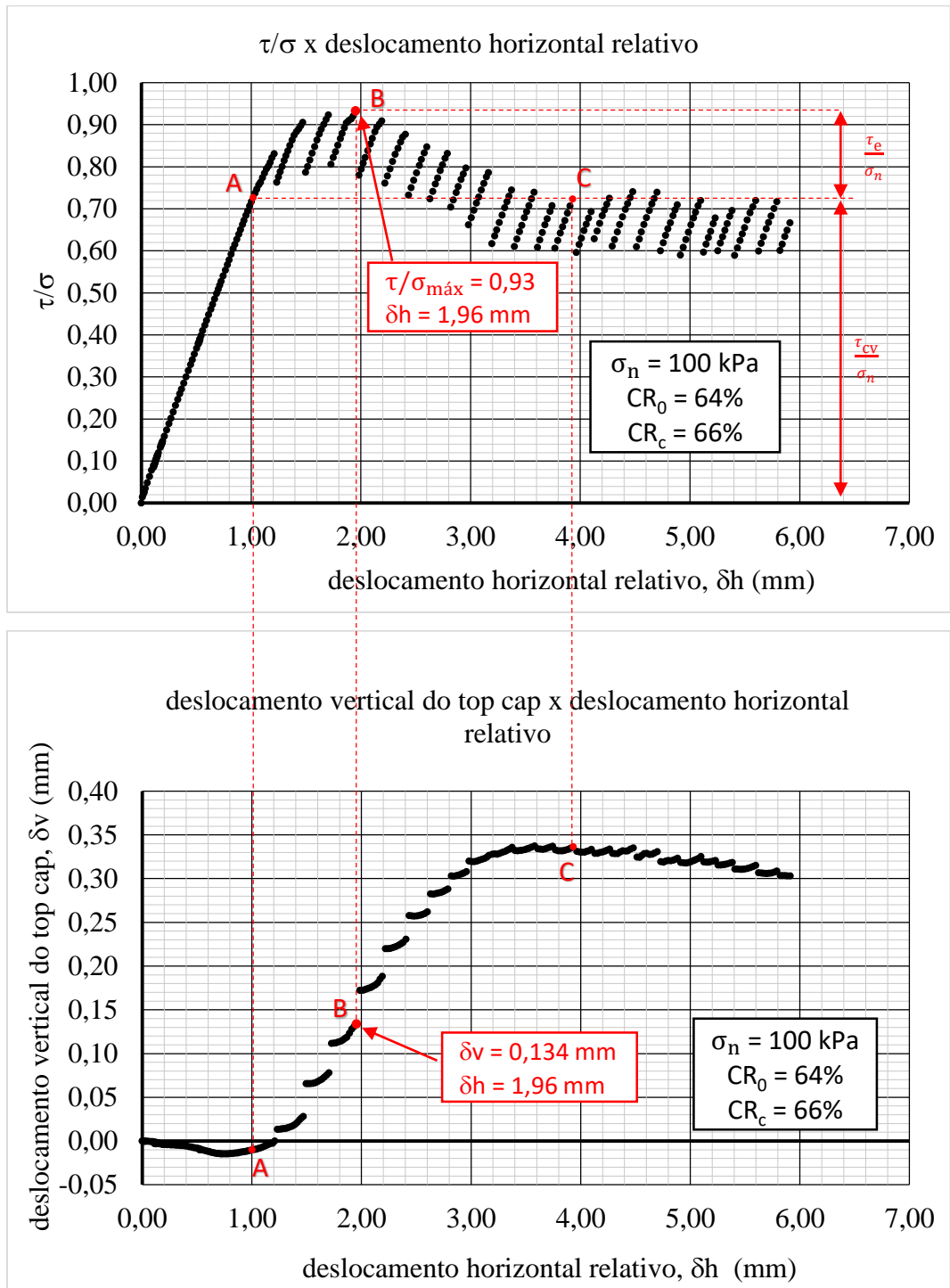


### Ensaio 49: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 66%

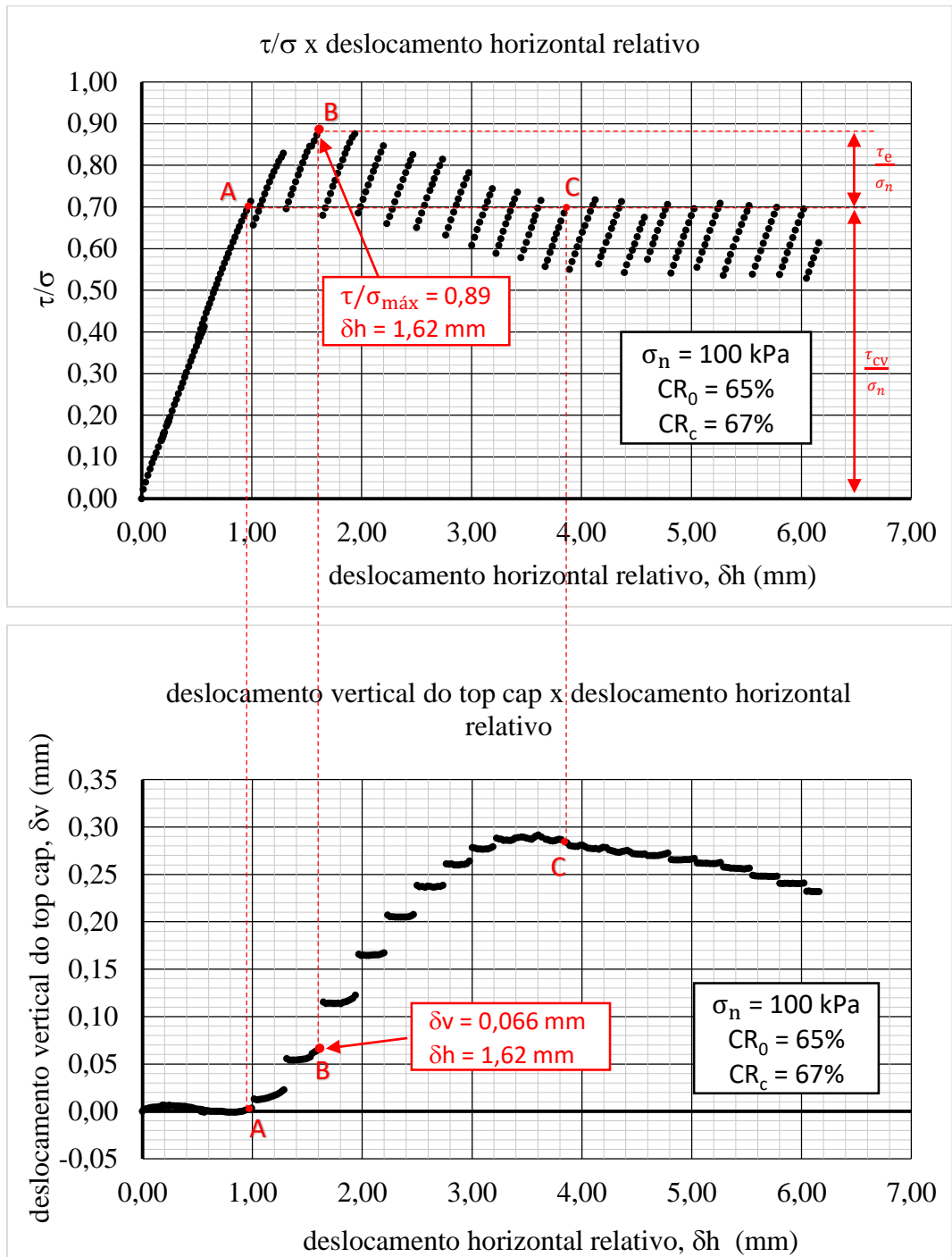




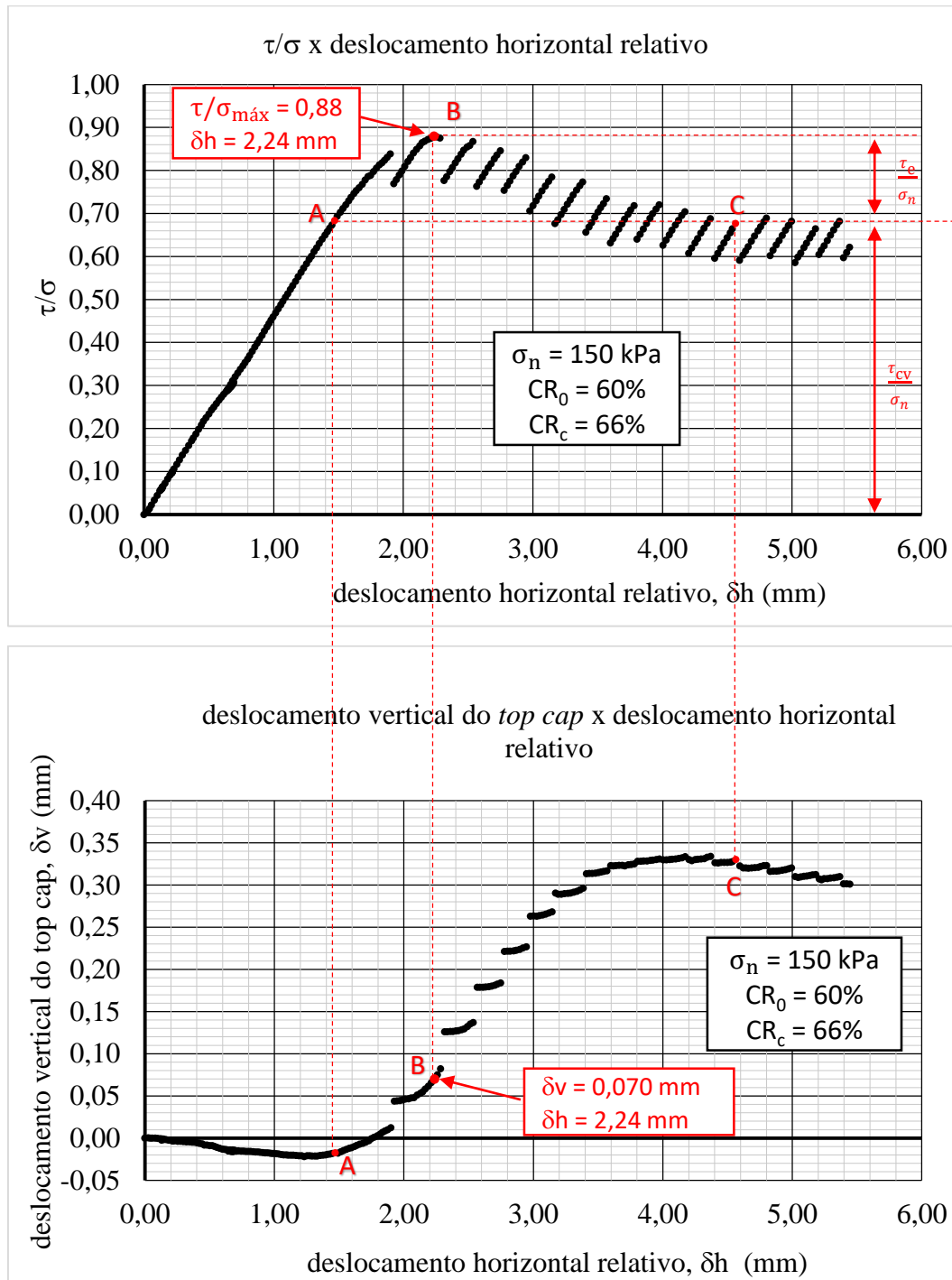
### Ensaio 50: Tensão normal 100 kPa – CR<sub>0</sub> 64%



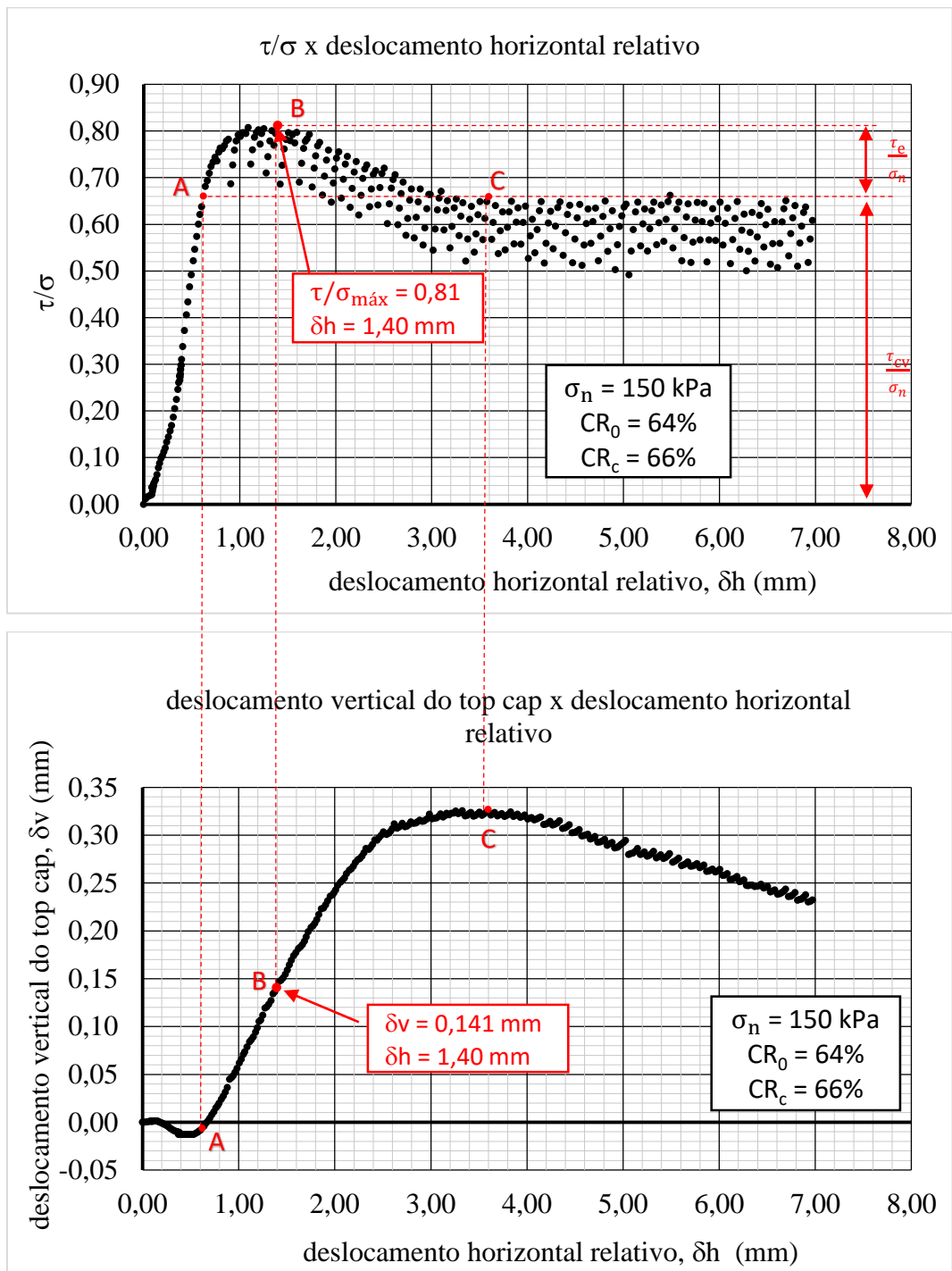
### Ensaio 51: Tensão normal 100 kPa – CR<sub>0</sub> 65%



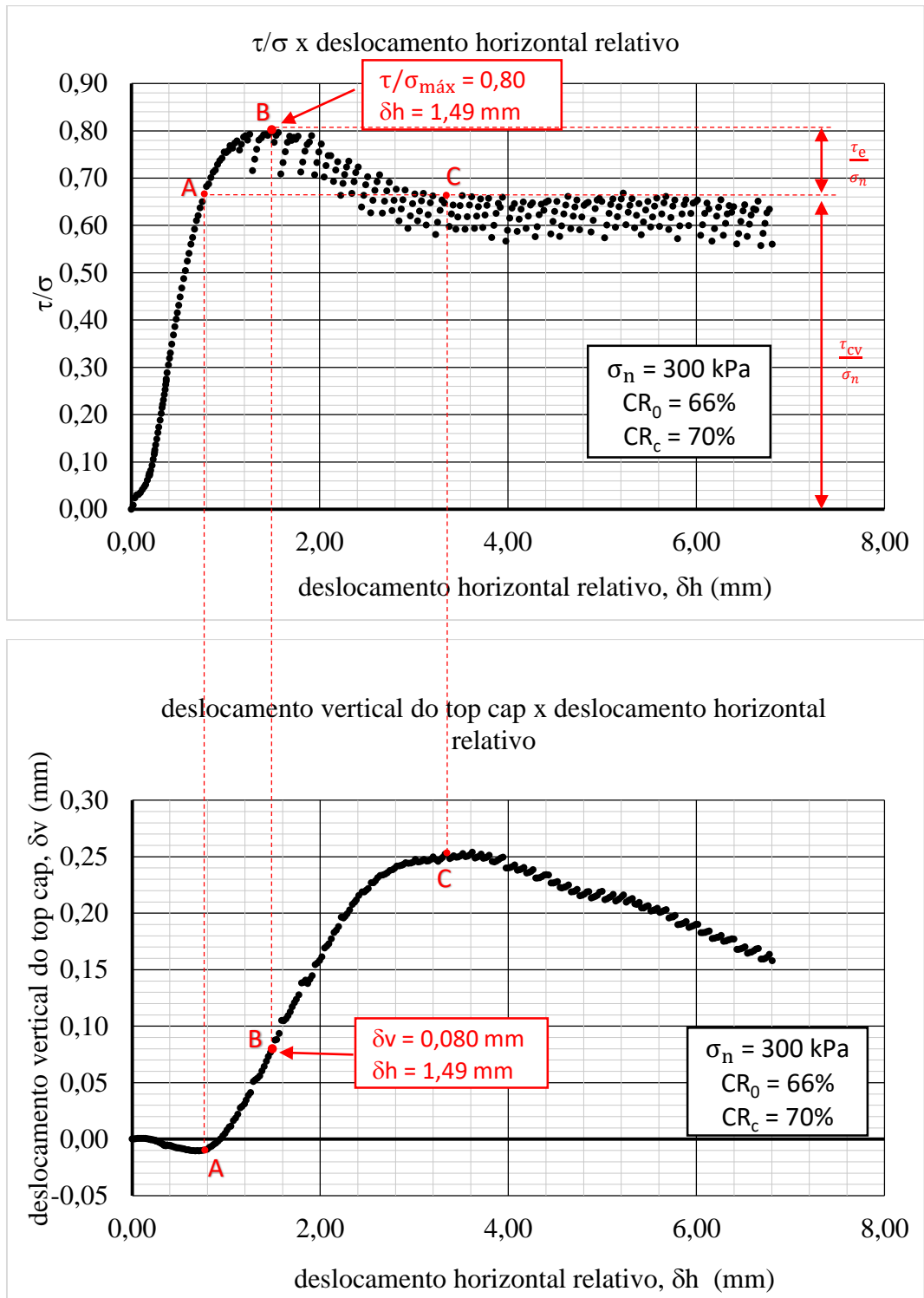
### Ensaio 52: Tensão normal 150 kPa – CR<sub>0</sub> 60%



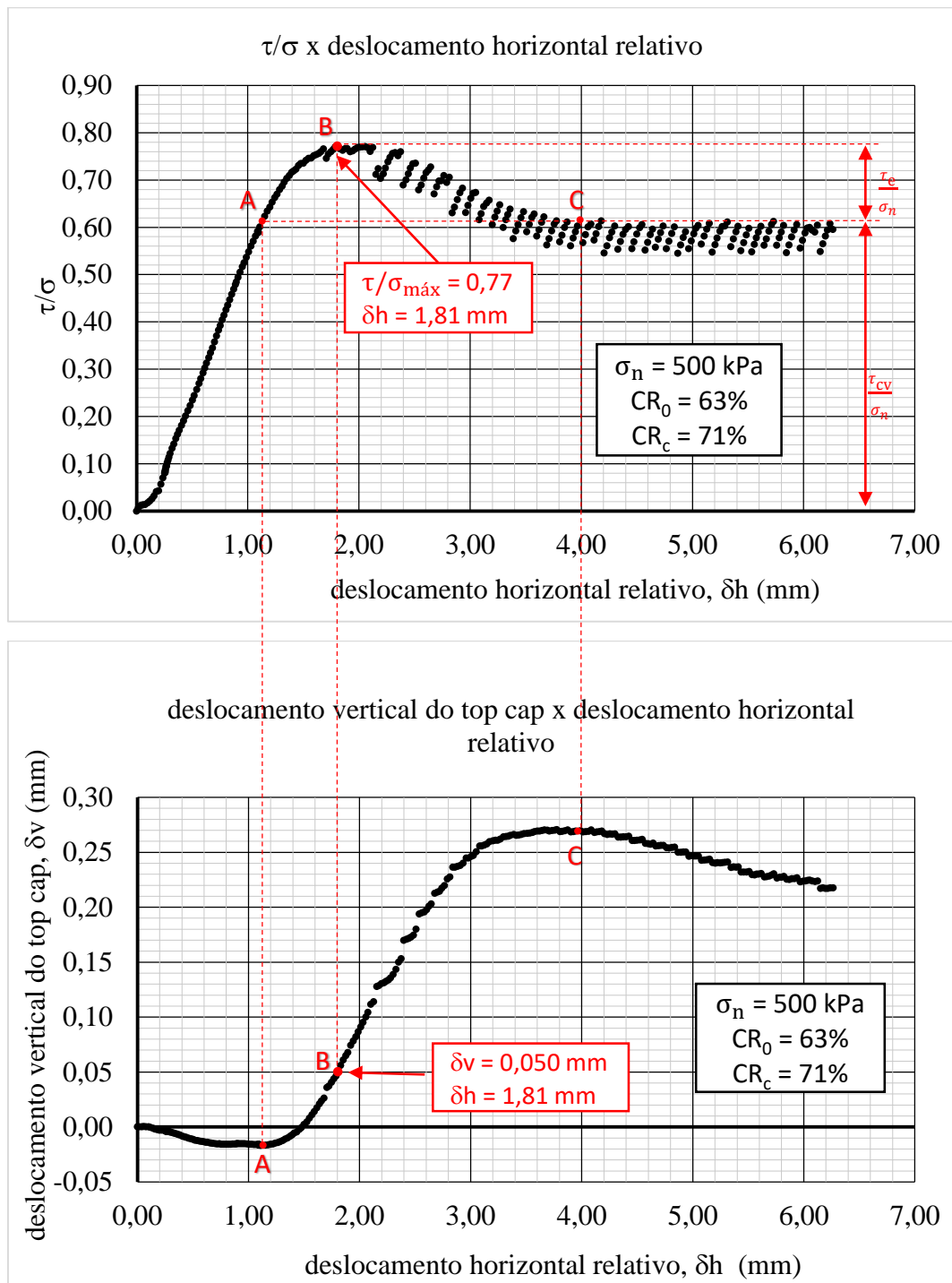
### Ensaio 53: Tensão normal 150 kPa – CR<sub>0</sub> 64%



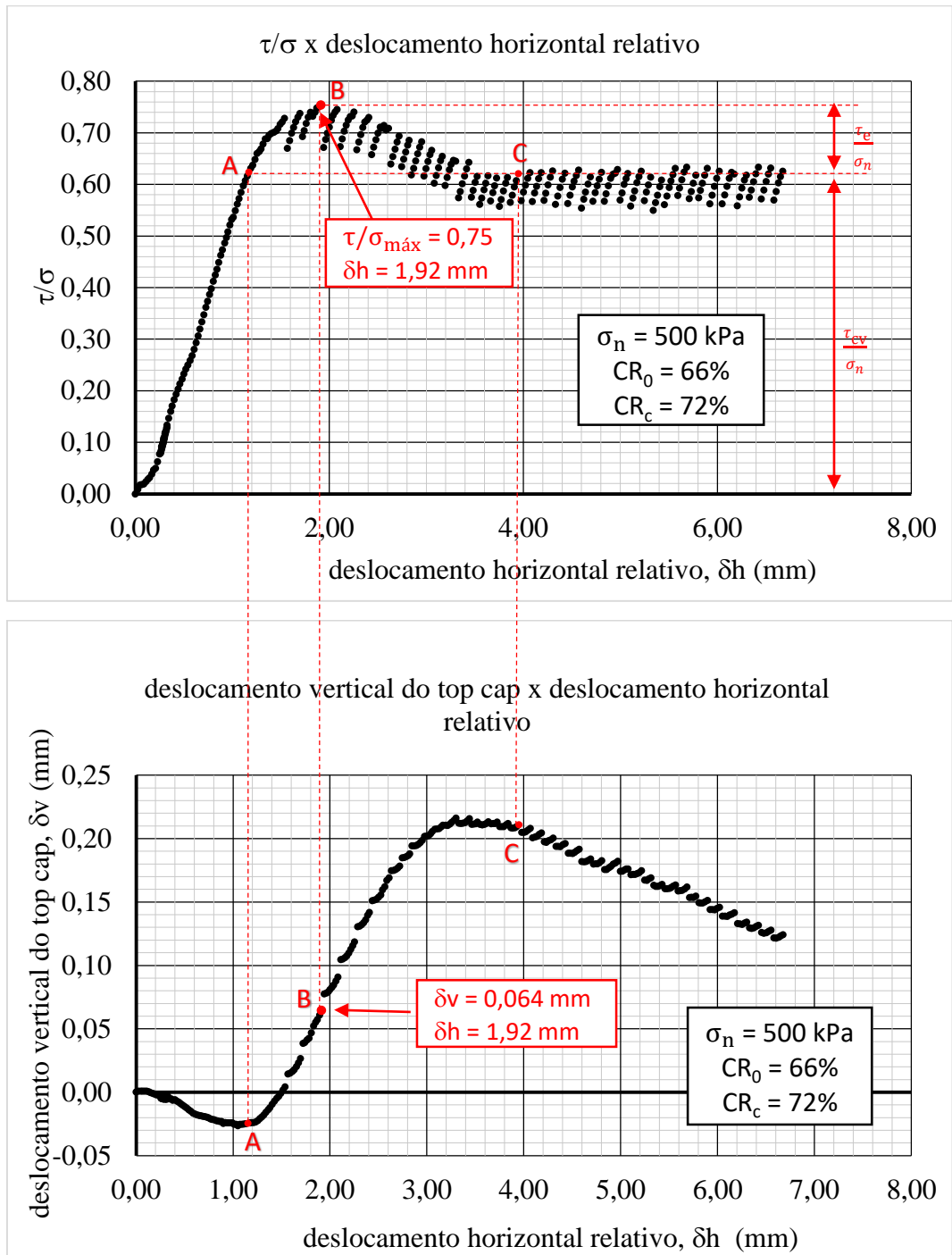
### Ensaio 54: Tensão normal 300 kPa – CR<sub>0</sub> 66%



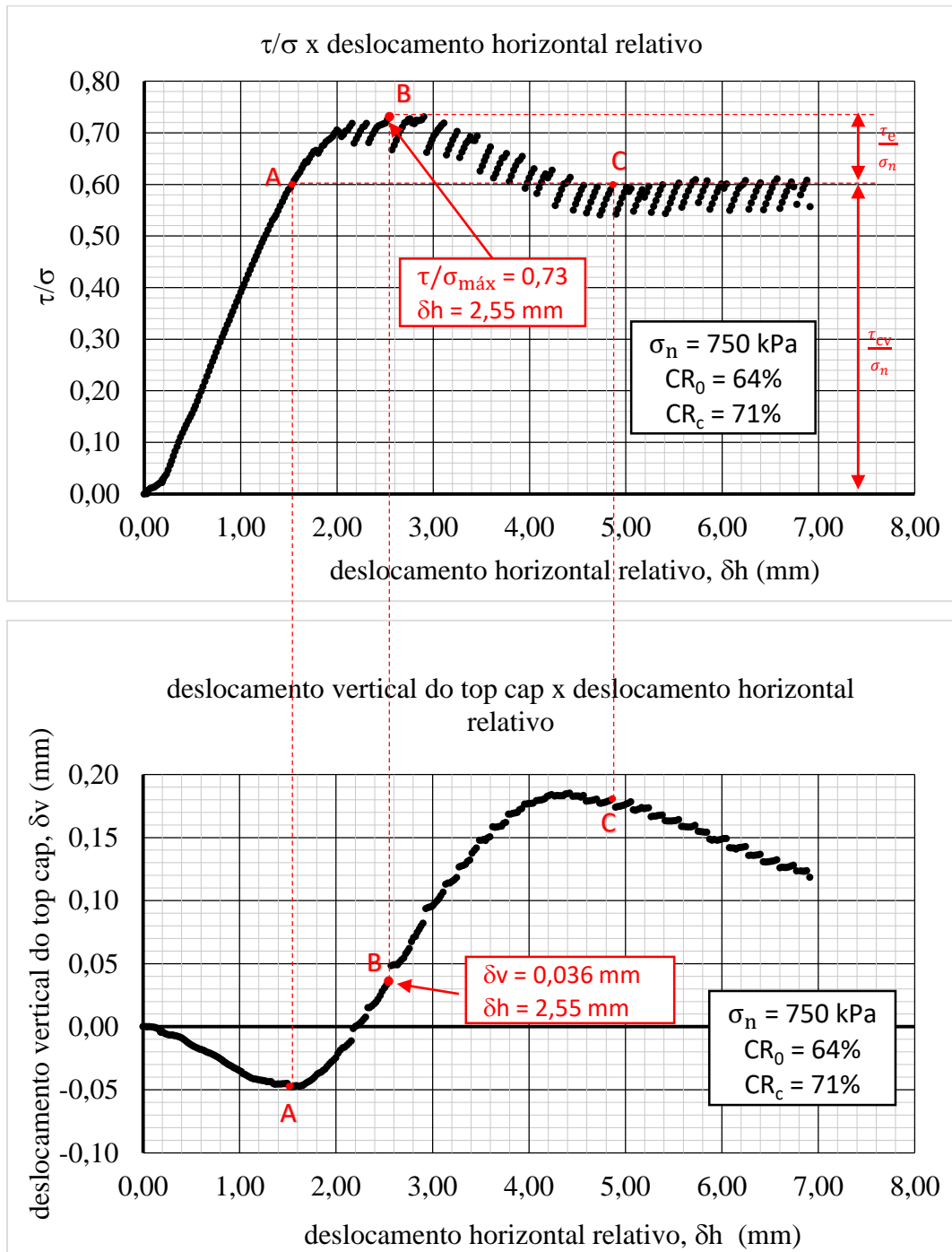
### Ensaio 55: Tensão normal 500 kPa – CR<sub>0</sub> 63%



### Ensaio 56: Tensão normal 500 kPa – CR<sub>0</sub> 66%

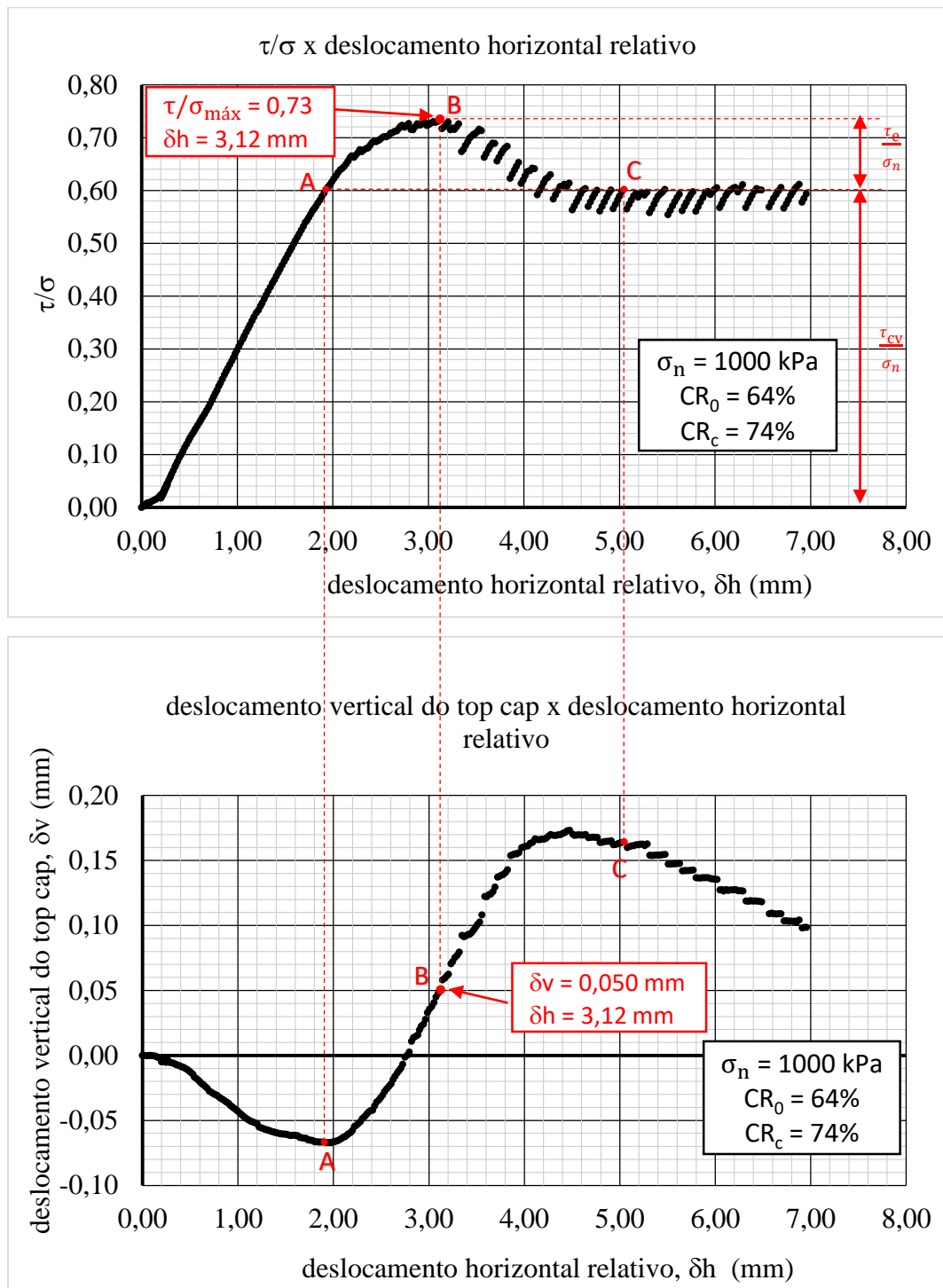


### Ensaio 57: Tensão normal 750 kPa – CR<sub>0</sub> 64%

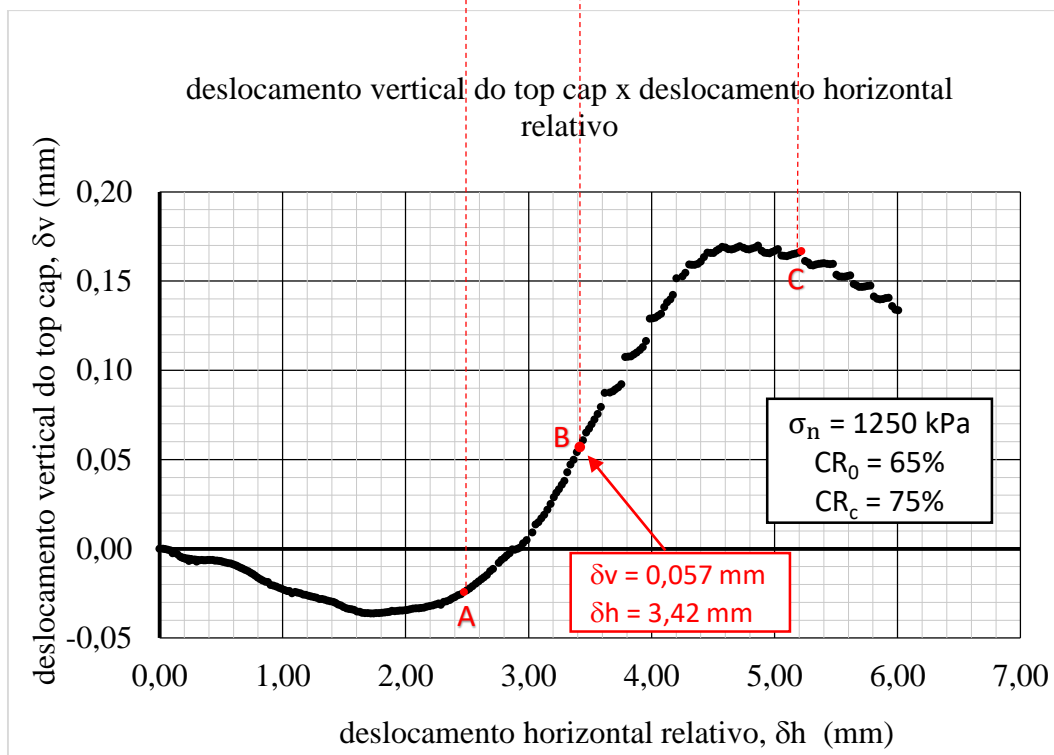
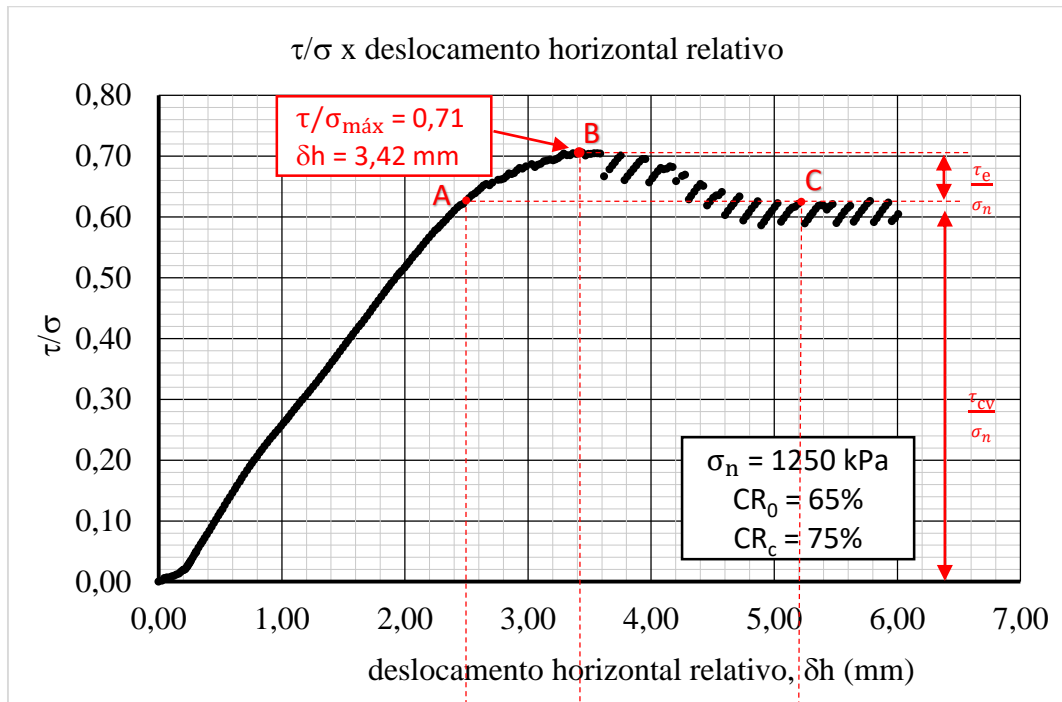




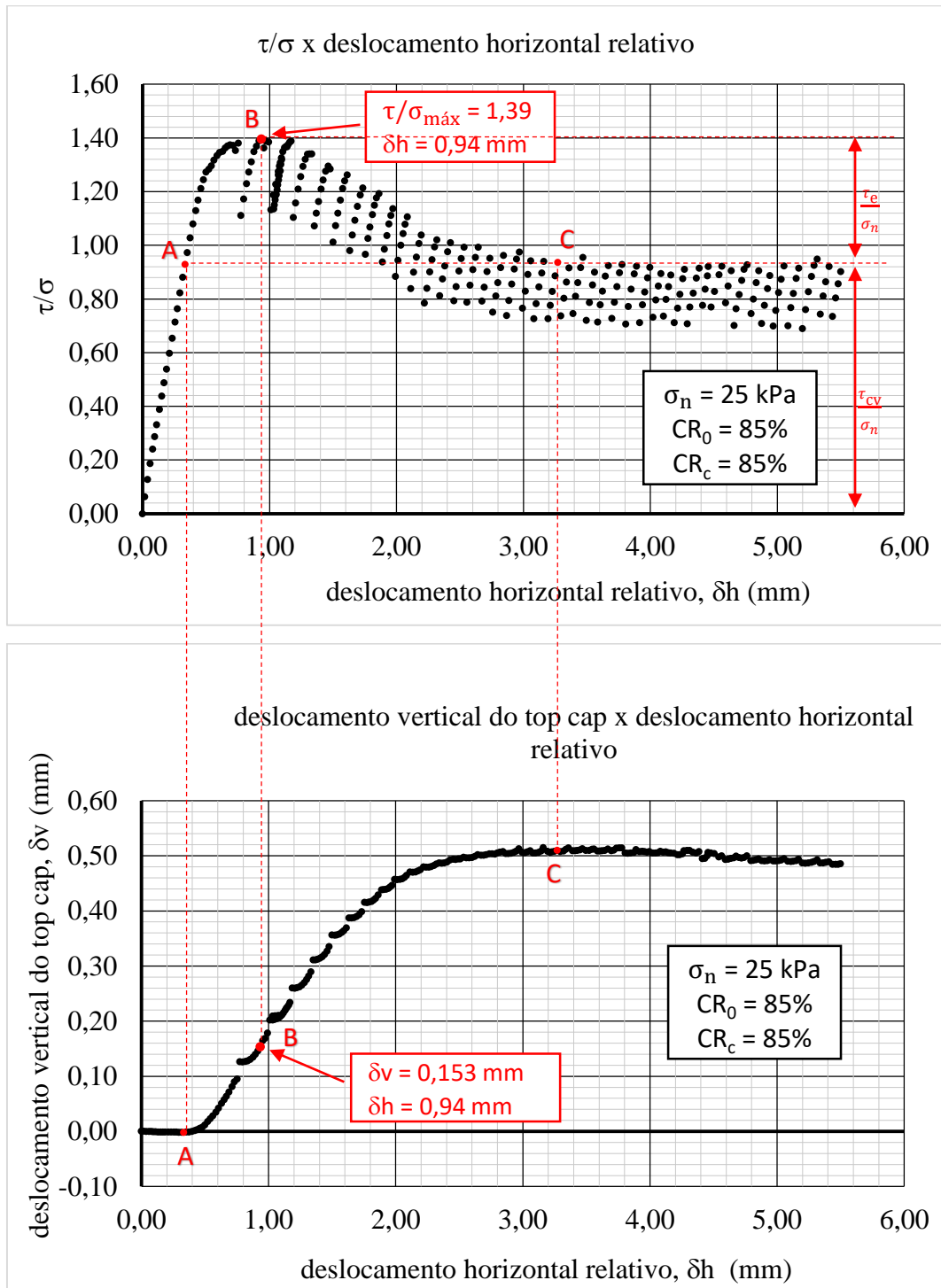
### Ensaio 58: Tensão normal 1000 kPa – CR<sub>0</sub> 64%



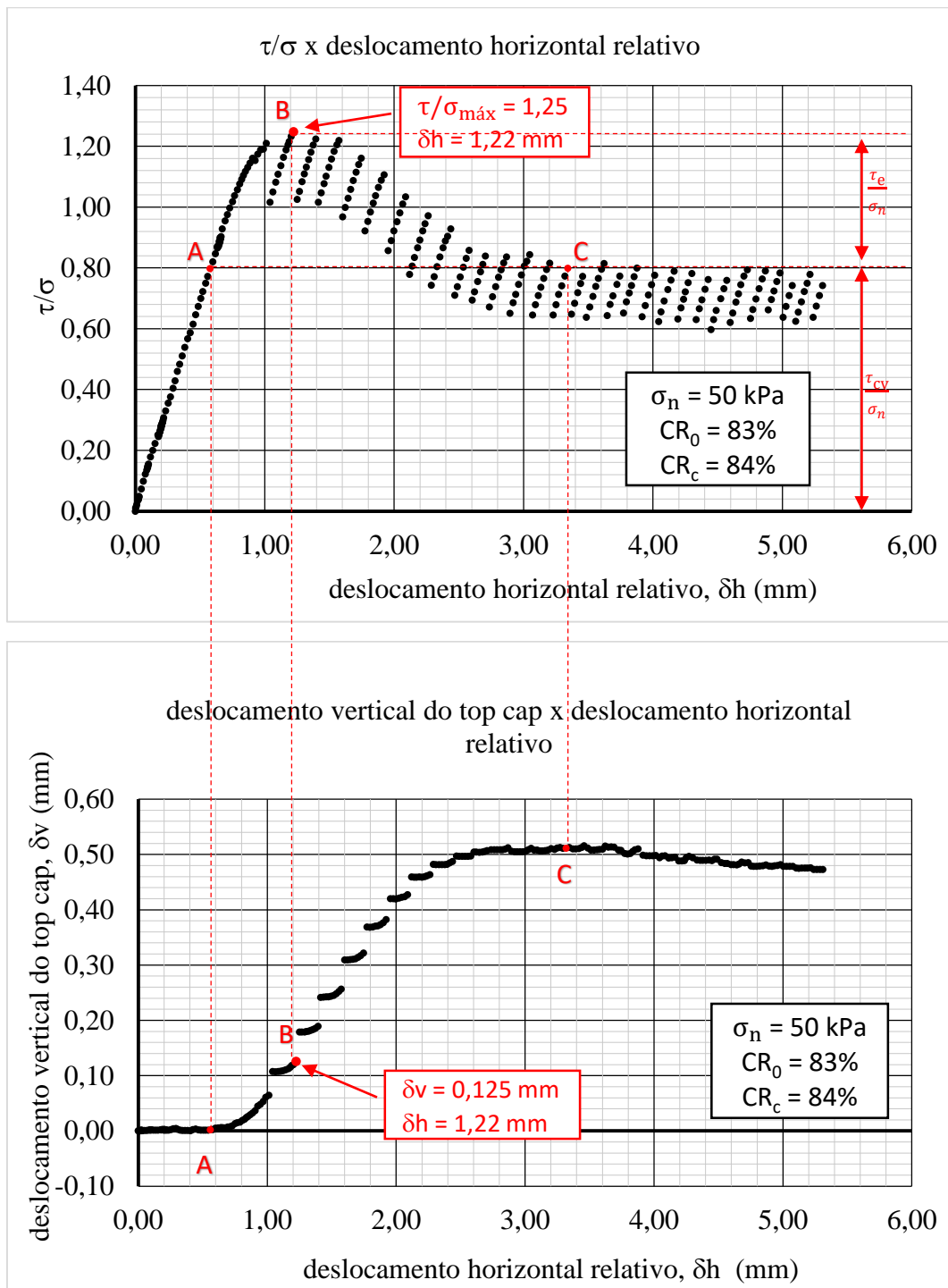
### Ensaio 59: Tensão normal 1250 kPa – CR<sub>0</sub> 65%



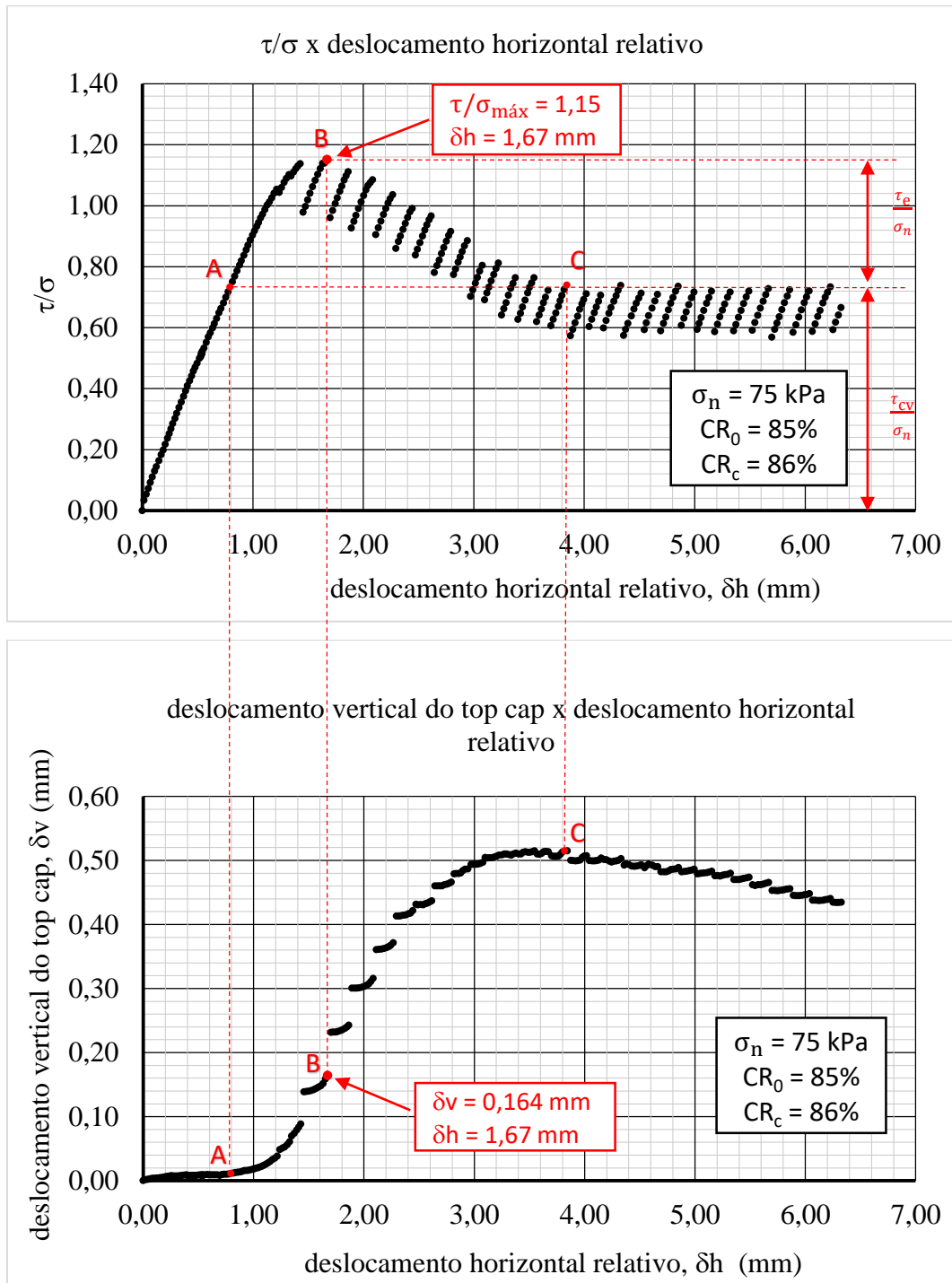
### Ensaio 60: Tensão normal 25 kPa – CR<sub>0</sub> 85%



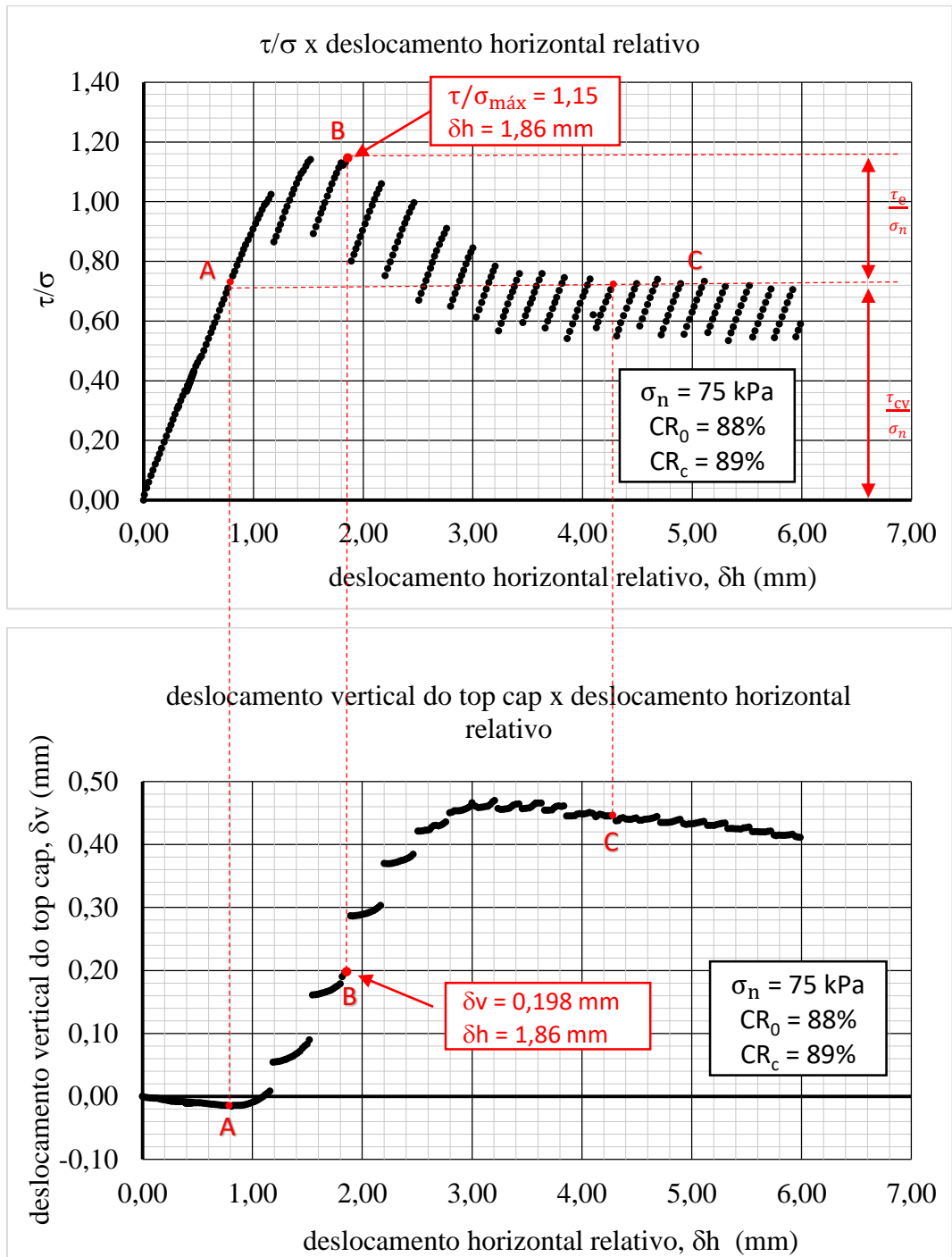
### Ensaio 61: Tensão normal 50 kPa – CR<sub>0</sub> 83%



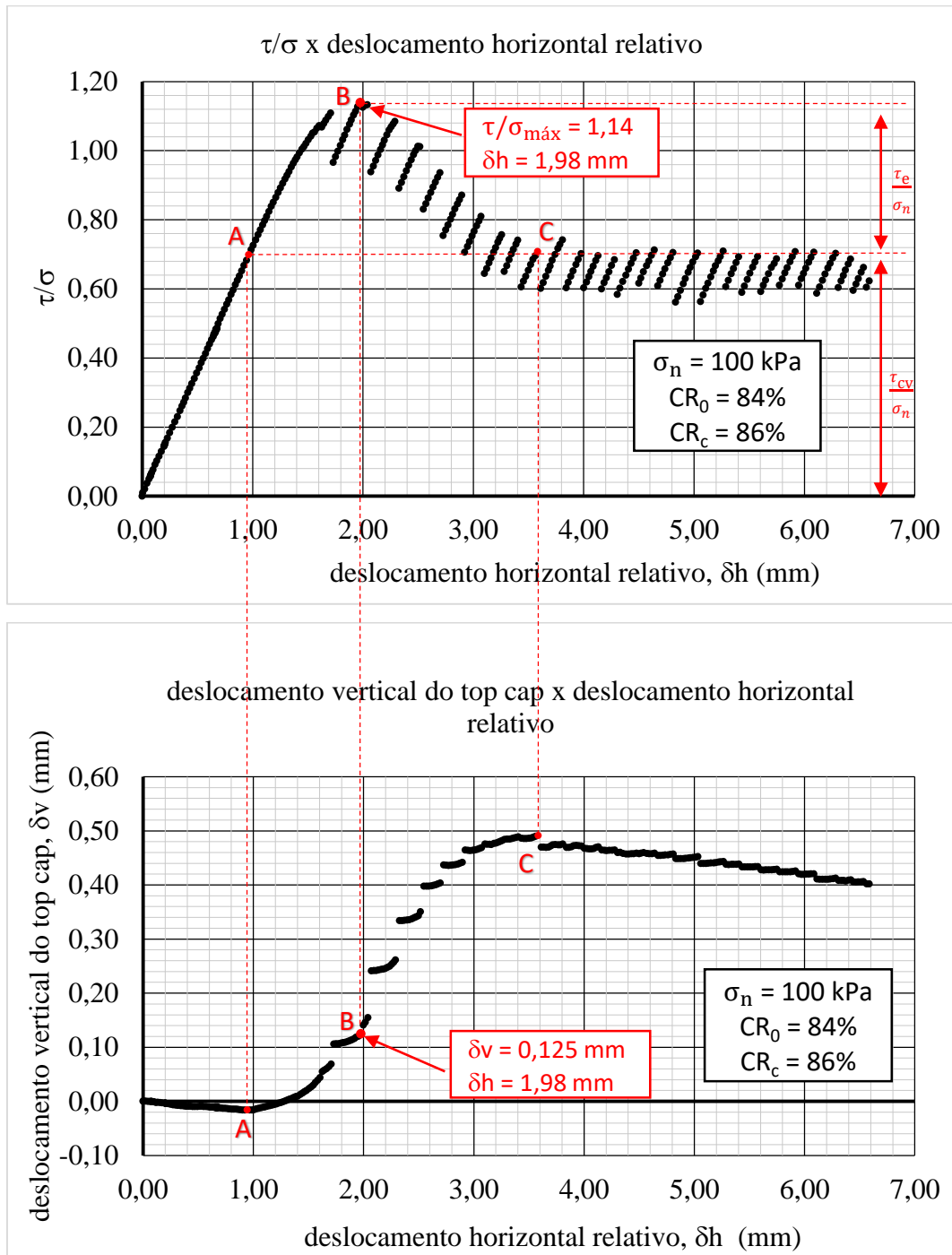
### Ensaio 62: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 85%



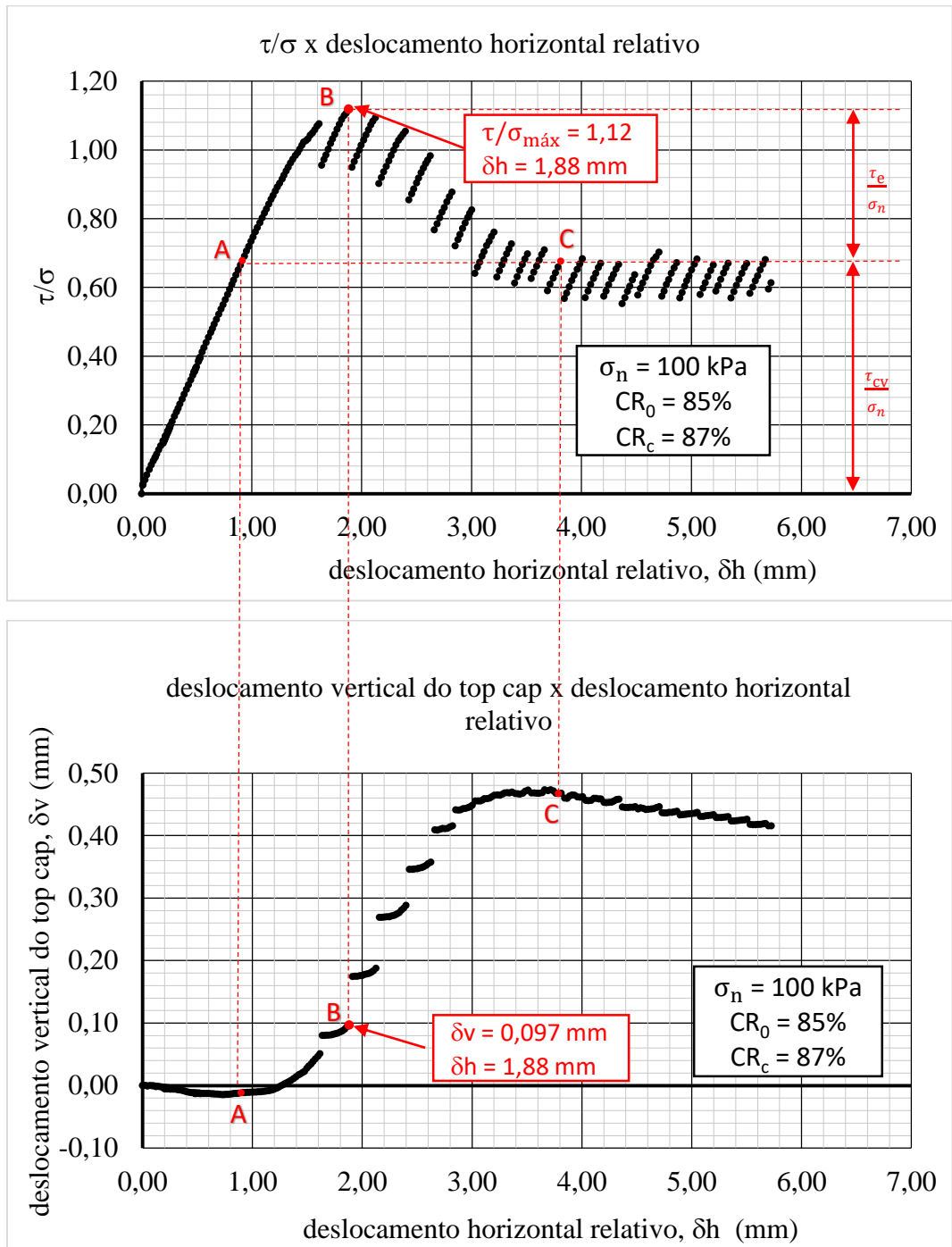
### Ensaio 63: Tensão normal 75 kPa – CR<sub>0</sub> 88%



### Ensaio 64: Tensão normal 100 kPa – CR<sub>0</sub> 84%

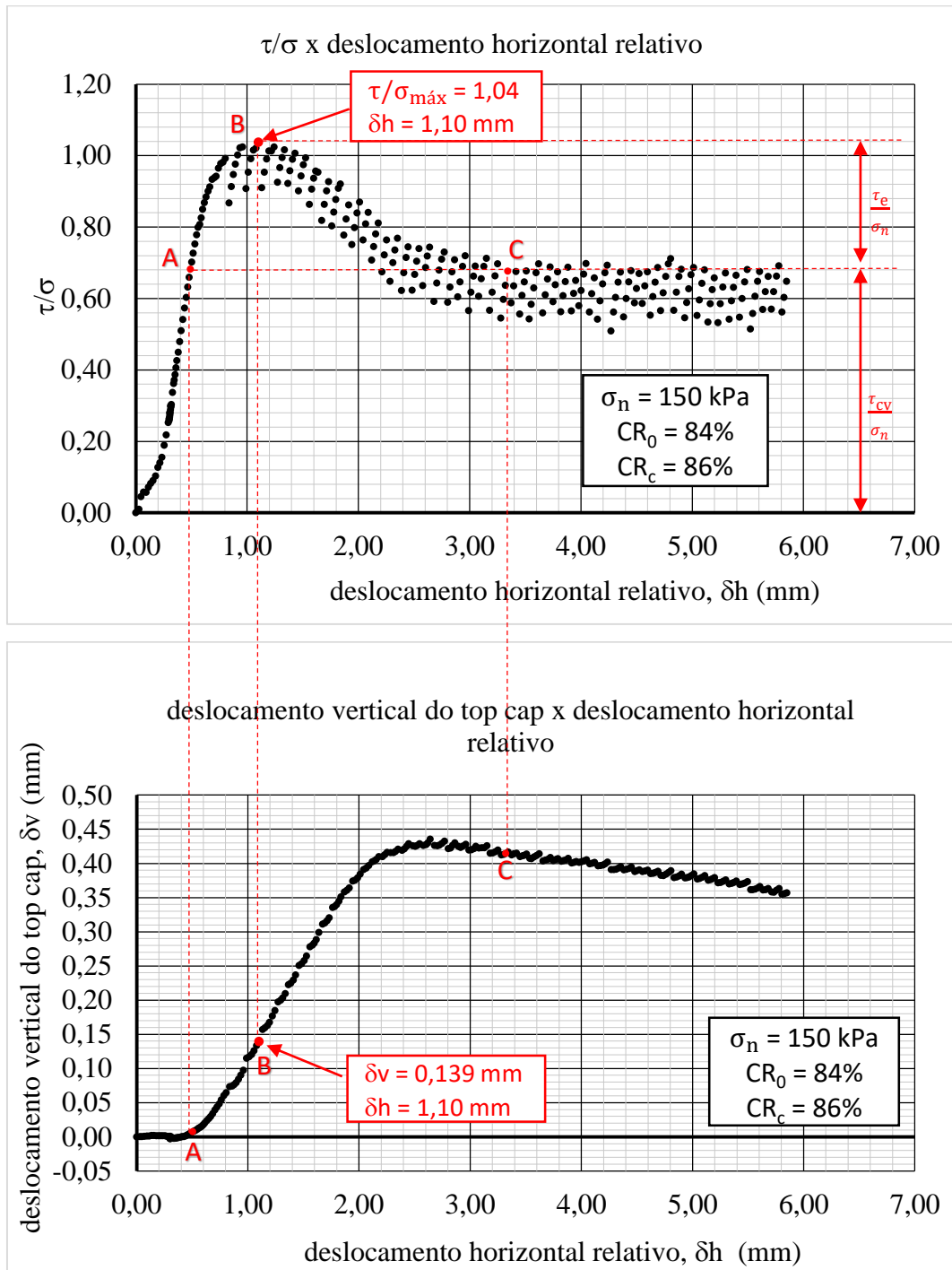


### Ensaio 65: Tensão normal 100 kPa – CR<sub>0</sub> 85%

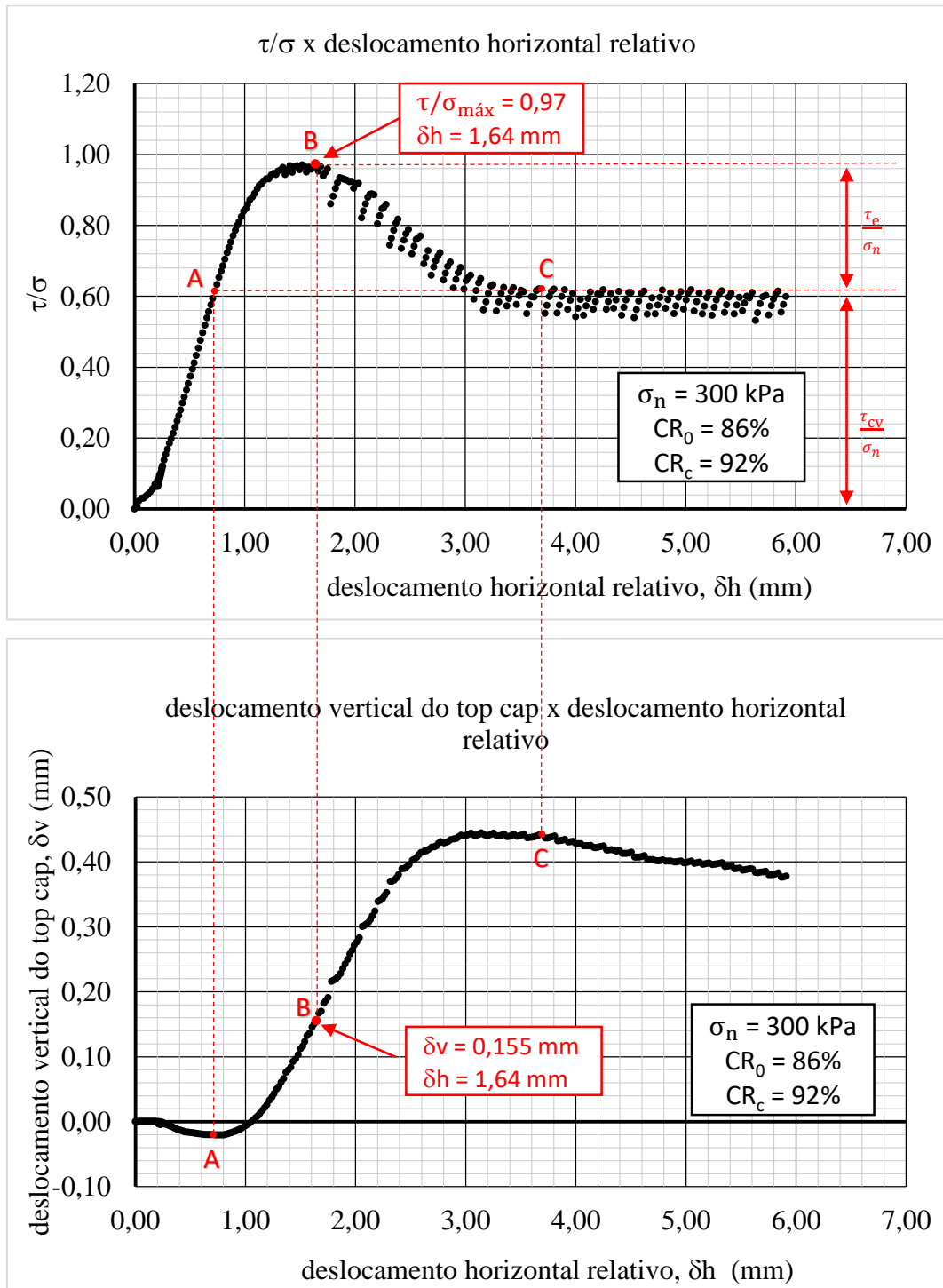




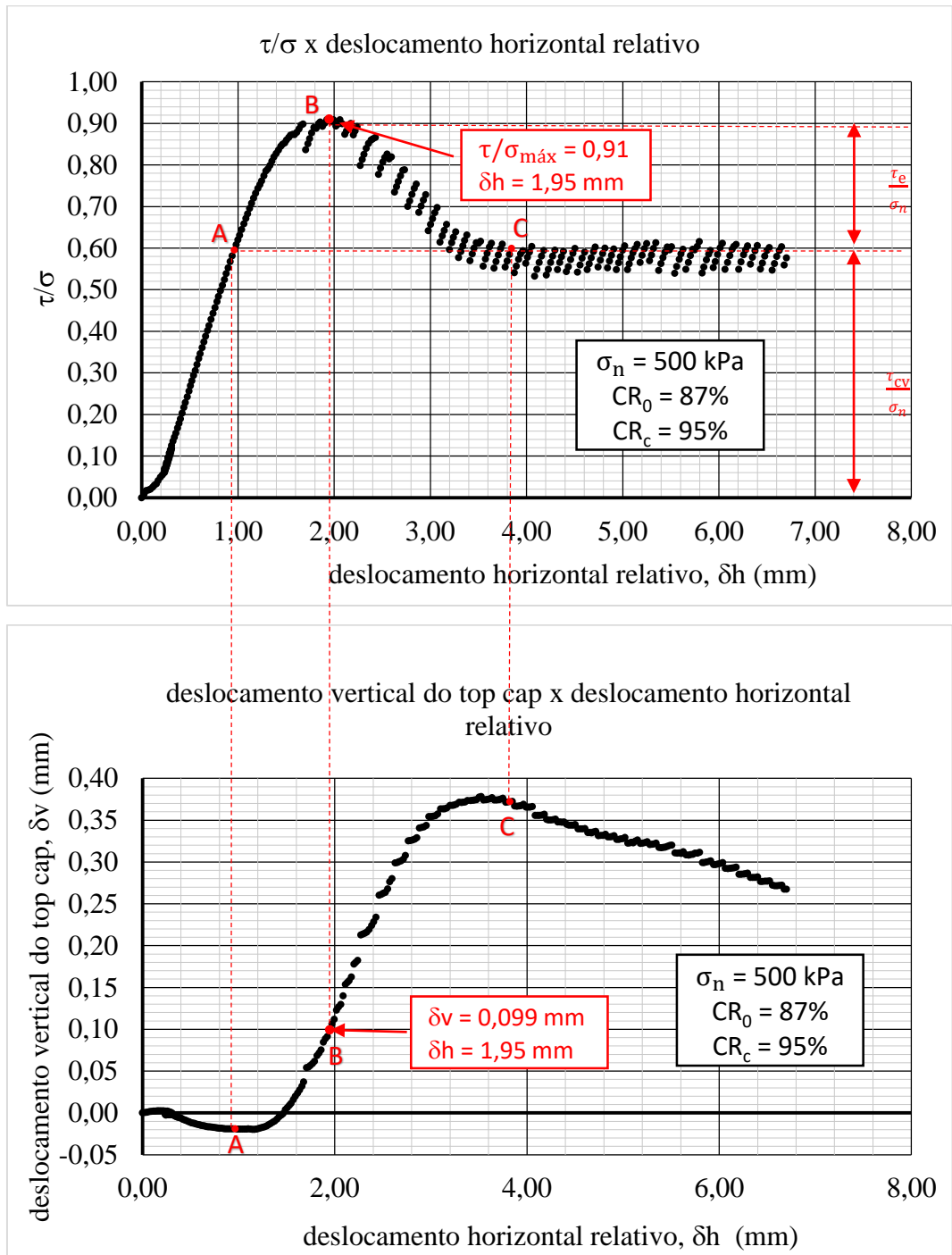
### Ensaio 66: Tensão normal 150 kPa – CR<sub>0</sub> 84%



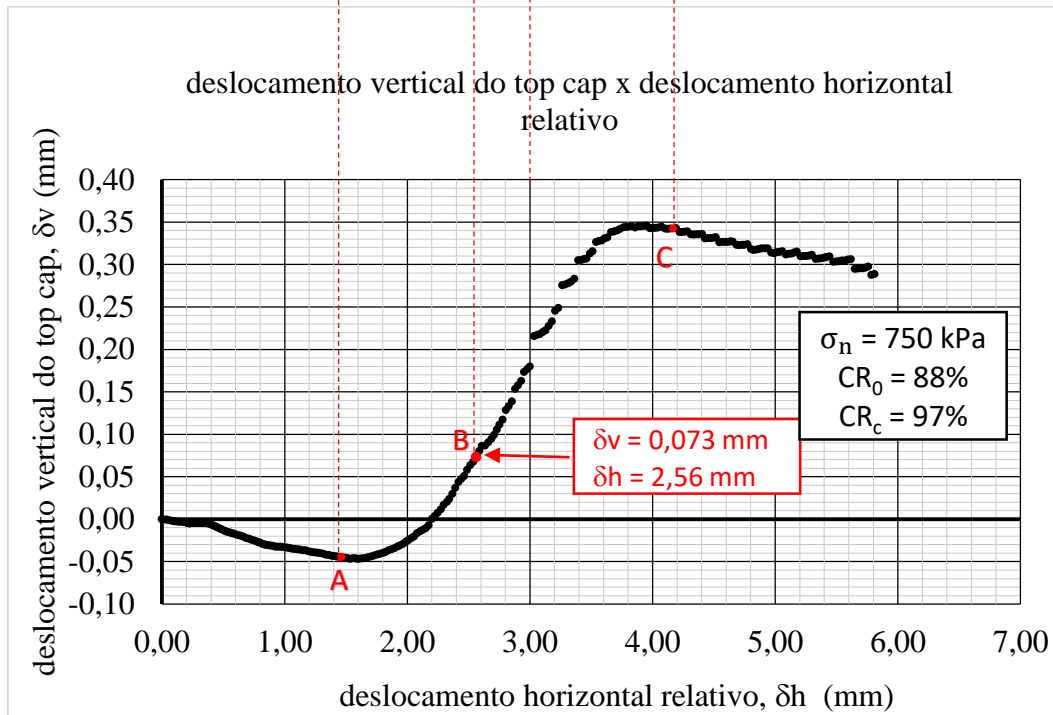
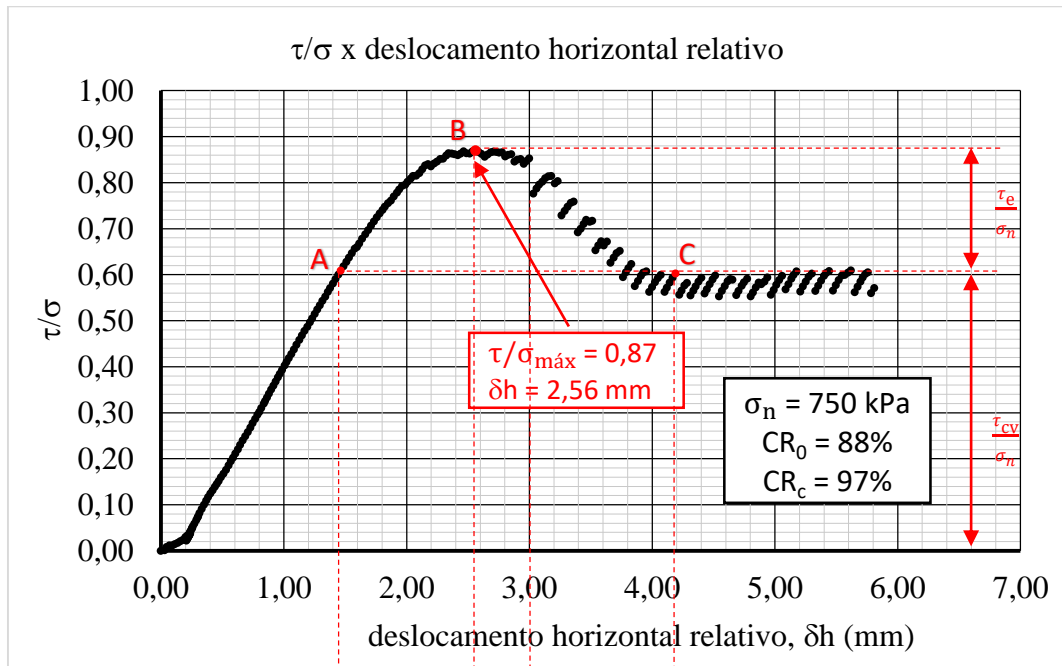
### Ensaio 67: Tensão normal 300 kPa – CR<sub>0</sub> 86%



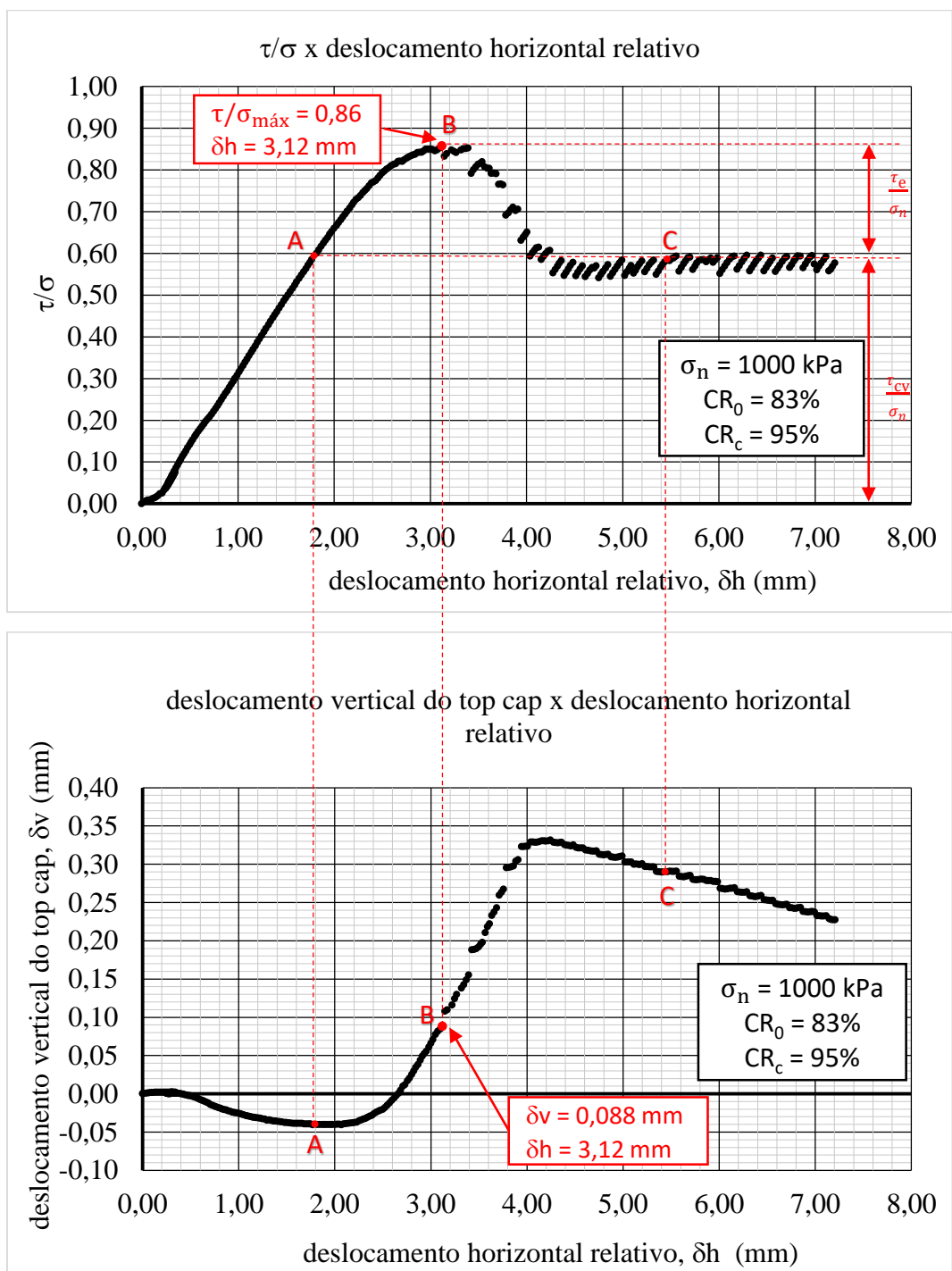
### Ensaio 68: Tensão normal 500 kPa – CR<sub>0</sub> 87%



### Ensaio 69: Tensão normal 750 kPa – CR<sub>0</sub> 88%



### Ensaio 70: Tensão normal 1000 kPa – CR<sub>0</sub> 83%



### Ensaio 71: Tensão normal 1250 kPa – CR<sub>0</sub> 86%

