

COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE COULOMB E DE BARTON PARA A RESISTÊNCIA TANGENCIAL DE DESCONTINUIDADES ROCHOSAS

GUSTAVO DANIEL GOMES DA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Eduardo Manuel Cabrita Fortunato

Coorientador: Investigador Doutor José João Roseira Delgado
Muralha

JANEIRO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

Odeio quem me rouba a solidão sem em troca me oferecer verdadeira companhia

Friedrich Nietzsche

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, com um carinho muito especial aos meus pais, à minha irmã e à Mariana, pelo apoio constante e compreensão que me dedicaram durante a realização deste trabalho e durante todo o meu percurso acadêmico.

Agradeço ao meu orientador, Professor Eduardo Fortunato, pela oportunidade de realizar este trabalho no LNEC, disponibilidade e ajuda prestada.

Agradeço ao meu coorientador, Investigador José Muralha, igualmente pela disponibilidade e ajuda prestadas ao longo de todo o trabalho, pois sem elas este trabalho não teria sido possível, também pelo apoio técnico e ensinamentos constantes.

Ao LNEC agradeço o material e equipamento facultado para a realização do trabalho. Com um agradecimento aos técnicos da instituição que tornaram o trabalho possível, em especial ao André Cordeiro pela ajuda prestada.

Por último, agradeço aos meus amigos e restante família pelo apoio e incentivo que me prestaram durante todo o período de realização do trabalho.

RESUMO

A resistência e a deformabilidade dum maciço rochoso são, ambas, fortemente condicionadas pelo comportamento tangencial das descontinuidades do mesmo, tornando-se, assim, indispensável o estudo e avaliação da resistência tangencial das descontinuidades por meio de ensaios.

O presente trabalho apresenta o estudo da resistência tangencial dum conjunto de superfícies de diaclases rochosas, fazendo a comparação entre os modelos de comportamento tangencial de Barton e de Coulomb.

Numa primeira fase do trabalho, apresentou-se a importância, numa prática de engenharia, do estudo e caracterização das superfícies das descontinuidades presentes num maciço rochoso. Posteriormente, analisou-se o comportamento tangencial duma descontinuidade rochosa, com a consequente explanação dos dois modelos estudados neste trabalho.

Numa segunda fase do trabalho, procedeu-se à realização dos ensaios laboratoriais preconizados por Barton e Choubey (1977), realizados a tensões normais muito baixas (*push, pull e tilt*), e dos ensaios de caracterização da resistência das superfícies das diaclases (martelo de Schmidt e *tilt* em superfícies serradas), sugeridos pelo mesmo autor. Com os dados obtidos dos ensaios, e com algumas considerações necessárias em cada um, determinaram-se os parâmetros do modelo de Barton relativos à resistência (*JRC, JCS e ϕ_r*).

Na fase final do trabalho, procedeu-se ao cálculo da resistência tangencial segundo o modelo de Barton, para níveis crescentes de tensão normal, e comparou-se com a resistência tangencial do modelo de Coulomb, para os mesmos níveis de tensão, obtida de ensaios de deslizamento, previamente realizados no LNEC, sobre os mesmos provetes. Da comparação dos valores dos dois modelos, apresentaram-se as principais conclusões do trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: diaclases rochosas, modelo de Coulomb, modelo de Barton, parâmetros de resistência tangencial, ensaios laboratoriais.

ABSTRACT

Strength and deformability of rock masses are both strongly influenced by the shear behaviour of their discontinuities. So, it is required to use shear tests to study and assess the shear behaviour of discontinuities.

This work presents the study of the shear strength of a group of rock joints comparing the Coulomb and Barton models for shear behaviour.

On a first stage, the relevance of the study of the characterization of rock mass discontinuities in engineering practice is presented. Posteriorly, the shear behaviour of rock joints is analyzed, and the Barton and Coulomb models, used in this work, are explained.

On a second stage, the 67 rock joints that are included in this work, were tested following the procedure recommended by Barton & Choubey (1977) for the determination of the parameters that define the Barton model: shear tests performed under low normal stresses (push, pull and tilt tests), and Schmidt hammers tests. With results from these tests, and with some considerations required by each one, the Barton models parameters regarding shear (JRC , JCS and ϕ_r) are calculated.

Finally, the shear strength of the joints for given normal stresses is evaluated and these results are compared with the Coulomb model that was used to reproduce the results of direct shear tests that had been performed in LNEC on the same rock joint samples. Several conclusion regarding the comparison of the results from both models, which is the main objective of this work, are forwarded.

KEY WORDS: rock joints, Coulomb model, Barton model, shear strength parameters, laboratory tests.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. Introdução	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2. Descontinuidades	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	6
2.2.1. ASPETOS GERAIS	6
2.2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E FÍSICA	8
2.2.2.1. Abertura e Enchimento	9
2.2.2.2. Rugosidade	9
2.2.3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	11
2.3. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS NO COMPORTAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO	12
2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	12
2.3.2. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES	13
3. Resistência tangencial de descontinuidades rochosas ...	17
3.1. INTRODUÇÃO	17
3.2. COMPORTAMENTO TANGENCIAL DE DESCONTINUIDADES	17
3.3. CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA TANGENCIAL DE DESCONTINUIDADES	23
3.3.1. CRITÉRIO DE COULOMB	23
3.3.2. CRITÉRIO DE PATTON	24
3.3.3. CRITÉRIO DE BARTON	26

4. Ensaios laboratoriais para a determinação dos parâmetros do modelo de Barton	31
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	31
4.2. ENSAIO DE DESLIZAMENTO SEM FORÇA NORMAL (<i>PUSH TEST</i>)	31
4.2.1. DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO	32
4.2.1.1. Calibração dos transdutores.....	32
4.2.1.2. Ensaios experimentais	35
4.2.2. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO UTILIZADOS NO ENSAIO SEM FORÇA NORMAL (<i>PUSH</i>)	36
4.2.2.1. Equipamento.....	36
4.2.2.2. Procedimento do ensaio	39
4.3. ENSAIO SEM FORÇA NORMAL (<i>PULL TESTS</i>)	40
4.3.1. EQUIPAMENTO	40
4.3.2. PROCEDIMENTO	41
4.4. ENSAIO DE INCLINAÇÃO PROGRESSIVA (<i>TILT TESTS</i>)	42
4.4.1. DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO	42
4.4.2. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO	43
4.5. MARTELO DE SCHMIDT	45
4.5.1. EQUIPAMENTO	45
4.5.2. PROCEDIMENTO	45
5. Resultados dos ensaios laboratoriais	49
5.1. DESCRIÇÃO DOS PROVETES ENSAIADOS	49
5.2. ENSAIO DE DESLIZAMENTO SEM FORÇA NORMAL (<i>PUSH TESTS</i>).....	51
5.3. ENSAIO SEM FORÇA NORMAL (<i>PULL TESTS</i>)	57
5.4. ENSAIO DE INCLINAÇÃO PROGRESSIVA NAS SUPERFÍCIES NATURAIS DAS DIACLASES (<i>TILT TESTS</i>)	63
5.5. ENSAIO DE INCLINAÇÃO PROGRESSIVA DAS SUPERFÍCIES SERRADAS (<i>TILT TESTS</i>)	72
5.6. MARTELO DE SCHMIDT	81
6. Análise de resultados	83
6.1. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE BARTON	83
6.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS A TENSÕES NORMAIS BAIXAS.....	87
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CONJUNTOS DE DIACLASES	89

7. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS.....	103
Anexo A Gráficos do ensaio de deslizamento sem força normal	105
Anexo B Parâmetros estatísticos básicos dos ensaios	123
Anexo C Gráficos do modelo de Barton	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Fotografias da barragem de Malpasset antes e depois da rotura e da margem esquerda em que são bem visíveis os planos de descontinuidade por onde se deu a rotura (adaptado de Duffaut 2013)	2
Fig. 2 - Vista da cicatriz da rotura da encosta do reservatório da barragem de Vajont (adaptado de http://en.wikipedia.org/wiki/Vajont_Dam)	2
Fig. 3 - Metodologia para a determinação dos parâmetros do modelo de Barton (Barton 1999)	3
Fig. 4 – Maciço rochoso com forte influência de ações tectónicas (adaptado de Geologia de Engenharia 2014)	6
Fig. 5 – Diaclases no maciço granítico de fundação de uma ponte (adaptado de Geologia de Engenharia 2014)	7
Fig. 6 – Representações esquemáticas de descontinuidades com diferentes condições de abertura e enchimento: a) descontinuidade fechada; b) descontinuidade aberta; c) descontinuidade preenchida	9
Fig. 7 – Diferentes escalas da rugosidade (adaptado de Brady e Brown, 2005)	10
Fig. 8 – Perfil tipo de rugosidade (adaptado de Hoek 2007)	10
Fig. 9 – Perfis típicos de rugosidade e respetivas designações (adaptado de ISRM 1981)	12
Fig. 10 – Representações gráficas de distintos modelos de persistência de várias famílias de descontinuidades (adaptado de ISRM 1981)	14
Fig. 11 – Representação esquemática das dimensões da estrutura em relação à estrutura do maciço rochoso e ao espaçamento entre as descontinuidades (adaptado de González de Vallejo 2002)	15
Fig. 12 - Corte esquemático dum tipo de máquina de ensaio de deslizamento, utilizada para determinação da resistência tangencial de descontinuidades (adaptado de Hoek 2007)	18
Fig. 13 - Ensaio de corte de descontinuidades planas e lisas: a) Esquema das tensões atuantes num ensaio de deslizamento; b) Comportamento típico para ensaio de deslizamento conduzido em condições de carga normal constante; c) Envolventes de rotura teóricas para os valores de resistência de pico e resistência residual. (adaptado de Hoek 2007)	19
Fig. 14 - Curvas da tensão tangencial – deslocamento tangencial para descontinuidades planas e lisas ensaiadas com $\sigma_n = 1$ MPa (adaptado de Geologia de Engenharia 2014)	20
Fig. 15 - Curvas tensão tangencial – deslocamento tangencial e deslocamento normal – deslocamento tangencial para descontinuidades rugosas ensaiadas com $\sigma_n = 1.5$ MPa (adaptado de Geologia de Engenharia 2014)	20
Fig. 16 – Exemplo de curvas (τ, δ_t) e (δ_n, δ_t) para descontinuidades ensaiadas sob tensão normal muito baixa	22
Fig. 17 - Ensaio de deslizamento de descontinuidades. a) curvas (τ, δ_t) para vários valores de σ_n ; b) envolventes de rotura teóricas para valores de resistências de pico e residual (adaptado Brady e Brown 2005)	22
Fig. 18 – Modelo teórico usado por Patton (1966) para ilustrar o efeito da rugosidade na resistência tangencial numa descontinuidade: a) Pormenor numa superfície de descontinuidade inclinada e das	

tensões mobilizadas na mesma; b) Superfície idealizada no modelo (adaptado de González de Vallejo 2002).....	24
Fig. 19 – Envolvente bilinear de rotura de pico obtida de ensaios de deslizamento no modelo de Patton (1966) (adaptado Grasselli 2001)	26
Fig. 20 – Perfis tipo utilizados para estimar JRC visualmente (adaptado de Barton e Choubey 1977)28	
Fig. 21 – Equipamento utilizado para a calibração dos transdutores	33
Fig. 22 – Relações ($F_{mola,\delta}$) referentes aos transdutores dos deslocamentos tangenciais	33
Fig. 23 - Relações ($F_{mola,\delta}$) referentes aos transdutores dos deslocamentos normais.....	34
Fig. 24 - Variação da força tangencial máxima e da força tangencial média, com uma variação da velocidade do ensaio, para os ensaios experimentais (proвете 305)	36
Fig. 25 - Comparação gráfica das curvas ($F_t, \delta_{t,m}$) dos oito ensaios experimentais realizados no provete 305.....	37
Fig. 26 – Máquina utilizada para a realização do ensaio de deslizamento a tensão normal muito baixa	38
Fig. 27 – Pormenor da solução de baixo atrito na interação provete-encosto e do quadro de <i>perspex</i> em forma de U para a interação provete-transdutores	38
Fig. 28 – Pormenor da adequada montagem de todos os transdutores.....	39
Fig. 29 – Equipamento utilizado no ensaio pull.....	40
Fig. 30 – Montagem do provete para a realização do ensaio pull	41
Fig. 31 – Aplicação da força horizontal no sistema do ensaio pull até ocorrer deslizamento.....	41
Fig. 32 – Representação esquemática da metade superior de um provete sobre uma superfície inclinada em relação ao plano horizontal	42
Fig. 33 – Plataforma rígida usada para a realização dos ensaios de inclinação progressiva	44
Fig. 34 – Colocação do provete sobre a plataforma do ensaio de inclinação progressiva.....	44
Fig. 35 – Inclinação progressiva da plataforma do ensaio até ocorrer deslizamento	44
Fig. 36 – Equipamento utilizado para determinar o valor do ressalto do martelo de Schmidt.....	45
Fig. 37 – Colocação da metade do provete com superfície de diaclase natural na caixa e conseqüente aplicação do impacto sobre a superfície por parte do martelo de Schmidt	46
Fig. 38 – Pormenor dos pontos de impacto do martelo de Schmidt numa superfície de diaclase serrada.....	46
Fig. 39 – Preparação das superfícies serradas das diaclases com a mó.....	47
Fig. 40 - Exemplo de gráficos (τ, δ_t) e (δ_n, δ_t) de um ensaio de deslizamento de diaclase (proвете 132)	50
Fig. 41 - Exemplo de gráfico (τ, σ_n) de um ensaio de deslizamento de diaclase com a respetiva envolvente de Mohr-Coulomb (proвете 132)	51
Fig. 42 – Exemplo dos gráficos ($F_t, \delta_{t,m}$) e ($\delta_n, \delta_{t,m}$) obtidos no ensaio push (proвете 132)	53
Fig. 43 – Exemplo do gráfico ($\tau, \delta_{t,m}$) obtido no ensaio push (proвете 132).....	53

Fig. 44 – Exemplo do gráfico ($\sigma_n, \delta_{t,m}$) obtido no ensaio push (provetes 132).....	54
Fig. 45 – Exemplo dos gráficos ($\tau, \delta_{t,m}$) e ($\delta_{n,m}, \delta_{t,m}$) do ensaio push utilizados para inferir os valores da tensão tangencial resistente e do ângulo de dilatância (provetes 132).....	54
Fig. 46 – Resultados do ensaio pull para o grupo de diaclases de granitos	57
Fig. 47 – Resultados do ensaio pull para o grupo de diaclases de rochas granitóides.....	58
Fig. 48 - Resultados do ensaio pull para o grupo de diaclases de grauvaques e metagrauvaques	58
Fig. 49 - Resultados do ensaio pull para o grupo das restantes diaclases	59
Fig. 50 – Evolução do valor da média da força tangencial das diaclases de granitos de grão grosseiro	60
Fig. 51 - Evolução do valor da mediana da força tangencial das diaclases de granitos de grão grosseiro.....	60
Fig. 52 - Evolução do valor da média da força tangencial das diaclases de rochas granitóides	61
Fig. 53 - Evolução do valor da mediana da força tangencial das diaclases de rochas granitóides	61
Fig. 54 - Evolução do valor da média da força tangencial das diaclases de grauvaques e metagrauvaques.....	61
Fig. 55 - Evolução do valor da mediana da força tangencial das diaclases de grauvaques e metagrauvaques.....	62
Fig. 56 - Evolução do valor da média da força tangencial das restantes diaclases	62
Fig. 57 - Evolução do valor da mediana da força tangencial das restantes diaclases	62
Fig. 58 - Resultados do ensaio tilt para as superfícies naturais de diaclases de granitos de grão grosseiro.....	64
Fig. 59 - Resultados do ensaio tilt para as superfícies naturais de diaclases de rochas granitóides...	65
Fig. 60 - Resultados do ensaio tilt para as superfícies naturais de diaclases de grauvaques e metagrauvaques.....	65
Fig. 61 - Resultados do ensaio tilt para as superfícies naturais das restantes diaclases.....	66
Fig. 62 – Evolução do valor da média do ângulo de atrito das diaclases de granitos de grão grosseiro	66
Fig. 63 – Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito das diaclases de granitos de grão grosseiro.....	67
Fig. 64 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito das diaclases de rochas granitóides	67
Fig. 65 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito das diaclases de rochas granitóides	68
Fig. 66 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito das diaclases de grauvaques e metagrauvaques.....	68
Fig. 67 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito das diaclases de grauvaques e metagrauvaques.....	69
Fig. 68 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito das restantes diaclases.....	69
Fig. 69 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito das restantes diaclases.....	70

Fig. 70 – Diferença da mediana (α) pelo valor da determinação nas diaclases de granitos de grão grosseiro	70
Fig. 71 – Diferença da mediana (α) pelo valor da determinação nas diaclases de rochas granitóides	70
Fig. 72 – Diferença da mediana (α) pelo valor da determinação nas diaclases de grauvaques e metagrauvaques	71
Fig. 73 – Diferença da mediana (α) pelo valor da determinação nas restantes diaclases	71
Fig. 74 - Resultados do ensaio tilt para as superfícies serradas de diaclases de granitos de grão grosseiro	73
Fig. 75 - Resultados do ensaio tilt para as superfícies serradas de diaclases de rochas granitóides ..	73
Fig. 76 - Resultados do ensaio tilt para as superfícies serradas de diaclases de grauvaques e metagrauvaques	74
Fig. 77 - Resultados do ensaio tilt para as superfícies serradas das restantes diaclases.....	74
Fig. 78 – Evolução do valor da média do ângulo de atrito básico das diaclases de granitos de grão grosseiro	75
Fig. 79 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito básico das diaclases de granitos de grão grosseiro	75
Fig. 80 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito básico das diaclases de rochas granitóides	76
Fig. 81 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito básico das diaclases de rochas granitóides	76
Fig. 82 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito básico das diaclases de grauvaques e metagrauvaques	77
Fig. 83 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito básico das diaclases de grauvaques e metagrauvaques	77
Fig. 84 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito básico das restantes diaclases.....	78
Fig. 85 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito básico das restantes diaclases.....	78
Fig. 86 – Diferença da mediana (ϕ_b) pelo valor da determinação nas diaclases de granitos de grão grosseiro	78
Fig. 87 – Diferença da mediana (ϕ_b) pelo valor da determinação nas diaclases de rochas granitóides	79
Fig. 88 – Diferença da mediana (ϕ_b) pelo valor da determinação nas diaclases de grauvaques e metagrauvaques	79
Fig. 89 – Diferença da mediana (ϕ_b) pelo valor da determinação nas restantes diaclases	79
Fig. 90 – Exemplo do gráfico ângulo de atrito – tensão normal normalizada do modelo de Barton para o provete 132.....	85
Fig. 91 – Exemplo do gráfico da tensão tangencial – tensão normal para o provete 132	86
Fig. 92 – Comparação entre os ensaios pull e push	87
Fig. 93 – Comparação entre os ensaios push e tilt	88

Fig. 94 – Comparação entre os ensaios tilt e pull	89
Fig. 95 – Histograma de JRC para o conjunto de diaclases de granitos	90
Fig. 96 – Histograma de JCS para o conjunto de diaclases de granitos	90
Fig. 97 – Histograma de ϕ_r para o conjunto de diaclases de granitos	90
Fig. 98 – Histograma de JRC para o conjunto de diaclases de granitóides	91
Fig. 99 – Histograma de JCS para o conjunto de diaclases de granitóides	91
Fig. 100 – Histograma de ϕ_r para o conjunto de diaclases de granitóides	91
Fig. 101 – Histograma de JRC para o conjunto de diaclases de grauvaques	92
Fig. 102 – Histograma de JCS para o conjunto de diaclases de grauvaques	92
Fig. 103 – Histograma de ϕ_r para o conjunto de diaclases de grauvaques	92
Fig. 104 – Gráficos ângulo de atrito – tensão normal normalizada das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de granitos	94
Fig. 105 – Gráficos tensão tangencial – tensão normal das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de granitos	94
Fig. 106 – Gráficos ângulo de atrito – tensão normal normalizada das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de granitóides.....	95
Fig. 107 – Gráficos tensão tangencial – tensão normal das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de granitóides	95
Fig. 108 – Gráficos ângulo de atrito – tensão normal normalizada das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de grauvaques	96
Fig. 109 – Gráficos tensão tangencial – tensão normal das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de grauvaques	96

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da rugosidade de descontinuidades (ISRM 1981)	11
Tabela 2 – Taxa de deslocamento tangencial usada em cada ensaio experimental	35
Tabela 3 – Comparação da força tangencial nos oito ensaios experimentais realizados no provete 305	35
Tabela 4 – Valores da tensão tangencial resistente média ($\tau_{méd.}$) e máxima ($\tau_{máx.}$), dos ângulos de atrito correspondentes às mesmas e dos ângulos de dilatação para todos os provetes no ensaio push	55
Tabela 5 – Valores dos parâmetros estatísticos dos ensaios pull do provete 132	58
Tabela 6 – Resultados dos ensaios pull	63
Tabela 7 - Valores dos parâmetros estatísticos básicos do ensaio tilt do provete 132	65
Tabela 8 - Resultados dos ensaios tilt nas superfícies naturais das diaclases	71
Tabela 9 - Valores dos parâmetros estatísticos básicos referentes ao ensaio tilt numa superfície serrada	73
Tabela 10 - Resultados dos ensaios tilt nas superfícies serradas das diaclases	80
Tabela 11 – Resultados dos ensaios com o martelo de Schmidt nas superfícies naturais e serradas das diaclases	81
Tabela 12 – Exemplo do cálculo dos parâmetros do modelo de Barton para o provete 132	84
Tabela 13 – Exemplo do cálculo dos parâmetros do modelo de Barton para os conjuntos de diaclases	89

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

A – área nominal da superfície da diaclase

c – coesão aparente

F – força tangencial no ensaio *pull*

F_{mola} – força na mola do transdutor

F_t – força tangencial no ensaio de deslizamento sem força normal

i – ângulo de incidência ou ângulo de dilatância

M_d – momento de derrube

M_e – Momento estabilizador

r - valor do ressalto do martelo de Schmidt na superfície natural da diaclase

r_N - valor do ressalto do martelo de Schmidt do tipo N na superfície natural da diaclase

r_L - valor do ressalto do martelo de Schmidt do tipo L na superfície natural da diaclase

R - valor do ressalto do martelo de Schmidt na superfície serrada da diaclase

T – força de corte

W – peso da metade superior do provete

W_t – peso total exercido sobre a diaclase no ensaio de deslizamento sem força normal

α – ângulo de atrito determinado nos ensaios preconizados por Barton

β_l – ângulo de inclinação limite do ensaio de inclinação progressiva

δ – deslocamento do transdutor

δ_n – deslocamento normal

$\delta_{n,1}$ – deslocamento normal medido pelo transdutor 1

$\delta_{n,2}$ – deslocamento normal medido pelo transdutor 2

$\delta_{n,3}$ – deslocamento normal medido pelo transdutor 3

$\delta_{n,4}$ – deslocamento normal medido pelo transdutor 4

$\delta_{n,m}$ – deslocamento normal médio

δ_t – deslocamento tangencial

$\delta_{t,1}$ – deslocamento tangencial medido pelo transdutor 1

$\delta_{t,2}$ – deslocamento tangencial medido pelo transdutor 2

$\delta_{t,m}$ – deslocamento tangencial médio

$\delta_{t,p}$ – deslocamento tangencial de pico

ϕ – ângulo de atrito

ϕ_b – ângulo de atrito básico

ϕ_r – ângulo de atrito residual

σ_n – tensão normal

σ_{n0} – tensão normal aplicada nos ensaios a tensão normal baixa preconizados por Barton

τ – tensão de corte ou tensão tangencial

$\tau_{méd.}$ – tensão tangencial resistente média

$\tau_{máx.}$ – tensão tangencial resistente máxima

τ_r – tensão residual ou resistência residual

ABREVIATURAS

CV – coeficiente de variação

DP – desvio padrão

EE – ensaio experimental

Fig - Figura

HP - Hewlett Packard

ISRM - International Society for Rock Mechanics (Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas)

JCS - resistência das superfícies da diaclase (Joint-wall Compressive Strength)

JRC - coeficiente de rugosidade da diaclase (Joint Roughness Coefficient)

máx. – máxima ou máximo

méd. – média ou médio

ACRÓNIMOS

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

1

Introdução

1.1. ENQUADRAMENTO

Este trabalho insere-se no domínio da mecânica das rochas, mais concretamente no estudo do comportamento mecânico dos maciços rochosos. O conhecimento do comportamento mecânico dos maciços rochosos é fundamental para o estudo da estabilidade das obras de engenharia fundadas ou inseridas neste tipo de maciços, nomeadamente fundações de barragens de betão ou grandes pontes, e taludes rochosos ou escavações subterrâneas.

Este comportamento é extremamente complexo devido à presença de descontinuidades, ou seja, o maciço rochoso apresenta-se como um meio descontínuo e anisotrópico, eventualmente heterogéneo, composto por dois tipos de entidades: a matriz rochosa e as respetivas descontinuidades. Por matriz rochosa entende-se a rocha intacta existente entre descontinuidades, que representa a maior parte do volume do maciço. O termo descontinuidade refere-se a uma superfície de separação ou uma quebra na continuidade espacial de um material, caracterizada por uma resistência à tração muito baixa ou igual a zero (Hudson e Harrison 1997), para além de possuírem igualmente uma resistência tangencial bastante inferior à da rocha intacta (Rocha 1981). Assim, as superfícies de descontinuidade existentes nos maciços rochosos são extremamente importantes, uma vez que dão lugar a variações bruscas de propriedades físicas e, conseqüentemente, condicionam o comportamento dos mesmos. A maior parte dos casos de rotura de maciços rochosos é devida ao deslizamento ao longo de superfícies de descontinuidade. Apesar de existirem muitos exemplos na bibliografia, os acidentes de Malpasset (Fig. 1) e Vajont (Fig. 2) são dos mais conhecidos.

Assim, dado que as descontinuidades constituem superfícies de baixa resistência no maciço, conferindo ao mesmo uma significativa anisotropia, é fundamental caracterizar a resistência ao deslizamento dessas superfícies. Para além da caracterização geológica que pode ser feita no terreno, é normal recorrer-se a ensaios para a caracterização das propriedades mecânicas. Como os ensaios *in situ*, sobre diaclases com cerca de 1 m², são de difícil execução e caros, geralmente são feitos somente ensaios em laboratório sobre um maior número de amostras de menores dimensões (cerca de 100 cm²).

Os modelos para descrever a resistência tangencial de descontinuidades mais conhecidos e utilizados em mecânica das rochas são os modelos de Coulomb e de Barton.



Fig. 1 - Fotografias da barragem de Malpasset antes e depois da rotura e da margem esquerda em que são bem visíveis os planos de descontinuidade por onde se deu a rotura (adaptado de Duffaut 2013)



Fig. 2 - Vista da cicatriz da rotura da encosta do reservatório da barragem de Vajont (adaptado de http://en.wikipedia.org/wiki/Vajont_Dam)

1.2. OBJETIVOS

No âmbito do presente trabalho, pretende-se comparar os modelos de comportamento tangencial de Coulomb e de Barton, com recurso a resultados de ensaios laboratoriais, de modo a perceber eventuais diferenças entre os dois modelos e como podem ser úteis na caracterização da resistência tangencial de diaclases.

O primeiro objetivo consiste na realização dos ensaios laboratoriais, preconizados por Barton e Choubey (1977), sobre um conjunto de diaclases, para a determinação dos parâmetros do modelo idealizado pelo mesmo autor (JRC , JCS e ϕ_r). A metodologia de determinação destes parâmetros com base em ensaios laboratoriais encontra-se representada na Fig. 3.

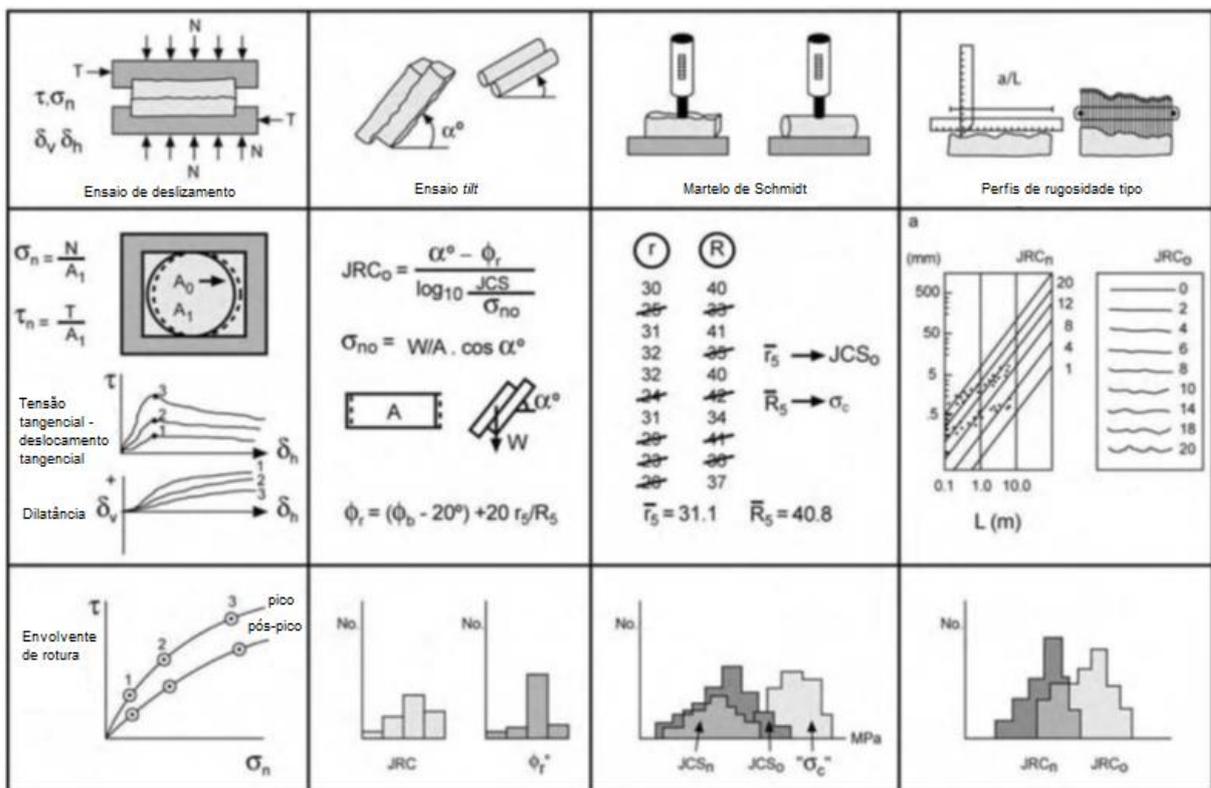


Fig. 3 - Metodologia para a determinação dos parâmetros do modelo de Barton (adaptado de Barton 1999)

Refere-se desde já que não foi considerada a comparação visual das diaclases com os perfis de rugosidade tipo para determinação de JRC por se considerar que se trata de uma técnica subjetiva e que só deve ser seguida quando não é possível realizar ensaios. Neste caso, são realizados vários tipos de ensaios sob tensões normais baixas (ensaios sem força normal aplicada de dois tipos e ensaios de inclinação progressiva).

O segundo objetivo do trabalho passa por comparar os modelos de Coulomb e Barton para a caracterização da resistência tangencial de diaclases. Fazendo a comparação dos parâmetros de Coulomb (coesão aparente e ângulo de atrito), determinados a partir de ensaios de deslizamento, com os parâmetros de Barton, referidos anteriormente, para diferentes níveis de tensão normal.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em sete capítulos, incluindo o presente capítulo, o qual corresponde à introdução, que denota a enquadramento e objetivos do presente trabalho, bem como a organização do mesmo. Os restantes capítulos que constituem a estrutura e corpo do trabalho, apresentam-se segundo a ordem de desenvolvimento e realização do trabalho. De forma resumida, no âmbito prático do trabalho, começou-se pela realização dos ensaios laboratoriais, seguida da apresentação dos resultados e análise dos mesmos. Da referida análise, determinaram-se os parâmetros necessários para a comparação dos dois modelos.

O capítulo 2, *Descontinuidades*, fala da importância da caracterização das descontinuidades presentes num maciço rochoso, atendendo aos processos de formação das mesmas, às suas características geométricas e mecânicas.

O capítulo 3, *Comportamento tangencial*, refere-se ao comportamento tangencial de descontinuidades, tendo em conta a interface das suas superfícies, e apresenta os modelos de comportamento com maior incidência na literatura da especialidade.

O capítulo 4, *Ensaios laboratoriais*, aborda vários ensaios necessários para o estudo do modelo de Barton, descrevendo para cada ensaio, se necessário, eventuais considerações prévias ao procedimento, o equipamento utilizado e o respetivo procedimento.

O capítulo 5, *Resultados*, apresenta os resultados diretos para cada um dos ensaios referido no capítulo anterior. Em seguida são apresentados os parâmetros estatísticos que descrevem estes resultados e com base nestes são efetuadas algumas considerações que levaram a considerar as medianas como o resultado representativo de cada ensaio.

No capítulo 6, *Análise de resultados*, determina-se, em primeiro lugar, os parâmetros do modelo de Barton para os diferentes ensaios realizados a tensões normais baixas. Posteriormente compara-se o modelo de Barton, para os ensaios referidos anteriormente, com o modelo de Coulomb, para os ensaios de deslizamento.

Finalmente, no capítulo 7, *Conclusões e desenvolvimentos futuros*, faz-se um resumo das conclusões e considerações mais importantes ao longo de todo o trabalho, realçando no final alguns aspetos importantes para o estudo da resistência tangencial de descontinuidades rochosas com base na metodologia adotada neste trabalho.

2

Descontinuidades

2.1. INTRODUÇÃO

Os maciços rochosos apresentam-se, na maioria dos casos, afetados por interrupções físicas ou superfícies de baixa resistência (Goodman 1989). O conjunto destas superfícies, fundamentais para a compartimentação do maciço, é responsável pela divisão do volume rochoso numa estrutura de blocos de rocha intacta. Às entidades supracitadas, que interrompem a continuidade física de um dada formação geológica, atribui-se a designação geral de descontinuidades, que podem ser de vários tipos e origens: diaclases, falhas, planos de sedimentação, foliação, clivagem ou xistosidade, contactos, veios, filões (Rocha 1981).

Os maciços rochosos são, assim, constituídos pelas referidas descontinuidades e pelos blocos de rocha intacta, o conjunto destas duas entidades imprime aos mesmos um carácter descontínuo e anisotrópico. Assim, o arranjo dos blocos de rocha intacta e das superfícies das descontinuidades é referido como maciço rochoso descontínuo. A rocha, numa prática de engenharia, é encontrada por norma em sequência descontínua e anisotrópica, a qual se deforma e rompe segundo interrupções mecânicas pré-existentes ou descontinuidades de origem geológica (Bandis 1980).

As descontinuidades são objeto de estudo da mecânica das rochas, imprimindo a esta disciplina um carácter distinto relativamente a disciplinas como a mecânica dos solos, por exemplo. É a existência de descontinuidades no maciço rochoso que torna a disciplina da mecânica das rochas única, pois trata de meios descontínuos, em contraste com as mecânicas dos meios contínuos (Hudson e Harrison 1997). O estudo das descontinuidades, no âmbito da mecânica das rochas, é assim imprescindível para perceber e prever o comportamento mecânico do maciço, atendendo à ação de forças internas e externas, dado o seu carácter descontínuo. O estudo das descontinuidades é fundamental na mecânica das rochas, pois são elas que controlam os processos de rotura e deformação dos maciços às cotas relativamente superficiais (até algumas centenas de metros de profundidade), onde se realizam a grande maioria das obras de engenharia (González de Vallejo 2002).

Dado o papel desempenhado pelas descontinuidades na compartimentação e comportamento dos maciços, e conseqüentemente a necessidade do seu estudo, é na prática fundamental proceder ao reconhecimento, descrição e caracterização das mesmas. Assim, para a caracterização das descontinuidades é fundamental o conhecimento das suas propriedades geométricas e mecânicas. No âmbito do presente trabalho, são de particular interesse as propriedades das descontinuidades que influenciam a sua resistência tangencial.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

2.2.1. ASPETOS GERAIS

Mesmo na prática de engenharia, as descontinuidades podem ser classificadas, em termos geológicos, de acordo com o seu processo de formação. O processo pelo qual uma descontinuidade foi formada têm, frequentemente, implicações nas suas propriedades geométricas e mecânicas, pelo que é sempre importante compreender a formação das descontinuidades recorrendo a princípios de geologia estrutural (Hudson e Harrison 1997). A relação da mecânica das rochas com a geologia estrutural é assim determinante devido ao estudo dos processos e estruturas tectónicas que afetam as rochas e, conseqüentemente, os maciços rochosos (González de Vallejo 2002). Este tipo de abordagem pode contribuir, de uma forma simples, para agrupar as descontinuidades com propriedades semelhantes, no que respeita às dimensões e propriedades de resistência ao deslizamento.

A tectónica tem particular interesse no âmbito da geologia e, conseqüentemente, no âmbito da mecânica das rochas, por estudar os fenómenos que dão origem às descontinuidades. Esta disciplina estuda os efeitos mecânicos das ações tectónicas sobre as formações geológicas, os quais levam à formação de interrupções mecânicas ou às descontinuidades nos maciços rochosos. Quando as formações geológicas estão sujeitas a significativas ações tectónicas, resultantes de movimentos da crosta terrestre, surgem tensões elevadas. Se estas tensões ultrapassarem o limite de resistência da rocha no interior da crosta terrestre, dá-se a rotura da mesma segundo planos com direções de resistência mínima em relação à direção da tensão atuante. Surgem, assim, interrupções na rocha quando esta deixa de ter capacidade de se deformar sem sofrer rotura. A Fig. 4 apresenta o exemplo de um maciço rochoso fortemente influenciado por ações tectónicas, cujo material constituinte apresenta uma evidente plasticidade, e com as respetivas descontinuidades resultantes das mesmas ações.



Fig. 4 – Maciço rochoso com forte influência de ações tectónicas (adaptado de Geologia de Engenharia 2014)

Fatores como o arrefecimento durante o processo de formação da rocha e a redução do recobrimento das formações geológicas por alteração e erosão das camadas sobrejacentes, dando origem a um alívio das tensões, são igualmente responsáveis pela formação de descontinuidades nos maciços rochosos (Rocha 1981). Os processos de formação de descontinuidades referidos incidem sobre todos os tipos de rocha, variando apenas a intensidade do processo, consoante o tipo de rocha.

Os tipos de descontinuidades mais frequentes na natureza, atendendo aos processos responsáveis pela sua gênese já referidos, são as falhas, as diaclases, as superfícies de estratificação, foliação e xistosidade, e as fraturas de clivagem. No processo de caracterização das descontinuidades, algumas, como as falhas, são geralmente estudadas individualmente. Outras, com idêntica orientação e gênese, ocorrendo em grande número no maciço, devem ser agrupadas em famílias e as suas propriedades geométricas e mecânicas estudadas com recurso a tratamentos estatísticos adequados.

No presente trabalho, as diaclases ganham um interesse exclusivo relativamente aos outros tipos de descontinuidades. No âmbito prático do trabalho, as descontinuidades a serem estudadas são exclusivamente diaclases, nas quais se pretende estudar a resistência tangencial.

As diaclases são as superfícies de descontinuidade mais frequentes nos maciços rochosos, correspondendo a superfícies de fracturação ou rotura da rocha, tratam-se de descontinuidades em que não houve deslocamento tangencial entre as suas paredes, ou em que este foi muito pequeno (González de Vallejo 2002). Por seu lado, Rocha (1981) refere que as diaclases são roturas macroscópicas, com um deslocamento desprezável entre as suas superfícies.

As diaclases surgem, por norma, na natureza em conjuntos, apresentando-se sensivelmente paralelas entre si, constituindo assim as denominadas famílias de diaclases. Já um conjunto de famílias de diaclases numa dada formação constitui um sistema de diaclases. A Fig. 5 ilustra um maciço bastante fraturado com três famílias de diaclases aproximadamente perpendiculares entre si.



Fig. 5 – Diaclases no maciço granítico de fundação de uma ponte (adaptado de Geologia de Engenharia 2014)

As designações geológicas para cada tipo de descontinuidade, podem, em aplicações práticas de engenharia, fornecer indicações acerca das propriedades das descontinuidades em estudo, sem necessidade de um estudo mais aprofundado. No entanto, estas designações geológicas não fornecem uma informação detalhada das propriedades das descontinuidades, servem, apenas para a compreensão das condições locais nas fases iniciais dos projetos de engenharia. O estudo geológico é, assim, fundamental para avaliar de forma expedita e em termos qualitativos, o provável comportamento mecânico dos maciços rochosos. No entanto, para avaliar quantitativamente o comportamento mecânico dos maciços, é necessário que as propriedades dos mesmos sejam descritas e medidas de forma objetiva e efetiva com o maior detalhe e precisão possíveis. Isto, para que se evitem acidentes, constrangimentos no plano económico e atrasos relativamente aos prazos estabelecidos no planeamento dos projetos.

2.2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E FÍSICA

As descontinuidades têm um influente papel no comportamento e compartimentação dos maciços rochosos, pelo que é fundamental proceder à sua caracterização recorrendo a parâmetros geométricos e características físicas das mesmas. Atendendo à compartimentação do maciço rochoso, os parâmetros que determinam a forma e dimensão dos blocos são a orientação e número de famílias, o desenvolvimento e o espaçamento. No que respeita ao comportamento dos maciços, interessam as características geométricas e físicas das superfícies das descontinuidades, pois apresentam uma marcada influência na sua resistência tangencial.

Na prática, ao investigar as descontinuidades, o primeiro passo consiste na análise da orientação e identificação das famílias de descontinuidades, ou descontinuidades singulares, que podem pôr em causa a estabilidade do maciço rochoso em estudo. A orientação, ou atitude, das superfícies das descontinuidades é definida pela direção e inclinação, onde a direção corresponde ao ângulo entre as linhas de nível da descontinuidade e o norte, e a inclinação o ângulo das linhas de maior declive com a horizontal. A associação da orientação e do número de famílias determina a forma dos blocos de rocha.

Os blocos de rocha intacta, compreendidos pelas descontinuidades, têm as suas dimensões definidas, essencialmente, pelo espaçamento e desenvolvimento ou persistência das descontinuidades. O espaçamento de uma família de descontinuidades é definido pela distância medida entre descontinuidades adjacentes da mesma família. Dada a sua grande variação, é costume caracterizá-la pelo valor médio. O desenvolvimento ou persistência define-se como a área da superfície de uma descontinuidade. Este último parâmetro tem uma forte influência no comportamento dos maciços rochosos, no entanto, é um dos mais difíceis de estimar devido à impossibilidade de medição direta das áreas das descontinuidades nas superfícies de maciço expostas.

Os parâmetros supracitados são, essencialmente, parâmetros geométricos das descontinuidades, usados com o objetivo de definir modelos geométricos, que idealizem o maciço rochoso constituído por blocos delimitados pelas descontinuidades. Estes modelos são particularmente úteis em análises numéricas.

Para uma análise, detalhada e precisa, da resistência e deformabilidade do maciço rochoso não basta, apenas, definir os parâmetros geométricos à escala global dos maciços, é necessário definir as características geométricas e físicas das superfícies das descontinuidades que influenciam o comportamento mecânico das mesmas. Assim, as características mais importantes a ter em conta, especialmente no caso de diaclases, são a abertura, o material de enchimento, a rugosidade e a resistência das paredes (González de Vallejo 2002).

2.2.2.1. Abertura e Enchimento

A abertura e o enchimento, ou preenchimento, têm uma grande influência em todos os parâmetros geotécnicos de um maciço rochoso, nomeadamente, resistência, deformabilidade e permeabilidade (Rocha 1981). A abertura é definida como a distância entre as paredes de uma dada descontinuidade. A abertura costuma apresentar uma grande variabilidade ao longo do comprimento da descontinuidade, especialmente em profundidade, devido à diminuição do grau de alteração e do incremento do estado de compressão (Rocha 1981). O enchimento é o termo usado para referir o material que preenche o espaço entre as paredes da descontinuidade, que pode ser muito diversificado. A Fig. 6 apresenta representações esquemáticas de descontinuidades com diferentes condições de abertura e enchimento.

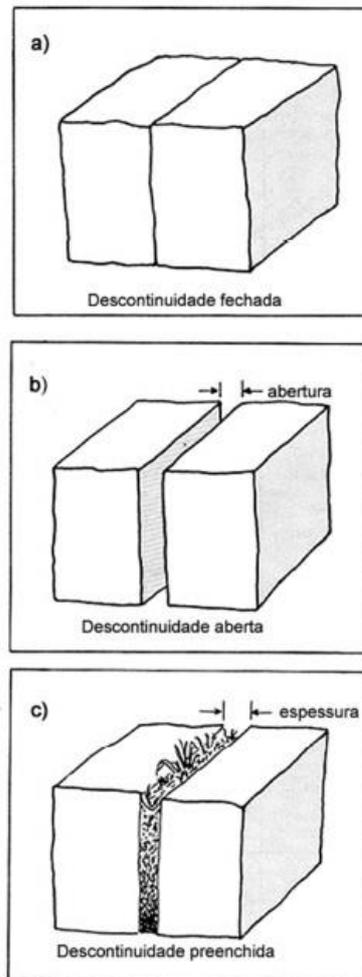


Fig. 6 – Representações esquemáticas de descontinuidades com diferentes condições de abertura e enchimento:
a) descontinuidade fechada; b) descontinuidade aberta; c) descontinuidade preenchida

2.2.2.2. Rugosidade

A rugosidade é uma característica relacionada com a morfologia da superfície das paredes das descontinuidades, cuja medida e descrição têm como principal finalidade avaliar a sua resistência tangencial. Na prática, caracteriza-se a rugosidade com base na escala de observação (Fig. 7). Em grande escala, a superfície de uma descontinuidade apresenta uma certa ondulação, que define a rugosidade de

primeira ordem. Estas ondulações não se manifestam à escala das amostras ensaiadas em laboratório ou *in situ*, e determinam a direção do deslizamento em relação ao plano médio da descontinuidade, pelo ângulo i . As asperezas são as irregularidades da superfície detetáveis a pequena escala e definem a rugosidade de segunda ordem. Assim, genericamente, a rugosidade pode ser identificada pelas ondulações de grande escala e pelas irregularidades superficiais de pequena escala para as dimensões habituais das amostras laboratoriais (Brady e Brown 2005). Estas últimas são vulgarmente designadas também por rugosidade, o que pode constituir alguma confusão.

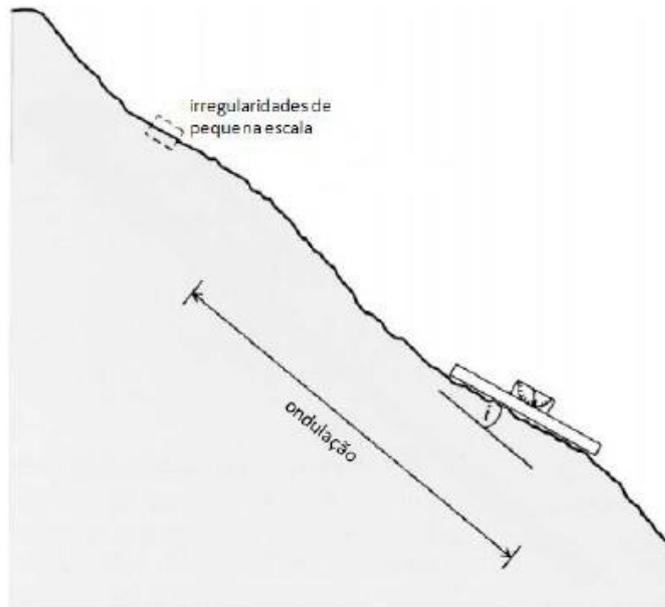


Fig. 7 – Diferentes escalas da rugosidade (adaptado de Brady e Brown, 2005)

A rugosidade define-se, então, em termos físicos, como uma medida das irregularidades e ondulações inerentes à superfície de descontinuidade em relação ao seu plano médio, ou outro paralelo a este (Fig. 8). A rugosidade pode apresentar valores diferentes consoante a direção em que é medida, pelo que, na prática, quando se pretende estudar um problema que envolva a análise ao deslizamento, é fundamental averiguar a direção provável do movimento, o que no caso de taludes rochosos pode ser fácil, mas em outras obras pode ser bastante mais complexo ou mesmo impossível.

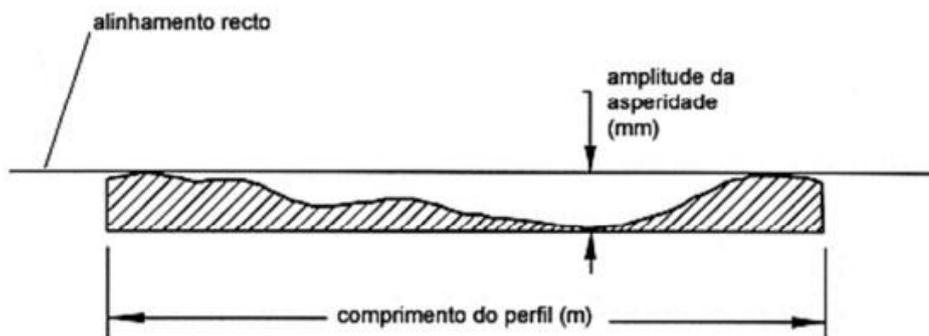


Fig. 8 – Perfil tipo de rugosidade (adaptado de Hoek 2007)

A rugosidade pode ser medida no campo com diversos métodos, dependendo da precisão requerida, da escala de medição ou da acessibilidade ao afloramento rochoso, incluindo desde descrições qualitativas a medidas quantitativas (González de Vallejo 2002). Na fase inicial da caracterização geotécnica, a descrição da rugosidade é, por vezes, limitada à utilização de termos qualitativos, baseando-se numa rápida e fácil comparação visual, de carácter subjetivo, com perfis de referência de rugosidade e na escala de observação. Atendendo ao referido, a ISRM sugere que os termos listados na Tabela 1 e ilustrados na Fig. 9 podem ser usados para descrever a rugosidade a uma escala pequena (vários centímetros) e intermédia (vários metros).

Tabela 1 – Classificação da rugosidade de descontinuidades (ISRM 1981)

Classe	Descrição
I	Rugosa ou irregular, em patamares
II	Lisa, em patamares
III	Espelhada, em patamares
IV	Rugosa ou irregular, ondulada
V	Lisa, ondulada
VI	Espelhada, ondulada
VII	Rugosa ou irregular, planar
VIII	Lisa, planar
IX	Espelhada, planar

Em fases avançadas da caracterização geotécnica, onde o detalhe e a precisão são requeridos, a caracterização da rugosidade não passa por uma simples designação qualitativa. Atendendo à importância da rugosidade no comportamento tangencial duma descontinuidade, a sua caracterização deve ser feita segundo métodos quantitativos baseados em análises a posteriori dos resultados de ensaios em laboratório ou no campo. No âmbito do presente trabalho, os métodos preconizados por Barton e Choubey (1977), para uma estimativa quantitativa da rugosidade, são apresentados e estudados nos próximos capítulos.

2.2.3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para uma análise detalhada do comportamento mecânico das descontinuidades, e conseqüentemente do maciço rochoso, é necessário avaliar corretamente as características mecânicas das descontinuidades. A correta avaliação da resistência tangencial e da rigidez da superfície de uma descontinuidade é imperativa. Como consequência, a caracterização da resistência das paredes é indispensável. No âmbito deste trabalho, o estudo do comportamento tangencial das diaclases é o principal objetivo e será abordado nos próximos capítulos. Relativamente ao presente capítulo, interessa perceber a importância da resistência das paredes de uma descontinuidade no comportamento da mesma.

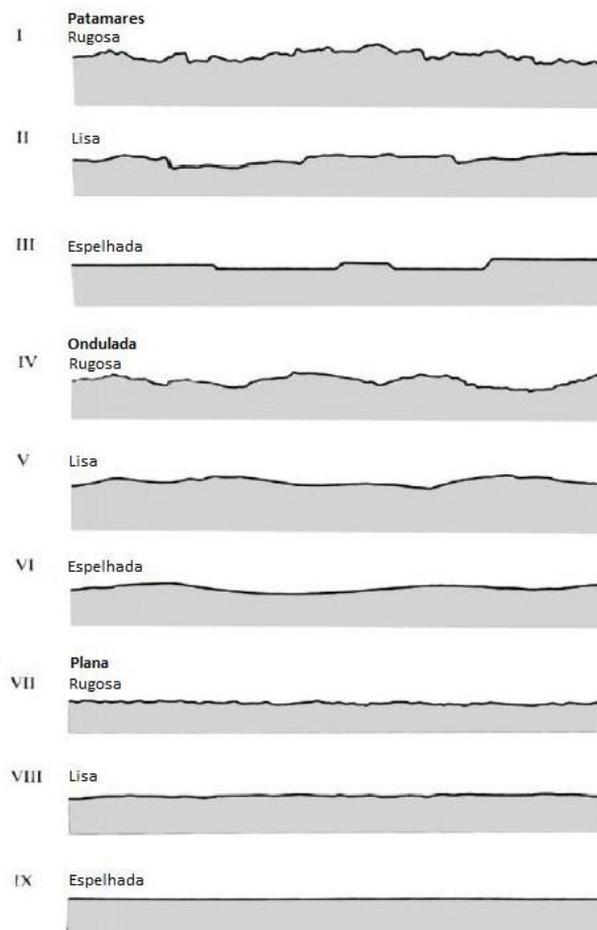


Fig. 9 – Perfis típicos de rugosidade e respectivas designações (adaptado de ISRM 1981)

A resistência da parede de uma descontinuidade depende do tipo de matriz rochosa, do grau de alteração e da presença ou não de enchimento. Os efeitos da alteração e da meteorização afetam com maior incidência as paredes das descontinuidades do que o interior do maciço, logo, a resistência das paredes é apenas uma fração da do material rocha dos blocos. O estado de alteração da rocha junto às paredes das descontinuidades, principalmente se estas estiverem fechadas, isto é, se houver contato entre os dois bordos, tem forte influência na resistência ao corte dos maciços rochosos e condiciona a sua deformabilidade (González de Vallejo 2002).

A resistência das paredes pode ser estimada através do martelo de Schmidt, aplicando o mesmo diretamente sobre a descontinuidade. O procedimento do ensaio e respectiva determinação quantitativa da resistência das paredes são aspectos abordados no capítulo 4.

2.3. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS NO COMPORTAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO

2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No comportamento mecânico dos maciços rochosos as características geológicas são as mais influentes, ao contrário do que se passa na rocha intacta, também denominada matriz rochosa, sendo nesta as propriedades físicas as mais influentes. Assim, as características geológicas mais relevantes no

comportamento mecânico dos maciços rochosos são, nomeadamente, a litologia e estratigrafia, a estrutura geológica, as descontinuidades, os estados de tensão *in situ*, etc. A estas características juntam-se os processos de alteração e meteorização resultantes das condições hidrogeológicas e ambientais, assim como os fenómenos meteorológicos e do clima.

Nos maciços rochosos quando se modificam as condições iniciais, devido à ação de forças externas ou internas, as deformações e roturas dos mesmos dão-se segundo as superfícies das descontinuidades (González de Vallejo 2002). Como já foi referido, as descontinuidades são uma característica ou entidade geológica dos maciços rochosos que condicionam o seu comportamento mecânico, isto é, afetam a sua resistência e deformabilidade. Estas conferem ao maciço um carácter anisotrópico e descontínuo, tornando-o mais deformável e menos resistente, o que dificulta a avaliação do seu comportamento mecânico. As descontinuidades tornam o maciço rochoso menos competente, mais deformável e altamente anisotrópico por reduzirem a sua resistência tangencial segundo determinadas direções (Grasselli 2001). A presença de planos de descontinuidade reduz a resistência tangencial paralela a estes planos e a resistência à tração perpendicular aos mesmos. Por esta razão, a caracterização das descontinuidades, seja ela baseada em métodos empíricos, analíticos ou numéricos, apresenta um papel fundamental no dimensionamento de estruturas de engenharia sobre ou no interior do maciço rochoso (ISRM 1978).

Na análise de um maciço rochoso descontínuo, as propriedades das descontinuidades no maciço ganham importância primordial, devido ao fato de determinarem, em grande parte, o comportamento mecânico do maciço rochoso (Bieniawski 1989). O comportamento, em termos mecânicos, dos maciços rochosos e as suas propriedades geotécnicas são diferentes do material que os constitui, este fato deve-se essencialmente às propriedades das descontinuidades. A título de exemplo, na análise da estabilidade de certos maciços rochosos a geologia estrutural ganha particular importância na avaliação do comportamento mecânico dos mesmos, nomeadamente, nos casos em que a resistência da rocha apresenta um valor elevado em relação às solicitações atuantes. Assim, o estudo das propriedades geométricas das descontinuidades é fundamental para a estabilidade de projetos em maciços nas condições referidas, cuja resistência da rocha não seja condicionante.

2.3.2. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES

Os maciços rochosos, sendo um conjunto de blocos de matriz rochosa e de descontinuidades de variados tipos, apresentam-se mecanicamente como meios descontínuos, anisotrópicos e heterogêneos. O carácter descontínuo e anisotrópico dos maciços rochosos depende, em grande parte, para além das propriedades da matriz rochosa, das características das descontinuidades. A anisotropia dos maciços rochosos resulta pois do somatório da anisotropia da própria rocha e das famílias de descontinuidades que cortam os mesmos (Rocha 1981). A presença, no maciço, de descontinuidades com orientações preferenciais distribuídas de forma não aleatória, implica diferentes propriedades e comportamento mecânico segundo a direção considerada. Assim, as descontinuidades induzem no maciço rochoso direções preferenciais de baixa resistência que são determinadas, em grande parte, pela orientação das mesmas. A anisotropia dos maciços, resultante da ocorrência de famílias de diaclases, confere aos mesmos uma estrutura composta constituída de estruturas planas, associadas à orientação das famílias das diaclases. As orientações são, em regra, as mesmas dos planos de anisotropia da rocha no maciço (Rocha 1981).

A persistência das descontinuidades é uma característica que exprime o desenvolvimento destas, em termos de área, no maciço (Fig. 10), definindo se a matriz rochosa vai estar ou não envolvida nos processos de rotura do maciço e em que grau, aquela, condiciona os parâmetros resistentes do mesmo.

É importante destacar as famílias mais contínuas ou persistentes, já que, em geral, serão estas que condicionam os planos de rotura do maciço rochoso (González de Vallejo 2002). A persistência tem principal importância na estabilidade de maciços rochosos, designadamente em certos problemas de taludes, de fundações de barragens e de obras subterrâneas.

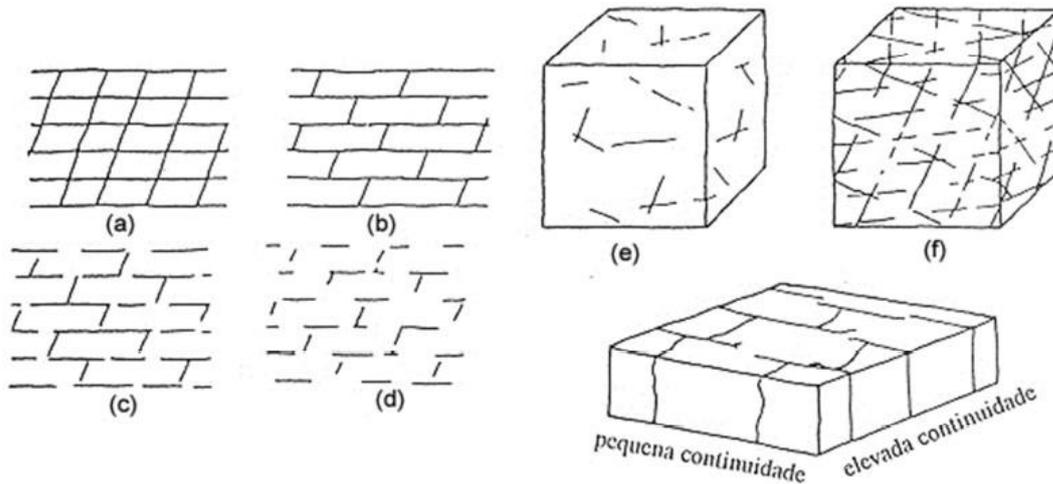


Fig. 10 – Representações gráficas de distintos modelos de persistência de várias famílias de descontinuidades (adaptado de ISRM 1981)

Tal como a persistência, o espaçamento das descontinuidades tem uma influência relevante na deformabilidade dos maciços, dada a sua relação com as dimensões da estrutura a implantar (Fig. 11). Famílias de descontinuidades com espaçamento apreciável tornam a deformabilidade da rocha intacta como a principal condicionante à deformabilidade do maciço. No caso de descontinuidades com espaçamentos pouco significativos, características de maciços muito fraturados, verifica-se que a deformabilidade do mesmo é fortemente condicionada pela deformabilidade das descontinuidades. Se os espaçamentos são pequenos, a resistência do maciço rochoso diminui de forma considerável, podendo em casos extremos apresentar um comportamento assimilável ao de materiais granulares sem coesão (González de Vallejo 2002).

O comportamento mecânico do maciço rochoso, sob determinadas condições de carregamento, resulta da conjugação da dimensão dos blocos e da resistência ao corte das descontinuidades que os delimitam. A resistência ao corte do maciço depende, assim, de parâmetros que definem a geometria das descontinuidades e da resistência ao corte destas. Assim, parâmetros como a rugosidade, a abertura, o enchimento e a resistência das paredes são condicionantes na avaliação da resistência tangencial das descontinuidades. A rugosidade tem especial influência na resistência ao deslizamento numa descontinuidade, quando esta se apresenta fechada e sem movimentos prévios. Diminuindo a sua influência, como fator favorável à resistência, com aumentos da abertura, da espessura do enchimento ou do valor do deslocamento devido a anteriores movimentos de escorregamento. A rugosidade aumenta a resistência ao corte, que decresce com o aumento da abertura e, em geral, com o aumento da espessura do enchimento (González de Vallejo 2002). Analogamente à rugosidade, para descontinuidades fechadas, a resistência das paredes têm também um importante papel na resistência ao deslizamento, uma vez que esta é, em regra, menor que a resistência da matriz rochosa por alteração e meteorização das respetivas superfícies.

No âmbito do presente trabalho têm particular destaque os mecanismos de rotura e o comportamento tangencial das diaclases. Assim, estes assuntos são discutidos e estudados com maior detalhe nos próximos capítulos.

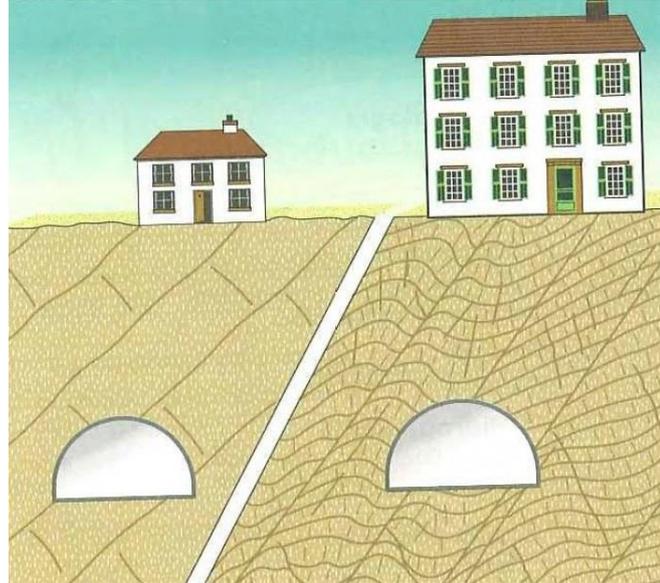


Fig. 11 – Representação esquemática das dimensões da estrutura em relação à estrutura do maciço rochoso e ao espaçamento entre as descontinuidades (adaptado de González de Vallejo 2002)

3

Resistência tangencial de descontinuidades rochosas

3.1. INTRODUÇÃO

A rotura de um sólido submetido a um estado de tensão de compressão, o mais comum na mecânica das rochas, dá-se por escorregamento ao longo de superfícies bem definidas (Rocha 1981). Assim, percebe-se que a deformação e rotura dos maciços rochosos são causadas pelo deslizamento ao longo de superfícies de descontinuidade individuais ou segundo direções paralelas às linhas de intersecção de superfícies.

A resistência dos maciços rochosos é função da resistência da matriz rochosa e das descontinuidades, sendo ambas extremamente variáveis (González de Vallejo 2002). A pequena profundidade, onde as tensões são normalmente reduzidas, e onde se realizam a maioria das obras de engenharia, a rotura da rocha intacta raramente é um problema, sendo o comportamento do maciço controlado principalmente pelo deslizamento ao longo das descontinuidades (Hoek 2007). Assim, para analisar a estabilidade dos maciços rochosos é necessário compreender os parâmetros e mecanismos que controlam a resistência ao corte das descontinuidades. Nesta medida, é imperativo distinguir descontinuidades com e sem preenchimento.

As descontinuidades preenchidas constituem um conjunto muito especial de problemas e a sua resistência ao corte depende principalmente das propriedades físicas e mineralógicas do material que separa as paredes da descontinuidade (Barton e Choubey 1977). Por sua vez, a resistência ao corte das descontinuidades sem preenchimento depende, além do nível da tensão normal efetiva que atua no plano do deslizamento, das propriedades das paredes da descontinuidade incluindo o tipo de rocha, o grau de rugosidade, o tamanho da descontinuidade (efeito de escala), o grau de alteração, a presença de humidade e a pressão da água (Grasselli 2001).

No âmbito deste trabalho, são discutidos os comportamentos de descontinuidades sem preenchimento, e consequentemente os critérios de rotura associados aos mesmos. Os critérios de rotura, linear de Coulomb, bilinear de Patton (1966) e não-linear de Barton (1977), que são a base do estado de arte, são, assim, devidamente analisados neste capítulo.

3.2. COMPORTAMENTO TANGENCIAL DE DESCONTINUIDADES

O estudo do comportamento mecânico de descontinuidades é baseado nas relações entre os esforços de corte aplicados e os deslocamentos tangenciais. O comportamento duma descontinuidade é, assim, na maioria dos casos, determinado segundo ensaios de deslizamento em laboratório (Fig. 12). Estes ensaios,

no âmbito da mecânica das rochas, são vantajosos para o estudo da resistência tangencial porque permitem medir facilmente os deslocamentos tangenciais (δ_t) e normais (δ_n) relativamente à superfície média da descontinuidade, numa amostra submetida a uma determinada tensão de corte (τ) na direção paralela à superfície e a uma tensão normal (σ_n) à superfície. Consequentemente, para a mesma amostra, realizando o ensaio para diferentes valores de tensão normal (σ_n), é possível caracterizar a resistência tangencial ao determinar a envolvente de rotura num diagrama (τ, σ_n), com recurso aos vários valores de tensão tangencial de pico ou residual obtidos nos ensaios (Muralha et al. 2014).

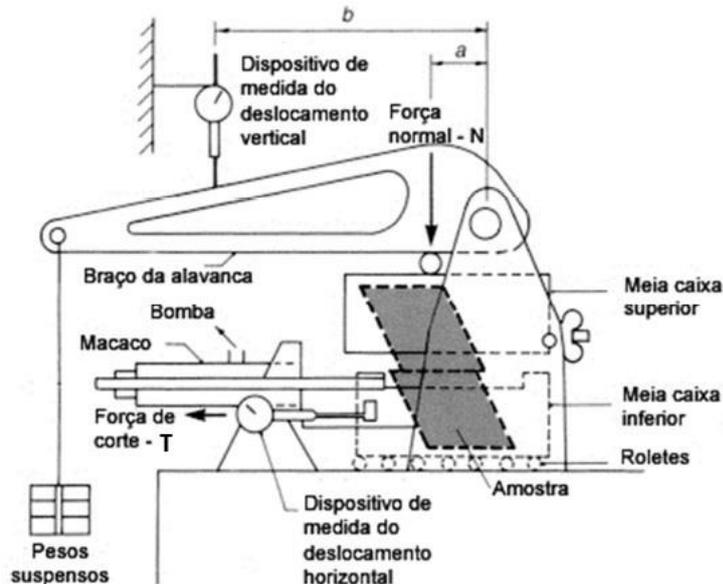


Fig. 12 - Corte esquemático dum tipo de máquina de ensaio de deslizamento, utilizada para determinação da resistência tangencial de descontinuidades (adaptado de Hoek 2007)

À parte do referido anteriormente, o requisito primordial para a determinação da resistência tangencial de uma descontinuidade consiste em preparar uma amostra de material rochoso que a inclua e seja verdadeiramente representativa da mesma. Assim, para a obtenção de amostras representativas de descontinuidades, é necessário, quando não é possível a sua obtenção em afloramentos à superfície, proceder à abertura de valas e trincheiras ou proceder à obtenção a maior profundidade por meio de galerias e poços, ou por execução de furos de sondagem, recorrendo à prospeção mecânica com recuperação.

O comportamento tangencial de descontinuidades dado por curvas (τ, δ_t), como ilustrado na Fig. 13, obtido nos ensaios de deslizamento, torna possível identificar os mecanismos que governam o corte. Assim, quando uma superfície rochosa desliza sobre outra, o atrito e a rugosidade das paredes controla o deslizamento, sendo fundamental distinguir o comportamento de descontinuidades planas e lisas do de descontinuidades rugosas, pois, neste tipo de ensaios, a diferença entre a resistência de pico e a residual é muito influenciada pela natureza das superfícies das descontinuidades (Rocha 1981).

Nos ensaios de deslizamento realizados em descontinuidades (Fig. 13), sob uma dada tensão normal constante, obtém-se curvas (τ, δ_t) de comportamento, como as indicadas na Fig. 13 b), onde é possível observar que, a partir de um certo deslocamento tangencial, o valor da tensão tangencial se mantém

aproximadamente constante ou com pequena variação para um acentuado aumento dos deslocamentos tangenciais. Anteriormente ao referido valor, para pequenos deslocamentos, a amostra tem um comportamento aproximadamente elástico, onde a tensão tangencial aumenta linearmente com o deslocamento. Quando se supera a força de resistência ao movimento, a curva torna-se não-linear e progressivamente tende para o valor da tensão tangencial de pico ou resistência de pico da descontinuidade.

Nos ensaios de deslizamento realizados em descontinuidades planas e lisas (Fig. 13), sob uma dada tensão normal constante, obtém-se curvas (τ, δ_i) de comportamento, como as indicadas na Fig. 14. Nesta figura, a tensão tangencial de pico é praticamente igual à tensão tangencial residual para grandes deslocamentos, significando que a resistência máxima é semelhante à resistência residual.

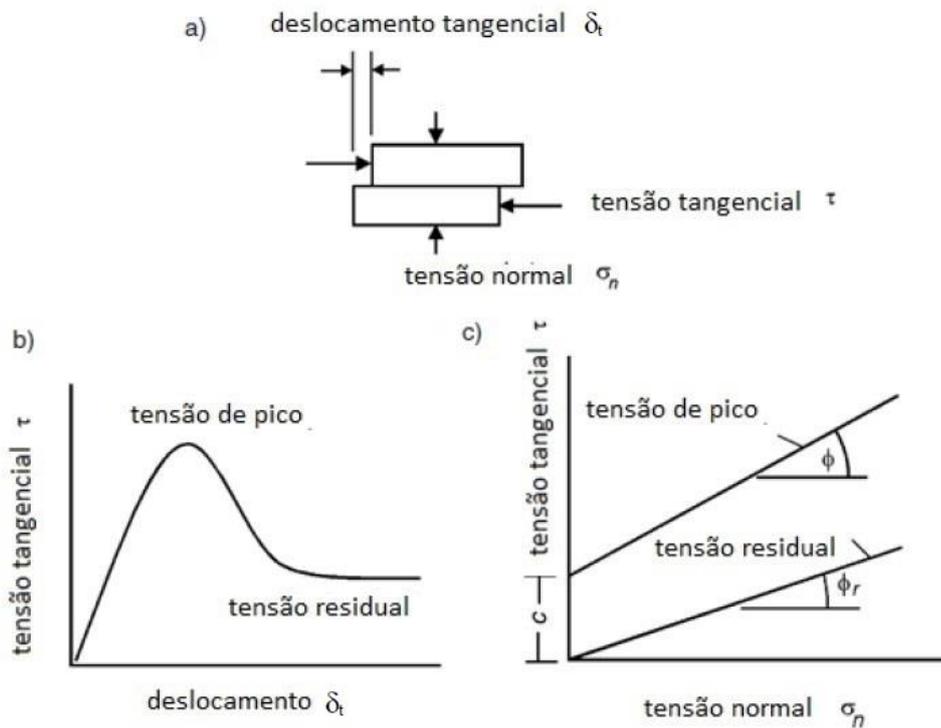


Fig. 13 - Ensaio de corte de descontinuidades planas e lisas: a) Esquema das tensões atuantes num ensaio de deslizamento; b) Comportamento típico para ensaio de deslizamento conduzido em condições de carga normal constante; c) Envoltentes de rotura teóricas para os valores de resistência de pico e resistência residual. (adaptado de Hoek 2007)

Atendendo às curvas (τ, σ_n) que caracterizam a resistência tangencial de descontinuidades, para as superfícies de descontinuidade planas e lisas, os pontos experimentais geralmente permitem estabelecer envoltentes lineares (Hoek 2007), como as que se apresentam na Fig. 13 c), onde as duas envoltentes representam a resistência tangencial de pico e resistência residual, respetivamente.

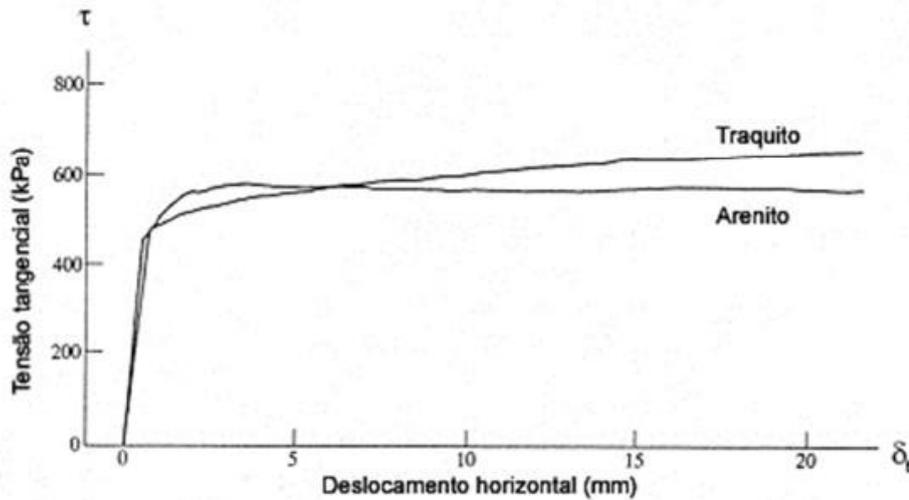


Fig. 14 - Curvas da tensão tangencial – deslocamento tangencial para descontinuidades planas e lisas ensaiadas com $\sigma_n = 1$ MPa (adaptado de Geologia de Engenharia 2014)

Na natureza, as superfícies rochosas das descontinuidades nunca são completamente planas e lisas. A rugosidade (ondulações e asperezas) numa superfície de descontinuidade natural têm uma influência significativa no seu comportamento tangencial. Geralmente, a superfície rugosa aumenta a resistência tangencial da descontinuidade (Hoek 2007), devido à maior tensão de corte que é necessário aplicar para que o deslizamento possa ocorrer vencendo a rugosidade. A Fig. 15 apresenta a curva (τ , δ_t) de comportamento típica dum ensaio realizado em descontinuidades limpas muito rugosas.

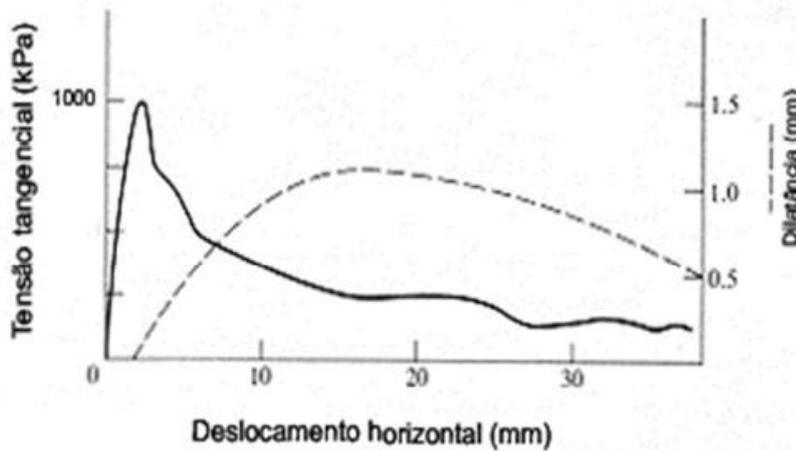


Fig. 15 - Curvas tensão tangencial – deslocamento tangencial e deslocamento normal – deslocamento tangencial para descontinuidades rugosas ensaiadas com $\sigma_n = 1.5$ MPa (adaptado de Geologia de Engenharia 2014)

Analisando o comportamento tangencial apresentado na Fig. 15, pode concluir-se que inicialmente, quando uma força tangencial é aplicada à amostra, a descontinuidade começa por fechar. Após fechar, esta comporta-se de forma “rígida”, havendo um grande incremento de tensão tangencial para um

pequeno deslocamento tangencial, onde as rugosidades em contato se deformam elasticamente até ao limite de cedência. Como a descontinuidade é rugosa, tem tendência a dilatar durante o deslizamento, sendo a dilatância definida como a taxa de variação do deslocamento normal (δ_n) em função do deslocamento tangencial. Então, em geral, deslocamentos iniciais pequenos produzem um aumento acentuado na tensão tangencial até um valor de pico (resistência tangencial de pico), para o deslocamento tangencial de pico ($\delta_{t,p}$), onde as asperezas em contato podem sofrer deformação elástica ou ser cortadas, dependendo da força normal, da resistência e da geometria da superfície (Grasselli 2001). Após o pico, com a continuação do deslizamento e, conseqüentemente, com um contínuo aumento dos deslocamentos, a tensão tangencial decresce progressivamente, tendendo para um valor constante que corresponde à resistência residual da descontinuidade.

O conceito de dilatância, supracitado, apresenta uma relação recíproca com a rugosidade (Bandis 1980). O aumento da resistência tangencial influenciado pela rugosidade deve-se, assim, ao fenómeno da dilatância, independentemente da rigidez do sistema de carregamento normal. Assim, se os deslocamentos normais não forem restringidos, caso de ensaios sob carga normal constante, a dilatância vai aumentar a resistência, ao forçar a descontinuidade a deslizar ascendentemente segundo uma direção que apresenta um determinado ângulo em relação à direção de corte, o denominado ângulo de dilatância (i). Por outro lado, se a deformação normal for restringida, casos de ensaios sob rigidez normal constante, a tendência da descontinuidade dilatar vai fazer aumentar a tensão normal exercida e o deslizamento apenas é possível por corte das asperezas. A ocorrência de dilatância é importante por determinar a modificação do estado de tensão que contraria o progresso da rotura, no entanto, com o aumento de tensão normal o efeito da dilatância atenua-se (Rocha 1981).

Nos ensaios de deslizamento é, também, feita a comparação entre as curvas (τ, δ_t) e (δ_n, δ_t) de modo a perceber a influência da dilatância na resistência tangencial de uma descontinuidade. Da análise da Fig. 16, numa fase inicial do deslizamento, durante o aumento acentuado de tensão tangencial, verifica-se uma ligeira dilatância, seguindo-se um rápido aumento na variação da dilatância, atingindo o valor máximo quando se obtém a resistência tangencial (Grasselli 2001). Após atingido o valor máximo da dilatância, para grandes deslocamentos a descontinuidade pode continuar a dilatar, dependendo da tensão normal, mas com uma menor variação (Bandis 1980).

A caracterização da resistência tangencial neste tipo de descontinuidades, segundo os ensaios com diferentes valores de tensão normal (Fig. 17 a)), é feita através das envolventes de rotura, uma relativa aos valores das resistências de pico e outra relativa aos valores das resistências residuais (Fig. 17 b)).

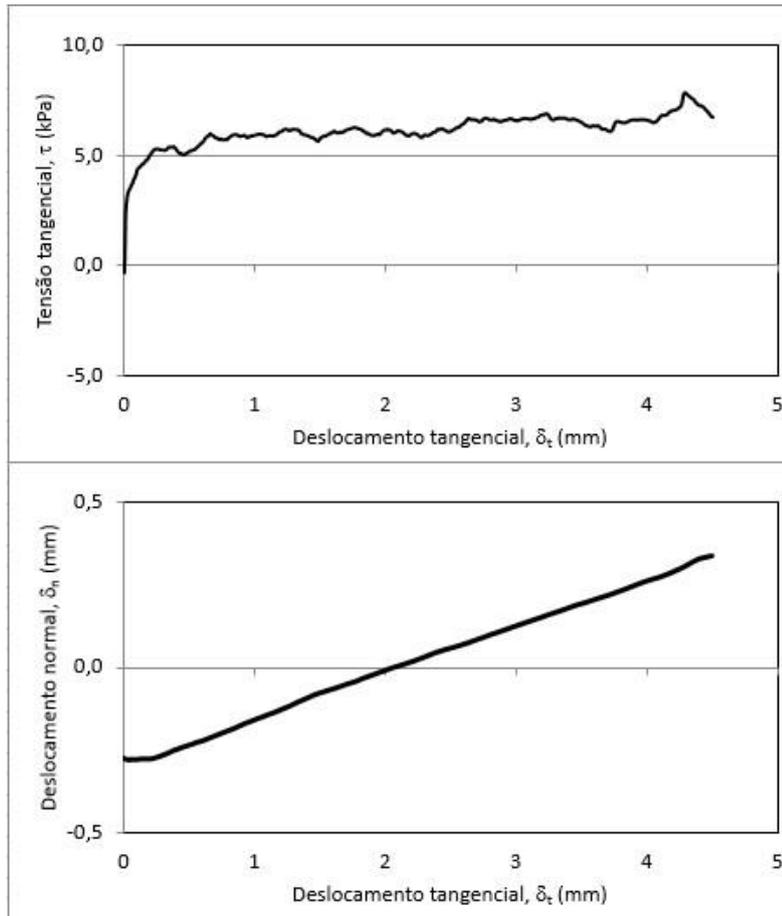


Fig. 16 – Exemplo de curvas (τ , δ_t) e (δ_n , δ_t) para descontinuidades ensaiadas sob tensão normal muito baixa

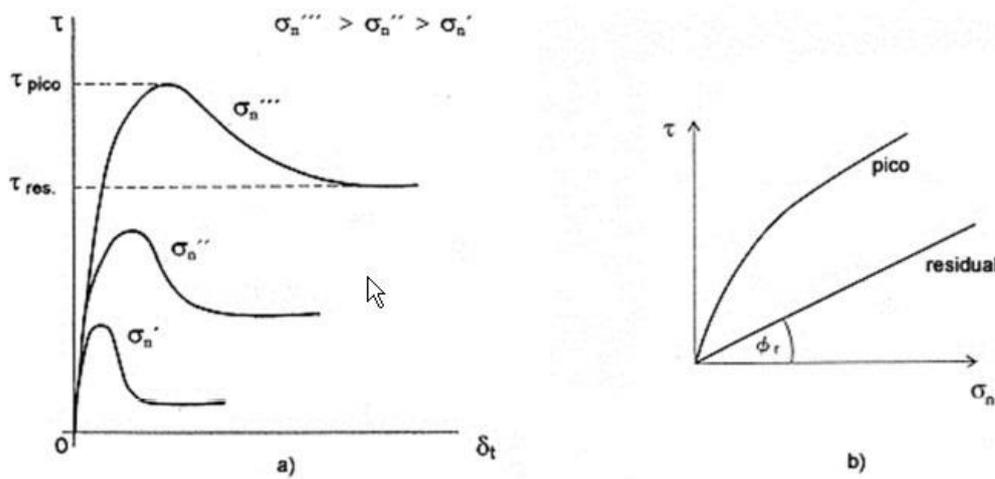


Fig. 17 - Ensaio de deslizamento de descontinuidades. a) curvas (τ , δ_t) para vários valores de σ_n ; b) envoltentes de rotura teóricas para valores de resistências de pico e residual (adaptado Brady e Brown 2005)

3.3. CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA TANGENCIAL DE DESCONTINUIDADES

Os ensaios de deslizamento realizados em descontinuidades reais demonstram que é possível obter envolventes de rotura com andamento contínuo, o que é extremamente vantajoso para estabelecer um adequado critério de resistência tangencial. Ao longo dos anos, foram desenvolvidos vários critérios empíricos para descrever as envolventes de rotura duma descontinuidade, de modo a ser possível avaliar a resistência tangencial a partir das tensões normais atuantes e das características físicas da superfície da descontinuidade. Alguns destes critérios limitam-se, apenas, a adaptar expressões matemáticas a conjuntos de dados experimentais, descrevendo critérios que dependem unicamente de constantes empíricas e não têm em conta as propriedades da superfície da descontinuidade (critério de Coulomb). Outros métodos, com aplicação mais generalizada, descrevem critérios que se baseiam em parâmetros quantificáveis da superfície da descontinuidade (critério de Barton).

No âmbito da mecânica das rochas, como no da mecânica dos solos, há uma inevitável necessidade de recorrer ao empirismo (Barton e Choubey 1977). As tensões usadas em mecânica das rochas são obtidas atendendo a uma área nominal, não tendo em conta a verdadeira área de contato que é de muito difícil determinação. Assim, as tensões reais, normal e tangencial, atuando nas asperezas em contato poderão ser ordens de grandeza superiores às tensões usadas, o que torna perceptível a necessidade duma formulação empírica para descrever corretamente a resistência tangencial duma descontinuidade.

3.3.1. CRITÉRIO DE COULOMB

Coulomb estudou o atrito entre duas superfícies planas observando um bloco num plano inclinado de superfície plana. Verificou que o bloco permanecia em repouso se a resultante das forças a atuar no bloco fizesse um ângulo com a normal à superfície inferior a ϕ_b , ao qual designou de ângulo de atrito básico. Assim, concluiu que a relação entre a tensão normal (σ_n) e a resistência tangencial (τ), mobilizadas na superfície, é expressa pelo coeficiente de atrito ($\tan \phi_b$) e definida pela expressão (1).

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi_b \quad (1)$$

No entanto, em geral, na mecânica das rochas para a melhor adaptação possível aos dados experimentais é corrente assumir uma componente de resistência tangencial quando a tensão normal é nula. Esta componente é designada de coesão aparente (c), e, numa prática de engenharia associada a descontinuidades, é interpretada como uma quantidade matemática associada à rugosidade da superfície (Hoek 2007). Atendendo ao referido, a resistência tangencial é caracterizada pela lei de Mohr-Coulomb (por ser definida no espaço τ - σ_n) na sua forma mais geral, a qual é traduzida pela seguinte expressão, onde ϕ é o ângulo de atrito:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (2)$$

Este critério, apesar de ser linear, caracteriza de forma aceitável a resistência tangencial de descontinuidades planas ou descontinuidades em que a rugosidade não apresente grande expressão. Assim, neste tipo de descontinuidades, a equação (2) caracteriza a resistência tangencial de pico. No caso da resistência residual, quando a componente de resistência adicional associada à rugosidade já foi vencida, a expressão (3) define a lei de atrito.

$$\tau_r = \sigma_n \cdot \tan \phi_r \quad (3)$$

Nesta última expressão, a coesão aparente é nula, τ_r é o valor da resistência residual e ϕ_r representa o ângulo de atrito residual.

No entanto, convém referir, que o critério de Mohr-Coulomb baseia-se na adaptação de uma expressão matemática aos dados experimentais, contemplando apenas a tensão normal e as propriedades de resistência atrítica da superfície em estudo. Admite-se, com este critério, que a resistência ao corte segundo um plano depende unicamente da tensão normal atuante no mesmo, desprezando-se a possível influência de uma distribuição não uniforme de tensões durante o ensaio e da rugosidade (Rocha 1981).

3.3.2. CRITÉRIO DE PATTON

Patton (1966) foi o primeiro investigador, em mecânica das rochas, a estudar o efeito da rugosidade das superfícies duma descontinuidade na resistência tangencial, através de uma série de testes usando modelos físicos com superfícies dentadas, com uma sucessão de dentes de forma triangular de inclinação constante, como ilustra a Fig. 18 b). Este modelo caracteriza a resistência tangencial através de um parâmetro da sua superfície, o denominado ângulo de rugosidade ou ângulo de dilatância (i).

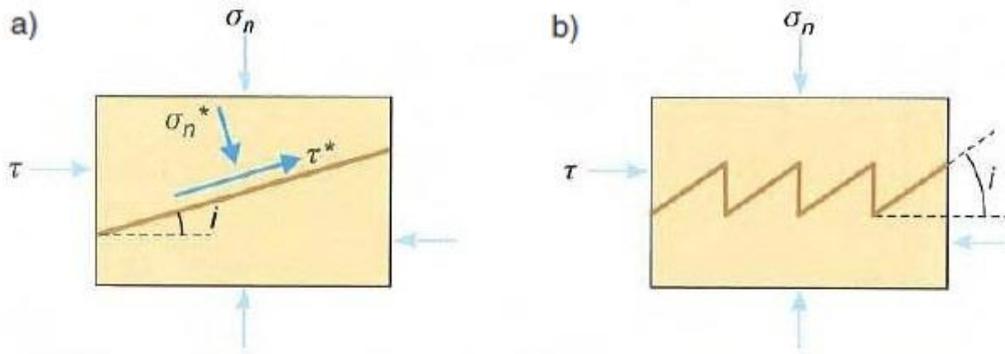


Fig. 18 – Modelo teórico usado por Patton (1966) para ilustrar o efeito da rugosidade na resistência tangencial duma descontinuidade: a) Pormenor duma superfície de descontinuidade inclinada e das tensões mobilizadas na mesma; b) Superfície idealizada no modelo (adaptado de González de Vallejo 2002)

Nos ensaios de deslizamento, com uma configuração igual à da Fig. 18 a), realizados em descontinuidades com superfícies limpas e secas, e cujo ângulo de atrito é igual ao ângulo de atrito básico, a condição de equilíbrio limite pode ser expressa por uma relação equivalente à expressão (1), dada por:

$$\tau^* = \sigma_n^* \cdot \tan \phi_b \quad (4)$$

onde τ^* e σ_n^* são a tensão tangencial e normal mobilizadas na superfície, respetivamente.

Considerando, então, a superfície de descontinuidade inclinada de um ângulo i em relação à direção da tensão tangencial (τ), como se ilustra na Fig. 18 a). A tensão tangencial e normal que se desenvolvem na superfície de deslizamento podem, assim, ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$\tau^* = \tau \cdot \cos^2 i - \sigma_n \cdot \sin i \cdot \cos i \quad (5)$$

$$\sigma_n^* = \sigma_n \cdot \cos^2 i - \tau \cdot \sin i \cdot \cos i \quad (6)$$

Substituindo as expressões (5) e (6) na equação (4), obtém-se a relação entre a tensão tangencial aplicada e a tensão normal, dada pela expressão:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\phi_b + i) \quad (7)$$

onde ϕ_b representa o ângulo de atrito da superfície e i o ângulo de rugosidade.

Assim, para as condições indicadas na Fig. 18 a), a superfície de descontinuidade inclinada apresenta um ângulo de atrito aparente $(\phi + i)$.

Por meio de ensaios em superfícies rugosas regulares (Fig. 18 b)), com aplicação de tensões normais baixas, Patton (1966), verificou que o deslizamento ocorre por deslizamento ao longo das superfícies inclinadas das asperezas, que permanecem intactas, e que a resistência tangencial aumenta linearmente com a tensão normal, satisfazendo a relação da equação (7). Em simultâneo, registou a ocorrência de dilatância, ou seja, ocorrência de deslocamentos na direção normal ao plano médio da descontinuidade, que comprovam o aumento geométrico do atrito.

No entanto, para elevados valores de tensão normal, na superfície rugosa idealizada, o escorregamento ao longo das superfícies inclinadas das asperezas é impedido. O deslocamento tangencial apenas ocorre para um valor de tensão tangencial que implique o corte das asperezas. Nestas circunstâncias, a dilatância é totalmente substituída pelo corte das asperezas e os valores das tensões tangencial e normal no instante da rotura, atendendo a resultados experimentais, satisfazem a relação expressa pela lei de Mohr-Coulomb, dada pela seguinte expressão:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi_r \quad (8)$$

onde c representa a coesão aparente ou coesão de imbricamento, dependente da resistência da rocha, e ϕ_r o ângulo de atrito residual, cujo valor é próximo do ângulo de atrito obtido em ensaios de corte sobre descontinuidades planas.

O critério de Patton é, assim, bilinear (Fig. 19), e evidencia os dois mecanismos básicos de rotura: o deslizamento ao longo das superfícies inclinadas das asperezas com uma determinada inclinação em relação ao plano médio da descontinuidade, para tensões normais baixas; e o impedimento da dilatância com o conseqüente corte das asperezas, para tensões normais elevadas. No entanto, este critério não representa a realidade de forma adequada, pois as descontinuidades naturais raramente apresentam um comportamento como o idealizado nos modelos. Na realidade, os dois mecanismos aparecem combinados em proporções variáveis, em relação às resistências de pico, onde a transição do escorregamento das asperezas para o corte das mesmas não é tão brusca e as envolventes apresentam uma curvatura contínua, refletindo, assim, uma transição progressiva de um modo de rotura para o outro. De qualquer forma, o desenvolvimento do critério bilinear foi um marco importante para uma interpretação diferente da resistência tangencial de descontinuidades daquela baseada nos parâmetros resistentes c e ϕ de Coulomb.

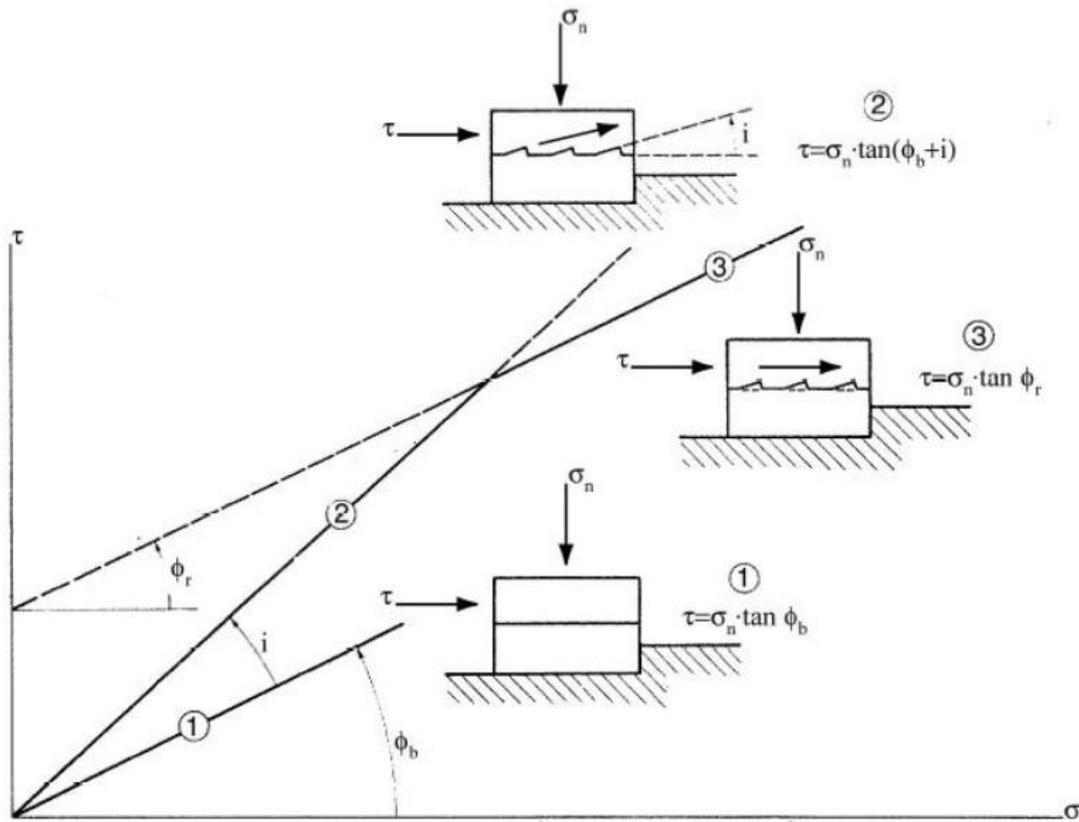


Fig. 19 – Envolvente bilinear de rotura de pico obtida de ensaios de deslizamento no modelo de Patton (1966) (adaptado Grasselli 2001)

3.3.3. CRITÉRIO DE BARTON

Barton (1973) estudou o comportamento de descontinuidades rochosas naturais e propôs um critério modificado a partir do critério de Patton. A relação tensão tangencial - tensão normal expressa pela curva teórica (τ, σ_n) para a resistência de pico apresentada na Fig. 17 b), pode ser, então, quantificada usando o critério não-linear desenvolvido pelo mesmo autor, baseado no comportamento de descontinuidades rugosas em ensaios laboratoriais. O critério não-linear de Barton é descrito pela seguinte lei empírica:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (9)$$

onde τ é a resistência tangencial de pico, σ_n a tensão normal, JRC (Joint Roughness Coefficient) é um coeficiente relativo à rugosidade das paredes da descontinuidade, JCS (Joint-wall Compressive Strength) representa o valor da resistência à compressão simples do material da parede da descontinuidade e ϕ_b é o valor do ângulo de atrito básico.

Barton e Choubey (1977), com base em resultados de ensaios de deslizamento de oito tipos diferentes de rocha, representadas por 136 amostras de diaclases, reescreveram a equação (9) da seguinte forma:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (10)$$

Da equação (10) é possível perceber a influência de três componentes principais para a caracterização da resistência tangencial – uma componente atrítica básica relacionada com ϕ_r (ângulo de atrito residual), uma componente geométrica controlada pela rugosidade da descontinuidade (JRC) e uma componente relacionada com a rotura das asperezas, controlada pela relação (JCS/σ_n). A combinação destas duas últimas componentes denota o efeito global da rugosidade na resistência, definindo o ângulo i , anteriormente referido por Patton, agora dado pela expressão (11).

$$i = JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \quad (11)$$

Interessa referir que a equação (10) não é válida para uma tensão normal igual a zero e deixa de ter significado prático quando o argumento da tangente ($i + \phi_r$) é superior a 70° . Este limite poderá ser usado para determinar o mínimo valor para tensão normal, enquanto o máximo valor é determinado quando a mesma tensão é igual ao parâmetro JCS .

O parâmetro JCS , que depende da resistência à compressão do material rocha e do estado de alteração do mesmo, é determinado pela correlação apresentada por Barton e Choubey (1977), com base no ensaio do martelo de Schmidt, e definida pela seguinte expressão:

$$\log_{10} JCS = 0,00088 \gamma r + 1,01 \quad (12)$$

onde γ corresponde ao peso volúmico da rocha (em kN/m^3), r é o valor do ressalto do martelo de Schmidt e o JCS a correspondente resistência das superfícies da descontinuidade (em MPa).

O ângulo de atrito residual (ϕ_r) é um parâmetro que expressa, de certa forma, o estado de alteração das superfícies de uma descontinuidade, e determina-se, segundo Barton e Choubey (1977), pela seguinte equação:

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R} \quad (13)$$

onde ϕ_b é o ângulo de atrito básico de uma superfície serrada da rocha que contém a descontinuidade, r é o valor do ressalto do martelo de Schmidt nas paredes da descontinuidade e o R o valor do ressalto do martelo de Schmidt na superfície serrada da rocha. A avaliação do ângulo de atrito básico pode ser feita por ensaios de deslizamento das superfícies rochosas serradas ou ensaios de inclinação progressiva sobre as mesmas superfícies, e representa a resistência tangencial de uma superfície de rocha sem rugosidade.

O parâmetro JRC permite quantificar a rugosidade por meio de uma comparação visual da superfície rugosa real com perfis tipo (Barton e Choubey 1977), tal como se ilustra na Fig. 20. No entanto esta metodologia é inteiramente subjetiva, por comparação visual apenas, podendo conduzir a resultados pouco fiáveis e só podem ser comparadas amostras a uma escala relativamente pequena, com cerca de 10 cm no máximo.

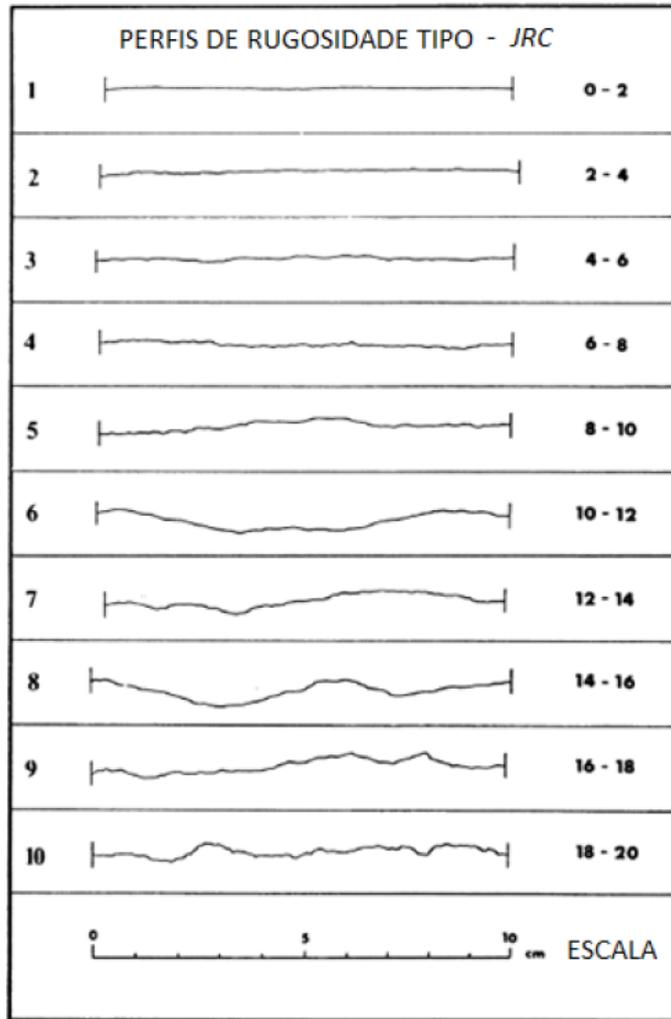


Fig. 20 – Perfis tipo utilizados para estimar JRC visualmente (adaptado de Barton e Choubey 1977)

No entanto dada a grande subjetividade da comparação visual, os mesmos autores sugerem que o parâmetro da rugosidade (*JRC*) deve ser determinado preferencialmente a partir de ensaios a tensões normais baixas, como os ensaios de *pull/push* ou de *tilt* (inclinação progressiva). No âmbito deste trabalho, estes ensaios ganham uma importância fundamental e serão devidamente analisados nos próximos capítulos. A partir dos resultados destes ensaios é possível determinar quantitativamente o parâmetro *JRC* pela seguinte equação:

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_{n0}} \right)} \tag{14}$$

onde α é o ângulo determinado no referido ensaio a tensão normal baixa, σ_{n0} corresponde à tensão normal aplicada no ensaio, ϕ_r é o ângulo de atrito residual e o *JCS* o valor da resistência das paredes das descontinuidades.

Nos capítulos seguintes é feita a apresentação dos procedimentos dos ensaios que permitem a determinação dos parâmetros da equação (10), que influenciam a resistência tangencial de uma descontinuidade, e são mostrados os resultados destes ensaios aplicados a um conjunto de diaclases.

4

Ensaio laboratoriais para a determinação dos parâmetros do modelo de Barton

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Um dos principais objetivos deste trabalho passa por estudar o comportamento de descontinuidades, principalmente a caracterização da sua resistência tangencial, recorrendo a parâmetros que expressem quantitativamente a influência das características da superfície duma descontinuidade nessa resistência. Tendo em conta que a rugosidade e a resistência das paredes têm uma marcada influência no comportamento tangencial das diaclases, Barton (1977) estabeleceu a lei empírica de atrito descrita pela equação (10), apresentada no capítulo anterior, para estimar a resistência tangencial de descontinuidades rugosas. Neste trabalho procedeu-se à realização de ensaios para a determinação dos parâmetros do modelo de Barton, em sessenta e sete provetes de superfícies de diaclases, que já tinham sido previamente submetidas a ensaios de deslizamento.

A determinação do parâmetro referente à rugosidade, JRC , é feita por meio de ensaios específicos a tensões normais muito baixas, como recomendado por Barton (1977), nomeadamente, o ensaio de inclinação progressiva (*tilt*) e ensaios sem força normal aplicada, os ensaios de *pull* (em que a metade superior da diaclase é puxada) e de *push* (em que a metade superior da diaclase é empurrada). Estes últimos são diferentes do que foi preconizado por Barton (Barton e Choubey 1977).

Para a determinação dos restantes parâmetros, referentes à resistência e ao estado de alteração das superfícies da diaclase, JCS e ϕ_r respetivamente, são, também, realizados um conjunto de ensaios auxiliares. A resistência das superfícies duma diaclase, JCS , é determinada com o auxílio do ensaio do martelo de Schmidt (esclerómetro), sobre as superfícies naturais da mesma. Por sua vez, a determinação do ângulo de atrito residual, ϕ_r , é feita com o auxílio do martelo de Schmidt, para as superfícies naturais e serradas da diaclase, e do ensaio de inclinação progressiva (*tilt*) nas superfícies serradas da diaclase.

Neste capítulo é discutido, para cada ensaio referido anteriormente, o desenvolvimento do procedimento, o procedimento e os respetivos equipamentos utilizados.

4.2. ENSAIO DE DESLIZAMENTO SEM FORÇA NORMAL (*PUSH TEST*)

Este ensaio tem como objetivo geral estudar o comportamento tangencial duma diaclase por imposição contínua de um deslocamento tangencial à metade superior dum provete e medindo a força de corte necessária para que o deslocamento ocorra. Do ensaio pretende-se determinar a força tangencial máxima e, conseqüentemente, a tensão tangencial máxima (a resistência tangencial) que se mobiliza entre as

superfícies da amostra da diaclase. Também interessa determinar a dilatância, ao avaliar o movimento normal em relação ao plano médio de deslizamento da metade superior do provete. Como se efetua o estudo da resistência tangencial e dilatância, ao longo de toda a gama de deslocamentos tangenciais impostos, este ensaio permite ir mais além do objetivo de inferir o parâmetro *JRC* do modelo de Barton.

4.2.1. DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO

Como se trata de ensaios envolvendo forças relativamente reduzidas e os transdutores possuem molas para garantir o seu contacto com os provetes, para avaliar corretamente o comportamento tangencial numa diaclase é necessário, em primeiro lugar, prever a componente da resistência tangencial medida associada aos transdutores durante o deslizamento, bem como a resistência que os mesmos oferecem ao movimento da metade superior perpendicularmente ao plano de deslizamento. Neste sentido, procedeu-se à calibração dos transdutores responsáveis pela medição dos deslocamentos tangenciais e normais, de modo a prever a resistência adicional paralela e normal ao plano de deslizamento, respetivamente. Posteriormente, foi avaliada a influência da velocidade a que se processam os deslocamentos, no comportamento tangencial numa diaclase, analisando como a sua variação afeta a respetiva resistência tangencial. Estes aspetos são fundamentais, pois o seu tratamento tem como objetivo garantir a adoção de iguais condições em todos os ensaios a realizar e a repetibilidade dos seus resultados.

4.2.1.1. Calibração dos transdutores

Durante o ensaio de deslizamento a tensões normais muito baixas, a resistência tangencial é quase toda mobilizada no contato das superfícies da diaclase ensaiada, sendo a remanescente quantidade dessa resistência associada aos transdutores responsáveis pela medição dos deslocamentos tangenciais. Analogamente, a resistência ao movimento normal da metade superior é quase exclusivamente da responsabilidade do peso dessa mesma metade, no entanto os transdutores responsáveis pela medição dos deslocamentos normais também apresentam alguma resistência ao movimento. Assim, é necessário estudar a relação entre o deslocamento (δ) do transdutor e a correspondente força na mola (F_{mola}) do mesmo, associada àquele deslocamento, de modo a obter uma lei do comportamento do transdutor.

Desta forma, para estudar a relação entre o deslocamento e a força dum transdutor, foi usado um parafuso ligado ao transdutor para provocar deslocamentos no mesmo, com andamento aleatório, tal como se ilustra na Fig. 21. O equipamento utilizado neste processo é o respetivo transdutor a estudar, o parafuso usado para provocar os deslocamentos, uma célula para a medição da força, uma peça de suporte para os três elementos anteriores e um equipamento com aquisição automática de dados para a medição dos deslocamentos e forças.

O procedimento passa por medir a força mobilizada na mola do transdutor correspondente ao deslocamento provocado pelo parafuso, tendo em conta que a força na mola é dada pela diferença entre a força medida na célula de carga e a força correspondente ao peso do parafuso. Ao repetir o procedimento, de modo a cobrir todo o comprimento da mola, é possível obter uma lei de comportamento do transdutor por regressão linear de todos os pares de valores (F_{mola} , δ).

A Fig. 22 apresenta os pares de valores (F_{mola} , δ) e as respetivas leis de comportamento, dadas por regressão linear, dos transdutores responsáveis pela medição dos deslocamentos tangenciais, nomeadamente, os transdutores LMR EQ-45 e LMR EQ-46 (denominados, no âmbito prático do trabalho, pelas siglas T1 e T2, respetivamente). Foram também calibrados os transdutores responsáveis pela medição dos deslocamentos normais (os transdutores LMR EQ-41, LMR EQ-42, LMR EQ-43 e LMR EQ-44), denominados, de forma análoga aos tangenciais, pelas siglas N1, N2, N3 e N4

respetivamente. As suas curvas de comportamento, na mesma linha das ilustradas na Fig. 22, apresentam-se na Fig. 23.

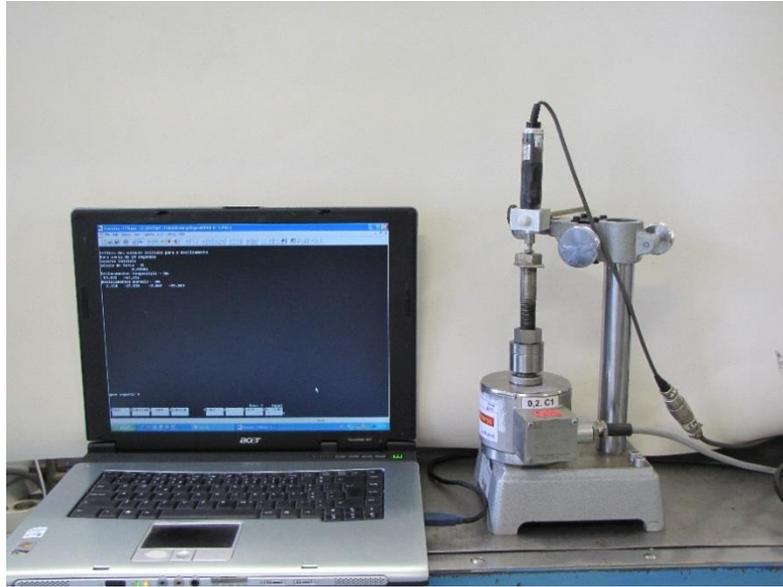


Fig. 21 – Equipamento utilizado para a calibração dos transdutores

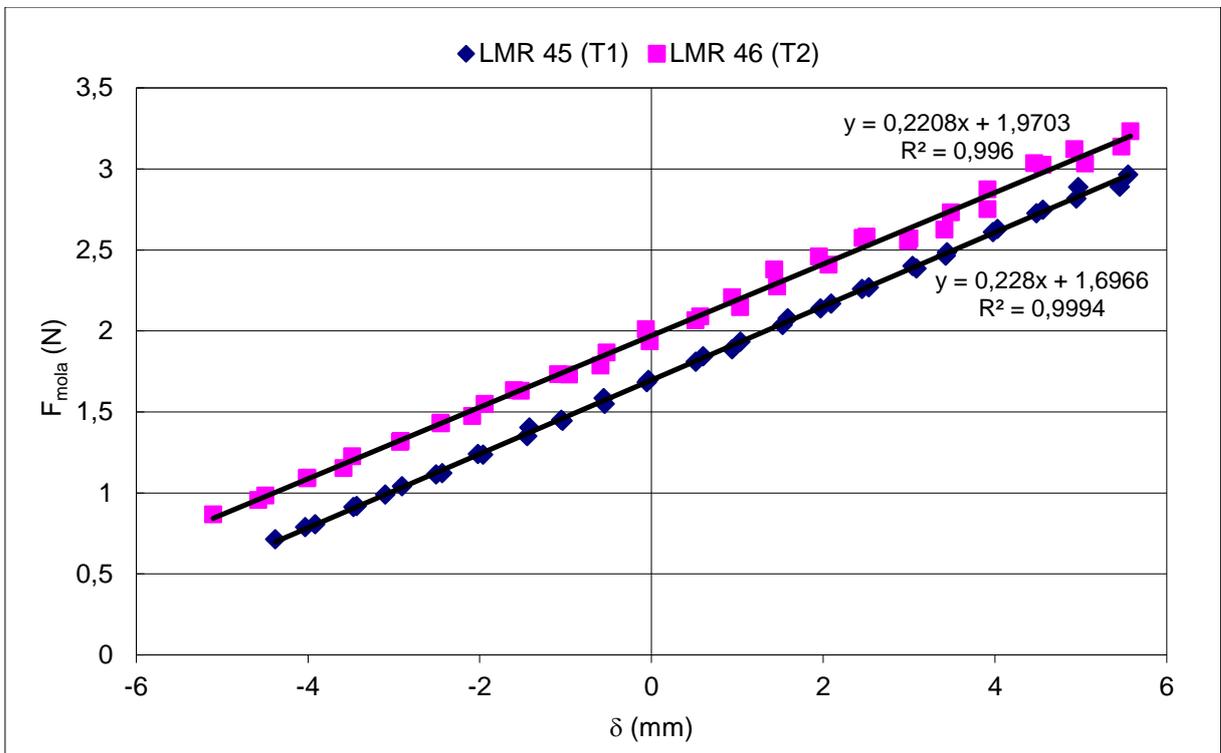


Fig. 22 – Relações (F_{mola} , δ) referentes aos transdutores dos deslocamentos tangenciais

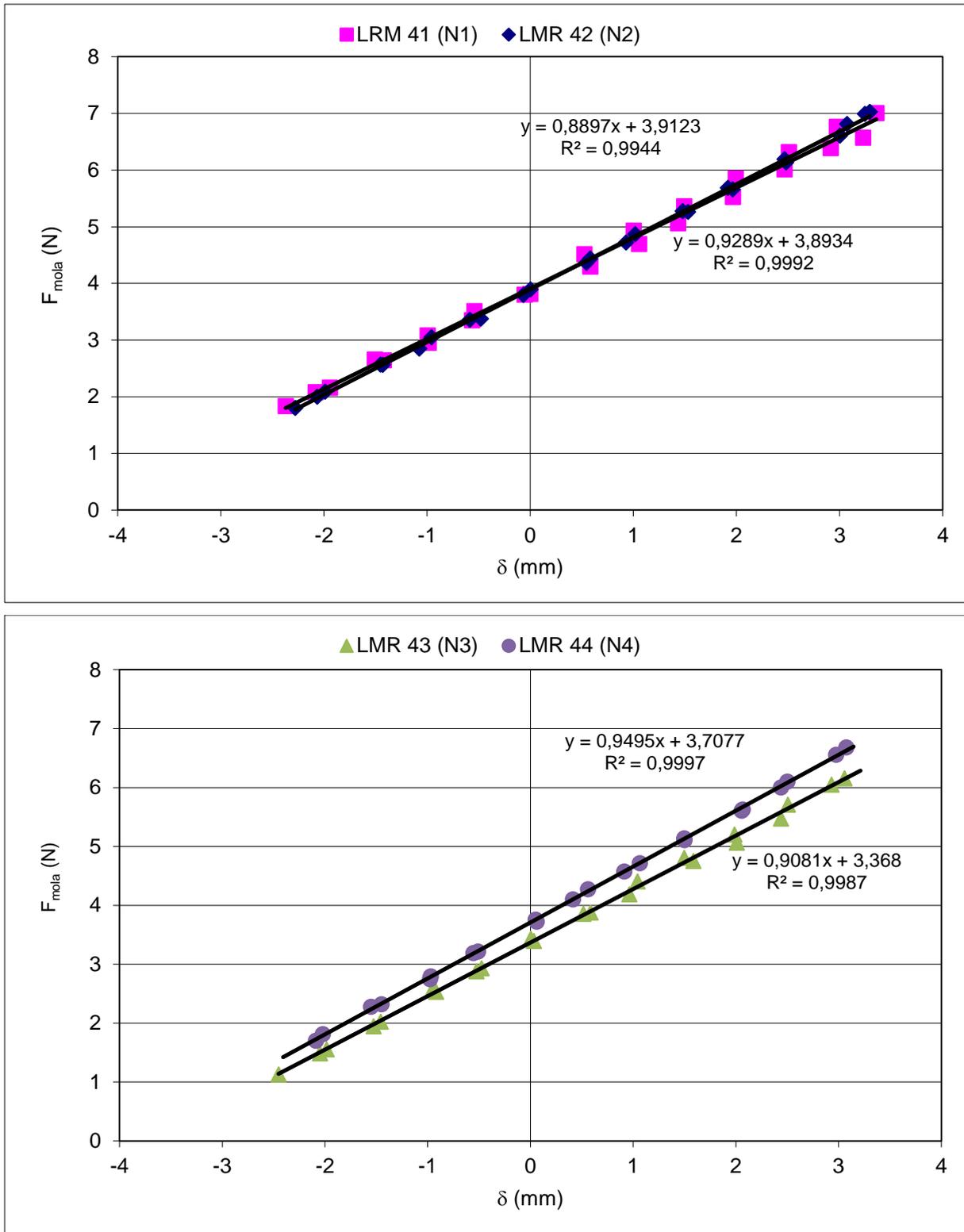


Fig. 23 - Relações (F_{mola} , δ) referentes aos transdutores dos deslocamentos normais

4.2.1.2. Ensaio experimentais

A realização de ensaios experimentais, em geral, é fundamental para definir, se necessário, um procedimento particular ao estudo que se pretende realizar, averiguar o correto funcionamento dos equipamentos utilizados no ensaio, confirmar se as forças estão a ser efetivamente aplicadas à superfície da diaclase e possibilitar a calibração de dispositivos de medição (Muralha et al. 2014). Assim, para estabelecer um procedimento de ensaio aceitável para todas as superfícies de diaclases a estudar, foram realizados oito ensaios experimentais (EE) na mesma superfície duma diaclase (proвете 305), onde apenas se fez variar a taxa de variação de deslocamento tangencial, ou seja, a velocidade a que os deslocamentos tangenciais eram impostos (Tabela 2). Com estes ensaios, no âmbito do presente trabalho, pretende-se avaliar a influência da taxa de variação de deslocamento tangencial na força tangencial máxima, bem como a repetibilidade dos resultados dos ensaios.

Tabela 2 – Taxa de deslocamento tangencial usada em cada ensaio experimental

Ensaio	Taxa de variação dos deslocamentos tangenciais (mm/s)
EE 1	0,014
EE 2	0,014
EE 3	0,007
EE 4	0,007
EE 5	0,018
EE 6	0,018
EE 7	0,014
EE 8	0,010

Estes ensaios serviram, também, para acertar o procedimento na fase inicial do ensaio em que é necessário realizar o encosto e zeragem dos aparelhos. Assim, em primeiro lugar, realizou-se um ajuste do comportamento tangencial de todos os ensaios experimentais, por sobreposição, sem recurso a formulações matemáticas, das curvas (F_t , $\delta_{t,m}$) de cada ensaio, fazendo-se coincidir a força tangencial máxima, de cada ensaio, para aproximadamente o mesmo deslocamento tangencial, como se ilustra na Fig. 25. Da análise da figura, verifica-se que os andamentos dos vários ensaios são razoavelmente semelhantes, à parte de algumas diferenças na rigidez inicial e no valor máximo medido da força tangencial. Posteriormente, pela comparação da força tangencial máxima e da força tangencial média de cada ensaio, calculada pela média aritmética a partir da força tangencial máxima medida, com os valores médios das respetivas forças em todos os ensaios, verificam-se, pela Tabela 3, variações máximas de 10,1% e 12,5%, respetivamente. Da análise anterior, conclui-se que uma diaclase ensaiada sobre diferentes taxas de deslocamento tangencial apresenta uma força tangencial máxima e uma resistência tangencial, aproximadamente iguais. Face a esta conclusão, foi utilizada uma velocidade de 0,01 mm/s em todos os ensaios.

Tabela 3 – Comparação da força tangencial nos oito ensaios experimentais realizados no provete 305

Ensaio	Força tangencial máxima (N)	Varição da força tangencial máxima (%)	Força tangencial média (N)	Varição da força tangencial média (%)
EE 1	100,74	-2,2%	85,06	-6,9%
EE 2	100,72	-2,2%	87,87	-3,9%

EE 3	93,78	-9,0%	79,93	-12,5%
EE 4	99,93	-3,0%	95,4	4,4%
EE 5	113,45	10,1%	96,57	5,7%
EE 6	109,59	6,4%	95,22	4,2%
EE 7	102,01	-1,0%	92,91	1,7%
EE 8	103,81	0,8%	98,17	7,4%
Média (N)	103,00		91,39	

Dos ensaios experimentais, é, também, possível analisar, especificamente, a variação da força tangencial máxima com a taxa de variação do deslocamento tangencial. Assim, da análise da Tabela 3 e da Fig. 24 é possível perceber que a força tangencial máxima medida cresce com a taxa de variação do deslocamento tangencial, no entanto, a diferença do seu valor de ensaio para ensaio não se apresenta significativa. É importante referir, que a força tangencial média utilizada nas comparações anteriores é calculada com a média aritmética, pois a taxa de variação de deslocamento tangencial, para a qual o sistema de aquisição de dados mede a força tangencial, é aproximadamente constante.

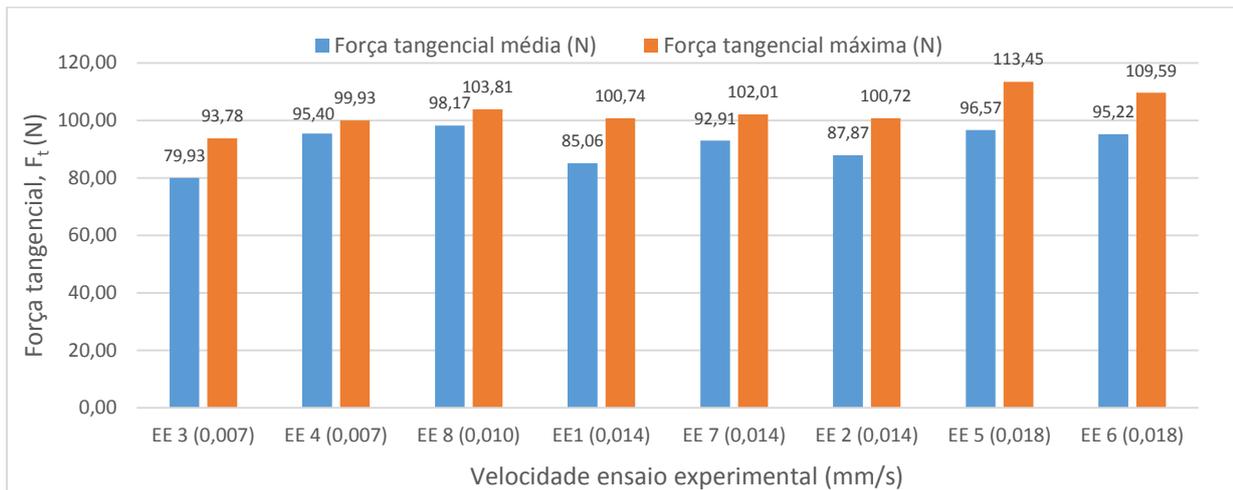


Fig. 24 - Variação da força tangencial máxima e da força tangencial média, com uma variação da velocidade do ensaio, para os ensaios experimentais (provetes 305)

4.2.2. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO UTILIZADOS NO ENSAIO SEM FORÇA NORMAL (PUSH)

4.2.2.1. Equipamento

Os ensaios de deslizamento sem força normal (*push tests*) são realizados num equipamento projetado e construído no LNEC, constituído por: um quadro metálico de reação, que confere rigidez ao sistema de ensaio; uma caixa de corte fixada ao quadro; instrumentos de carregamento; e instrumentos de medição dos carregamentos e deslocamentos. Este equipamento, ilustrado na Fig. 26, permite a aplicação de forças tangenciais aos provetes a taxas adequadas, de modo a que a resultante do carregamento tangencial passe pelo centro de gravidade da área da diaclase, minimizando possíveis movimentos de rotação e inclinação da metade superior do provete. A caixa de corte, cuja metade inferior se apresenta fixa ao quadro de reação, restringindo o movimento da metade inferior do provete, possibilita um movimento livre da metade superior do provete e, assim, o deslocamento tangencial relativo.

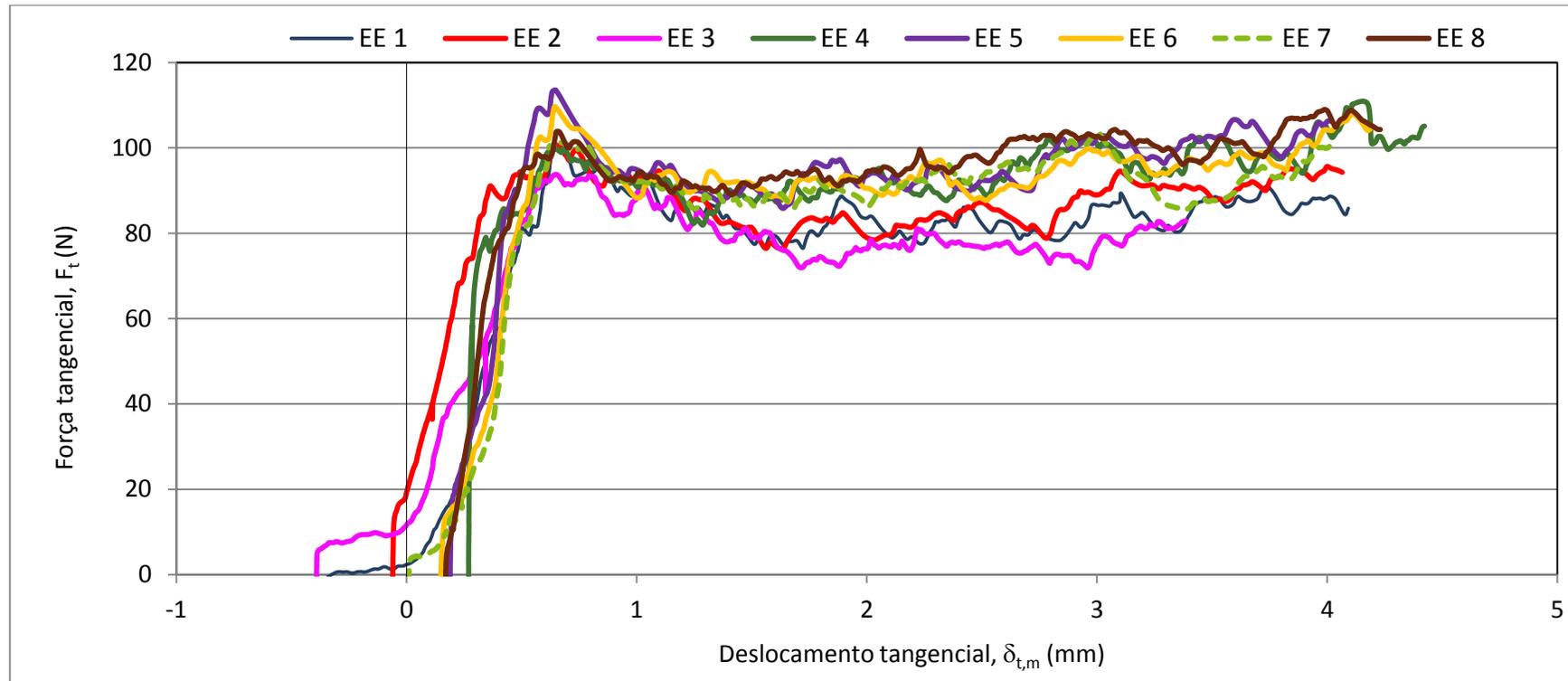


Fig. 25 - Comparação gráfica das curvas ($F_t, \delta_{t,m}$) dos oito ensaios experimentais realizados no provete 305

A força tangencial é aplicada à metade superior do provete por meio de um macaco hidráulico, com capacidade máxima de 100 kN, montado no quadro de reação (Fig. 26), atuado por uma bomba elétrica com um circuito hidráulico que permite a variação servo-controlada da respetiva força. O equipamento de carregamento, macaco hidráulico e componentes de ligação, é montado de modo a que o carregamento tangencial esteja distribuído de forma uniforme pelo plano médio da diaclase e que a resultante do carregamento atue paralelamente ao mesmo plano. No entanto, para que a resultante do carregamento atue paralelamente ao plano de deslizamento, sem a mobilização de forças adicionais na extremidade da metade superior do provete, foi montado um sistema de baixo atrito, constituído por chapas e roletes, entre a metade superior do provete e a peça de encosto adjacente à mesma (Fig. 27).



Fig. 26 – Máquina utilizada para a realização do ensaio de deslizamento a tensão normal muito baixa

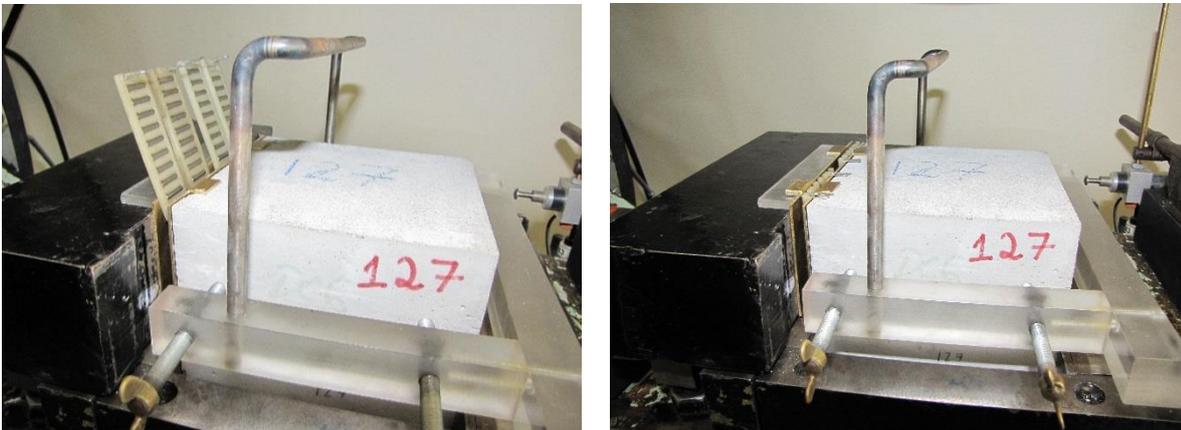


Fig. 27 – Pormenor da solução de baixo atrito na interação provete-encosto e do quadro de *perspex* em forma de U para a interação provete-transdutores

O equipamento compreende, ainda, os instrumentos necessários à medição da força tangencial e dos deslocamentos tangenciais e normais. A força tangencial é medida diretamente por uma célula de carga HBM do tipo C2 de 50 kN. Os deslocamentos são medidos por transdutores da marca TML modelo CDP-5 e CDP-10, com uma resolução de 0,001 mm: os deslocamentos tangenciais por dois transdutores CDP-10 com uma amplitude de 10 mm; os deslocamentos normais por quatro transdutores CDP-5 com uma amplitude de 5 mm. Os transdutores são suportados por bases metálicas e interagem com o provete por meio de um quadro de *perspex* em forma de U, aparafusado à metade superior do provete (Fig. 27).

A Fig. 28 ilustra o pormenor da montagem completa de todos os transdutores para a realização do ensaio. É, ainda, importante referir que todas as medições são realizadas de forma quase contínua, usando um sistema de controlo e aquisição de dados da marca HP (modelo 3852A). Por fim, o ensaio é comandado por um programa de computador que controla e armazena as medições em cada patamar de leitura.

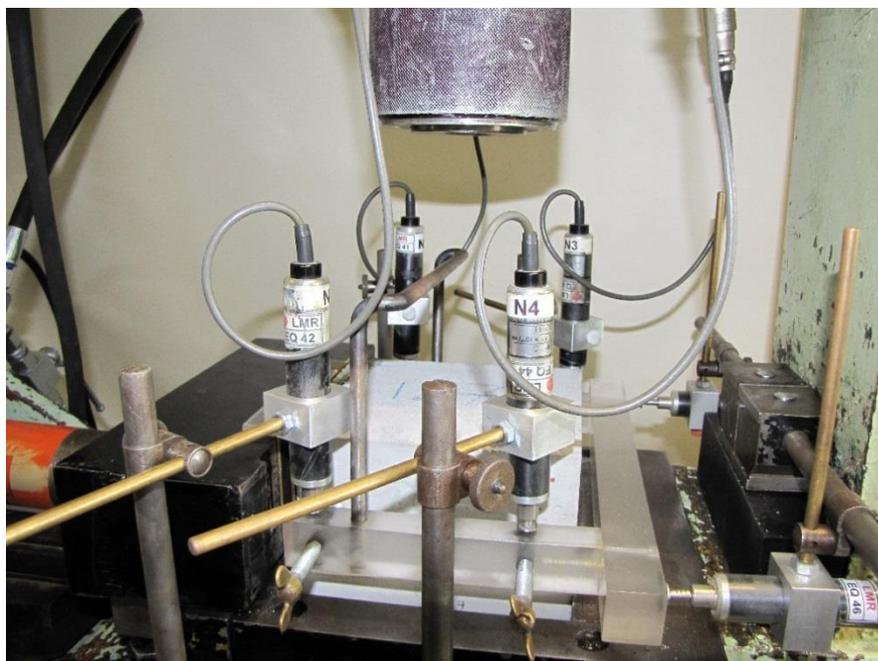


Fig. 28 – Pormenor da adequada montagem de todos os transdutores

4.2.2.2. Procedimento do ensaio

O ensaio de deslizamento sem força normal é baseado num procedimento particular com a devida organização sequencial. A etapa preliminar de montagem inclui as seguintes fases:

- Colocar o provete na caixa de corte do equipamento (como ilustrado na Fig. 26), sempre no sentido favorável ao deslizamento, e apertar a metade inferior do provete na caixa de corte. Este passo deve garantir que a superfície da diaclase fique perfeitamente centrada em relação à linha de ação da força tangencial;
- Assegurar que a diaclase se encontra na sua posição natural e limpa (sem detritos);
- Montar o suporte plástico, em forma de U, na metade superior do provete, para a interação desta com os transdutores (Fig. 27);
- Colocar entre a metade superior do provete e o encosto, as chapas e os roletes (Fig. 27);
- Montar os transdutores de deslocamentos em posições simétricas em relação à superfície da diaclase, como se ilustra na Fig. 28;
- Por último, realizar o deslizamento, de acordo com a metodologia descrita no parágrafo seguinte.

O procedimento de cada deslizamento é o seguinte:

- Aplicar uma força de algumas dezenas de N sobre o provete;
- Aplicar uma pequena força tangencial inicial, para o encosto do conjunto, assegurando que não existe perturbação da diaclase;

- Retirar o peso e realizar a zeragem dos equipamentos de leitura de força e deslocamentos;
- Iniciar o deslizamento, aumentando a força tangencial para que ocorra o deslocamento tangencial da diaclase, segundo uma velocidade de carregamento constante;
- O deslizamento termina quando a força tangencial estabiliza, ou seja, quando não há variação relevante da força tangencial aplicada, o que usualmente acontece, em regra, para deslocamentos tangenciais entre 3 e 5 mm;
- Os valores da força tangencial e dos deslocamentos são registados ao longo de todo o deslizamento, logo após a aplicação da força de encosto.

4.3. ENSAIO SEM FORÇA NORMAL (*PULL TESTS*)

Estes ensaios destinam-se a estudar o atrito máximo que se mobiliza entre as superfícies de uma descontinuidade, apresentando um grande potencial, mesmo no domínio da investigação, que se prende ao fato de serem rápidos, de fácil execução e pouco onerosos. São ensaios realizados nivelando o provete sobre um plano, impedindo a metade inferior de se mover e aplicando, gradualmente, uma força horizontal à metade superior de modo a que haja deslocamento relativo entre as duas metades do provete. É preciso ter em conta, que a única força normal aplicada à superfície da diaclase resulta do peso próprio da metade superior do provete, sendo esta a única existente ao longo de todo o ensaio, e que a distribuição da tensão normal pode ser considerada uniforme ao longo do plano da diaclase (Muralha 1997).

4.3.1. EQUIPAMENTO

Os ensaios sem carga normal aplicada são realizados com um equipamento particular, constituído por: uma chapa metálica com parafusos que permitem o seu nivelamento; uma peça de plástico rígido, fixa ao plano horizontal, para impedir o movimento da metade inferior do provete no sentido da aplicação da força horizontal; outra peça de plástico rígido, que funciona como encosto, para transmitir a força horizontal à metade superior do provete, dotada de roletes na sua base e no contato com o provete, de modo a garantir que a força atue paralelamente ao plano da diaclase; uma cinta metálica, que envolve as peças de plástico anteriores, para puxar a metade superior do provete sob a ação da força horizontal; e um recipiente metálico, que por sua vez se liga à cinta metálica, usado para produzir a força horizontal por adição de peso (granalha de chumbo) ao mesmo. É, ainda, utilizada uma balança, devidamente calibrada, para a medição do peso resultante do recipiente e da metade superior do provete. A Fig. 29 mostra o equipamento referido anteriormente.

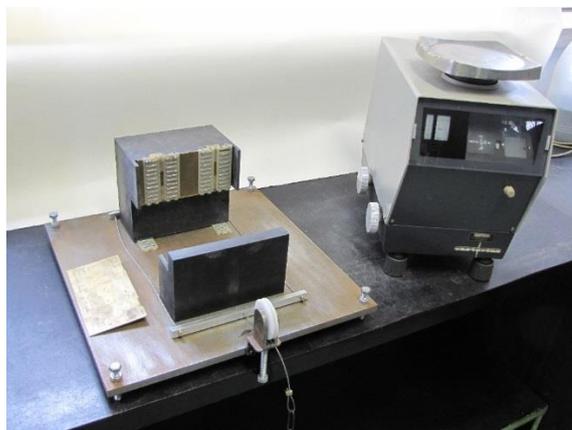


Fig. 29 – Equipamento utilizado no ensaio *pull*

4.3.2. PROCEDIMENTO

O procedimento para a execução deste ensaio é relativamente simples, descrevendo-se em seguida a ordem sequencial de passos:

- Registrar o peso da metade superior do provete;
- Colocar e fixar a metade inferior do provete numa posição em que o plano médio da diaclase fique horizontal (Fig. 30);
- Colocar a metade superior do provete sobre a inferior de modo a que a diaclase fique na sua posição natural não deslocada do seu plano médio horizontal e limpa de detritos (Fig. 30);
- Puxar a metade superior do provete, pelo aumento progressivo duma força horizontal aplicada à mesma e tangencial ao plano médio da diaclase (despejando granalha de chumbo para o recipiente ligado à cinta metálica), até ocorrer um deslizamento, repentino, entre as duas metades do provete (Fig. 31).
- Por fim, registar o peso do recipiente associado à força tangencial aplicada para provocar o deslizamento.

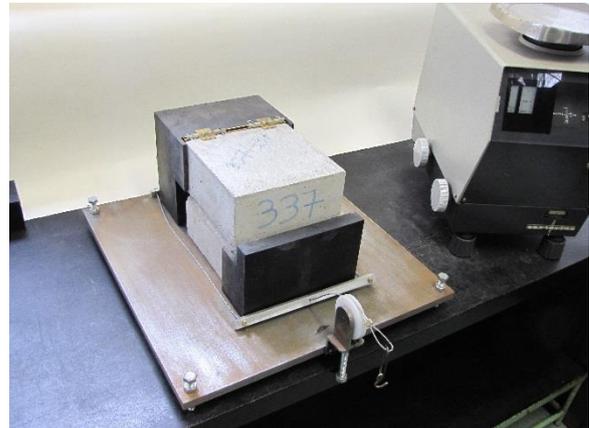
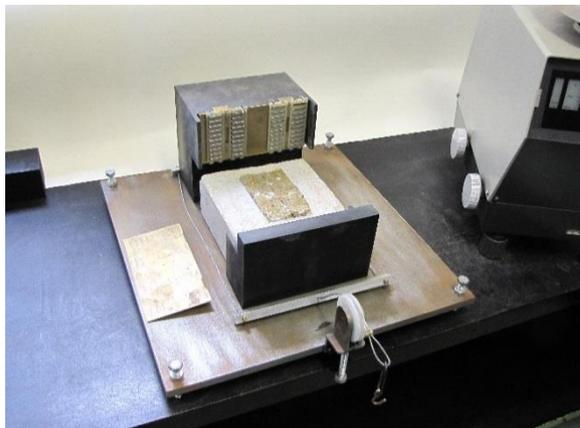


Fig. 30 – Montagem do provete para a realização do ensaio *pull*



Fig. 31 – Aplicação da força horizontal no sistema do ensaio *pull* até ocorrer deslizamento

4.4. ENSAIO DE INCLINAÇÃO PROGRESSIVA (TILT TESTS)

No âmbito do presente trabalho, são realizados ensaios de inclinação progressiva nas superfícies naturais das diaclases a estudar e nas superfícies serradas das mesmas, para que se possa determinar o ângulo de atrito e o ângulo de atrito básico, respetivamente, tal como preconizado por Barton e Choubey (1977). Estes ensaios, que representam de forma explícita o significado físico do ângulo de atrito, são realizados colocando o provete numa plataforma rígida na posição horizontal, mantendo a metade inferior do provete fixa à mesma, e procedendo à sua inclinação, progressiva, até ocorrer o deslizamento, repentino, da metade superior do provete por ação da gravidade. Analogamente ao ensaio sem carga normal aplicada, o ensaio de inclinação progressiva apresenta um procedimento e equipamento simples, tornando-os, igualmente, rápidos e pouco onerosos (Muralha 1997).

4.4.1. DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO

Ao contrário do que acontece nos ensaios sem força normal aplicada, no ensaio de inclinação progressiva a distribuição das tensões na superfície da diaclase apresenta-se não uniforme, após o início da inclinação, e há a possibilidade de a rotura se dar por derrubamento e não por deslizamento (Muralha 1997). De forma a distinguir o tipo de rotura neste ensaio, é necessário considerar o ângulo de inclinação limite, β_i , que demarque a transição entre o deslizamento e o derrubamento. Para tal, procede-se à análise da metade superior do provete submetida unicamente à ação gravítica e em repouso sobre uma superfície cuja inclinação em relação ao plano horizontal se pode fazer variar, como se ilustra na Fig. 32. Salienta-se que esta análise não tem em conta a rugosidade da diaclase.

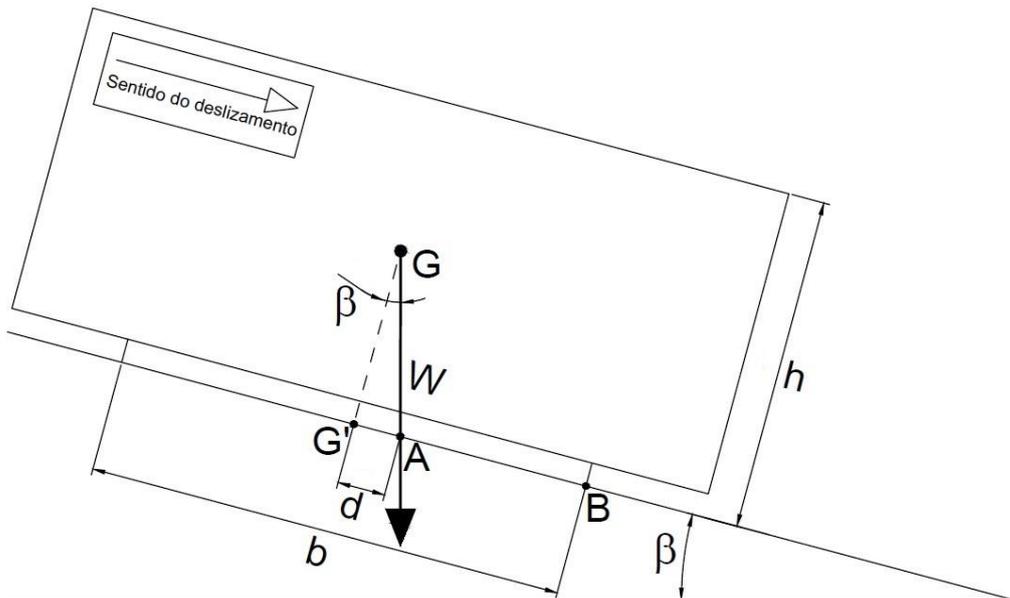


Fig. 32 – Representação esquemática da metade superior de um provete sobre uma superfície inclinada em relação ao plano horizontal

Então, no caso da metade superior do provete sujeita à atuação isolada do peso próprio, para além de uma instabilidade por deslizamento, com a variação crescente da inclinação, pode verificar-se a instabilidade associada à rotação do provete em torno da aresta inferior da base em contato com a superfície inclinada (rotação em torno do ponto B, representado na figura). Para efeitos práticos, e por simplificação, considera-se que o ângulo de inclinação limite, β_i , corresponde à inclinação do plano

quando a linha de ação do peso próprio passa pela aresta referida anteriormente. Ou seja, pela análise da Fig. 32, o ângulo limite ocorre quando a dimensão d , distância entre a projeção do centro geométrico na superfície inclinada (ponto G') e interseção da linha de ação do peso próprio com a mesma (ponto A), é igual a metade da dimensão b ; em resumo, ocorre quando o ponto A e B coincidem.

Assim, tendo em conta a condição necessária ao derrubamento, é possível avaliar o ângulo de inclinação limite do ensaio a partir da equação de equilíbrio de momentos das forças atuantes em relação ao eixo de rotação (em torno do ponto B da Fig. 32). Sendo W a força atuante, correspondente ao peso próprio, o momento de derrube (M_d) é dado pela expressão (15) e o momento estabilizador (M_e) é dado pela expressão (16).

$$M_d = W \cdot \sin \beta_l \cdot h/2 \quad (15)$$

$$M_e = W \cdot \cos \beta_l \cdot b/2 \quad (16)$$

Igualando os dois momentos, dados pelas expressões (15) e (16), o ângulo de inclinação limite, β_l , é dado pelo seguinte relação:

$$\tan \beta_l = \frac{b}{h} \quad (17)$$

onde b corresponde ao comprimento da superfície da diaclase em contato com superfície inclinada e h é a altura do provete, desde a superfície superior do mesmo até à superfície inclinada sobre a qual este assenta.

4.4.2. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO

Os ensaios de inclinação progressiva são realizados com recurso a uma plataforma rígida, devidamente nivelada, cuja inclinação em relação ao plano horizontal se pode fazer variar (Fig. 33). Esta plataforma é constituída por: um pêndulo centrado num transferidor que possibilita a medição da inclinação, com uma precisão até meio grau; e um sistema metálico fixo à sua superfície, para fixar a metade inferior do provete e conter a metade superior do mesmo após ocorrer o deslizamento.

No que respeita ao procedimento, este é bastante simples, descrevendo-se pelos seguintes passos:

- Colocar e fixar a metade inferior do provete sobre a plataforma de ensaio, devidamente nivelada, na posição horizontal (Fig. 34);
- Colocar a metade superior do provete sobre a metade inferior de modo a que a diaclase fique na sua posição natural (Fig. 34);
- Inclinare progressivamente a plataforma de ensaio até que a metade superior do provete deslize (Fig. 35), devendo este passo decorrer com uma velocidade angular aproximadamente constante (cerca de 0,5°/s);
- Por último, registar a diferença de inclinações entre a posição inicial e a posição final, com uma precisão de meio grau;
- No caso de se proceder a várias determinações para a mesma diaclase, a sua superfície deve ser devidamente limpa, imediatamente antes da colocação da metade superior do provete sobre a inferior.

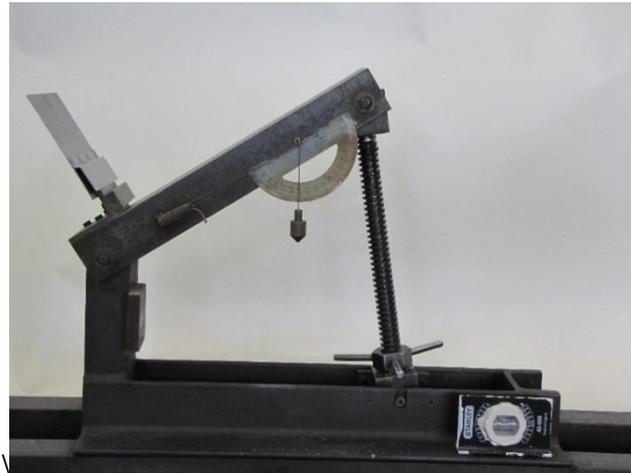


Fig. 33 – Plataforma rígida usada para a realização dos ensaios de inclinação progressiva

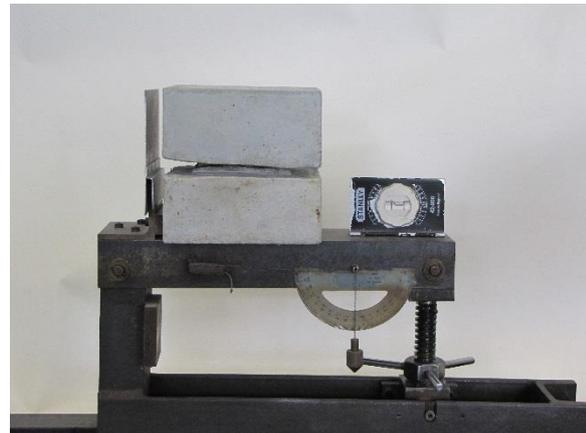
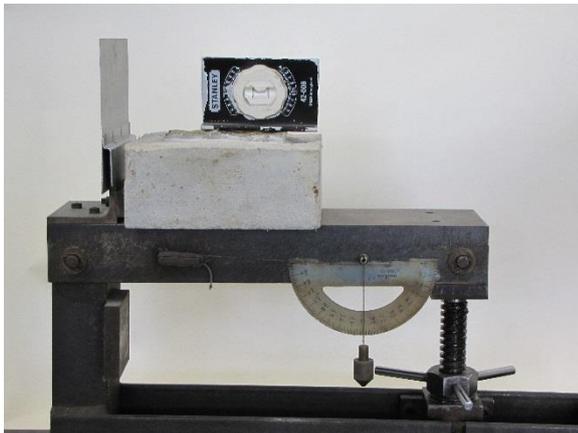


Fig. 34 – Colocação do provete sobre a plataforma do ensaio de inclinação progressiva

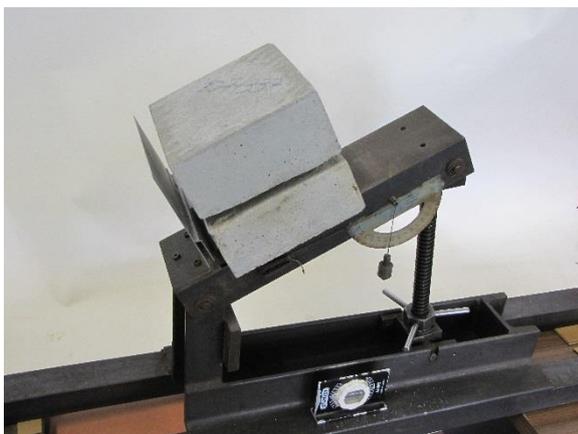


Fig. 35 – Inclinação progressiva da plataforma do ensaio até ocorrer deslizamento

4.5. MARTELO DE SCHMIDT

No âmbito do presente trabalho, são realizados ensaios com o martelo de Schmidt seguindo um procedimento adaptado do método sugerido pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (*ISRM Suggested method for determination of the Schmidt rebound hardness*), para a determinação dos valores dos ressaltos em superfícies serradas (R) e em superfícies naturais das diaclases (r). O uso deste aparelho apresenta especial popularidade no domínio das técnicas não destrutivas pelo fato do mesmo ser portátil e do seu uso ser simples e pouco dispendioso, sendo largamente usado para estimar a resistência das superfícies de descontinuidades por meio de correlações com o valor do ressalto (Aydin 2009).

A determinação do valor do ressalto baseia-se na transferência de energia à superfície a estudar por parte do êmbolo do martelo, quando este é pressionado contra a superfície. A referida energia é produzida pelo impacto do pistão, situado no interior do martelo, no êmbolo.

4.5.1. EQUIPAMENTO

Para avaliar o valor do ressalto do martelo foi usada uma caixa metálica, onde se coloca a metade do provete que se pretende ensaiar. Esta caixa permite o ajuste do provete no interior da mesma, de modo a que aquele não sofra movimento durante a aplicação da energia à superfície da diaclase, e é colocada sobre o chão de betão, que constitui uma superfície plana e nivelada, e serve como um suporte rígido. A transferência de energia à metade do provete fixada no interior da caixa, é, então, possível pelo uso do martelo de Schmidt. A Fig. 36 apresenta a caixa metálica e o respetivo martelo de Schmidt utilizados.

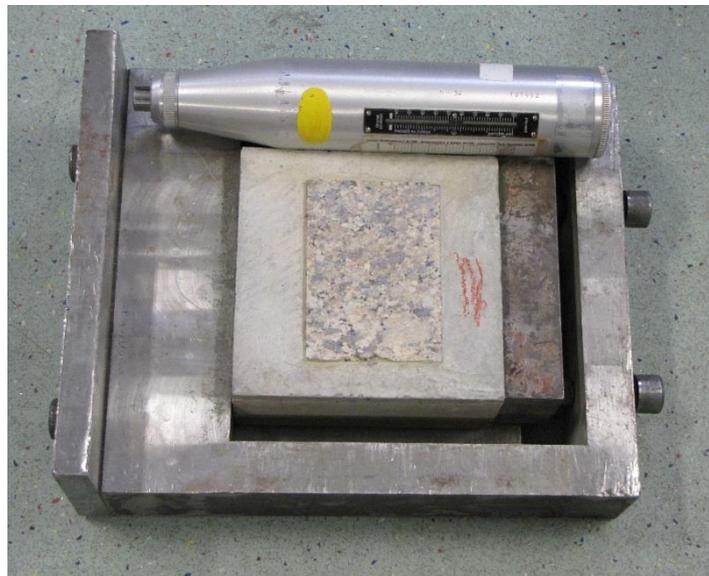


Fig. 36 – Equipamento utilizado para determinar o valor do ressalto do martelo de Schmidt

4.5.2. PROCEDIMENTO

No âmbito deste trabalho, foram realizadas vinte leituras nos provetes que contêm as superfícies de diaclases naturais, dez para cada metade, e dez leituras nas superfícies serradas, apenas numa das metades do provete, geralmente a inferior. No entanto, antes de se proceder à realização das leituras

sobre as superfícies das diaclases é necessária a devida calibração do martelo de Schmidt, para que os valores dos ressaltos sejam posteriormente corrigidos por meio de um fator de correção. Esta calibração é conseguida com o auxílio de uma bigorna fornecida pelo fabricante, realizando um conjunto de dez leituras sobre a mesma. Posteriormente é achado um fator de correção, que é dado pela razão do valor do ressalto de referência da bigorna pela média das dez leituras realizadas sobre a bigorna (Aydin 2009).

No que respeita ao procedimento para a realização de dez leituras na superfície da metade dum provete seguem-se os seguintes passos:

- Em primeiro lugar, fixar a metade do provete na caixa metálica;
- Realizar os impactos segundo a vertical de cima para baixo, colocando o martelo numa posição com direção aproximadamente perpendicular à superfície da diaclase (Fig. 37), não devendo o desvio ser superior a 5 graus. Os 10 pontos de impacto devem seguir um padrão regular e estar distanciados, pelo menos, um diâmetro do êmbolo, do limite da superfície ou do ponto anterior (Fig. 38).

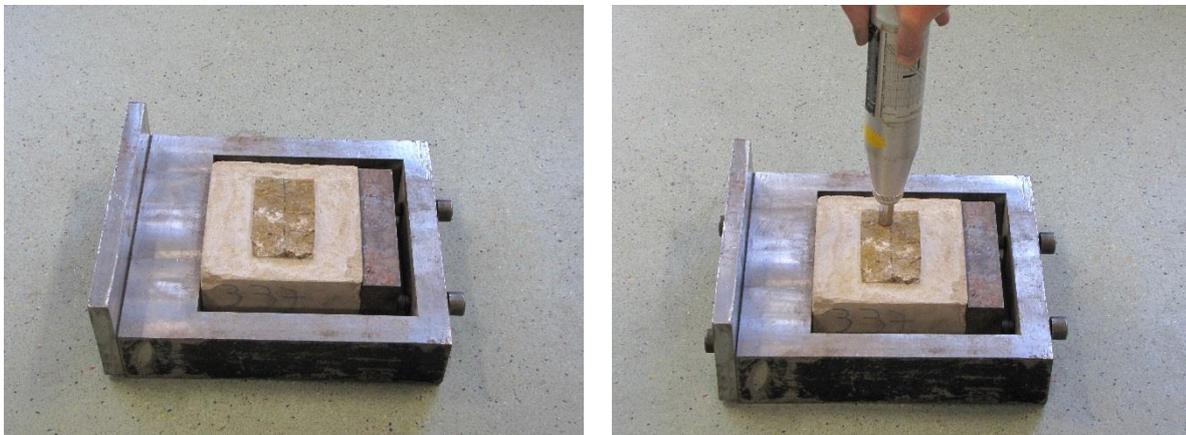


Fig. 37 – Colocação da metade do provete com superfície de diaclase natural na caixa e consequente aplicação do impacto sobre a superfície por parte do martelo de Schmidt

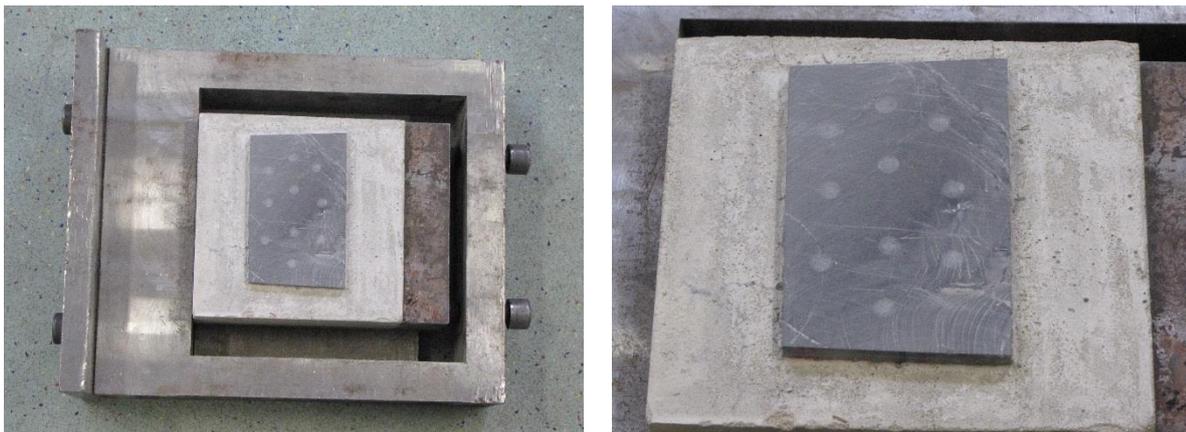


Fig. 38 – Pormenor dos pontos de impacto do martelo de Schmidt numa superfície de diaclase serrada

Barton e Choubey (1977) preconizam a execução de ensaios de inclinação progressiva e com martelo de Schmidt em superfícies serradas de rocha. Neste estudo foram usados os mesmos provetes para garantir a melhor correlação possível para os parâmetros a calcular. Assim, em vez de serrar as

superfícies das diaclases e executar os ensaios de esclerómetro, o que não dificultaria a realização posterior dos ensaios de *tilt*, as duas superfícies dos provetes foram desbastadas com uma mó. Para este efeito, as superfícies eram fixadas dentro de uma caixa devidamente nivelada com o plano de desbaste, para serem desbastadas pela mó que, além do movimento rotativo, possui também um movimento transversal num plano que pode ser regulado com um parafuso, Fig. 39. Desta forma foram obtidas as superfícies serradas com uma maior qualidade de acabamento e com as diaclases ainda encabeçadas, o que permitiu que os ensaios de *tilt* fossem realizados nas mesmas condições.



Fig. 39 – Preparação das superfícies serradas das diaclases com a mó

5

Resultados dos ensaios laboratoriais

5.1. DESCRIÇÃO DOS PROVETES ENSAIADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a determinação dos parâmetros do modelo de Barton (JRC , JCS e ϕ_r), cujos procedimentos de execução foram descritos anteriormente (ensaios sem força normal de *push* e *pull* e ensaios de inclinação progressiva).

Os ensaios foram executados em 67 provetes de diaclases que já tinham sido previamente usadas para a determinação dos parâmetros do modelo de Coulomb por meio de ensaios de deslizamento realizados seguindo o procedimento dos ensaios para a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade de descontinuidades rochosas LMR 04 (versão 01), e que segue o ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (Muralha et al. 2014).

Os dados resultantes desses ensaios (relações entre tensões e deslocamentos) são geralmente apresentados através dos gráficos tensão tangencial – deslocamento tangencial e deslocamento normal – deslocamento tangencial para cada um dos quatro deslizamentos executados sob tensões normais mantidas constantes. Na Fig. 40 apresenta-se um exemplo destes gráficos.

A partir dos dados destes gráficos são calculados os valores da tensão tangencial resistente para cada uma das tensões normais de deslizamento, com os quais são determinados os parâmetros de Coulomb: coesão aparente (c) e ângulo de atrito (ϕ). Na Fig. 41 apresenta-se o gráfico (τ , σ_n) determinado a partir dos resultados do exemplo da figura anterior. Nesta figura encontra-se a envolvente de Mohr-Coulomb calculada por regressão linear. De referir, ainda, que os gráficos (δ_n , δ_t) permitem determinar os ângulos de dilatação para cada deslizamento.

Os 67 provetes usados neste estudo podem ser agrupados em três grupos. O primeiro corresponde aos provetes 127 a 256 e agrupa 18 diaclases de granitos de grão grosseiro porfiróides; o segundo integra os provetes 301 a 395 e são de 19 diaclases de rochas granitóides de um maciço metamórfico; o terceiro compreende os provetes 573 a 594 e são 22 diaclases de grauvaques e metagruvaques de um maciço xistoso. Os restantes 8 provetes, referenciados de A a H, são de diaclases de vários tipos de rochas, como granitos, micaxistos e migmatitos, que não se podem agrupar.

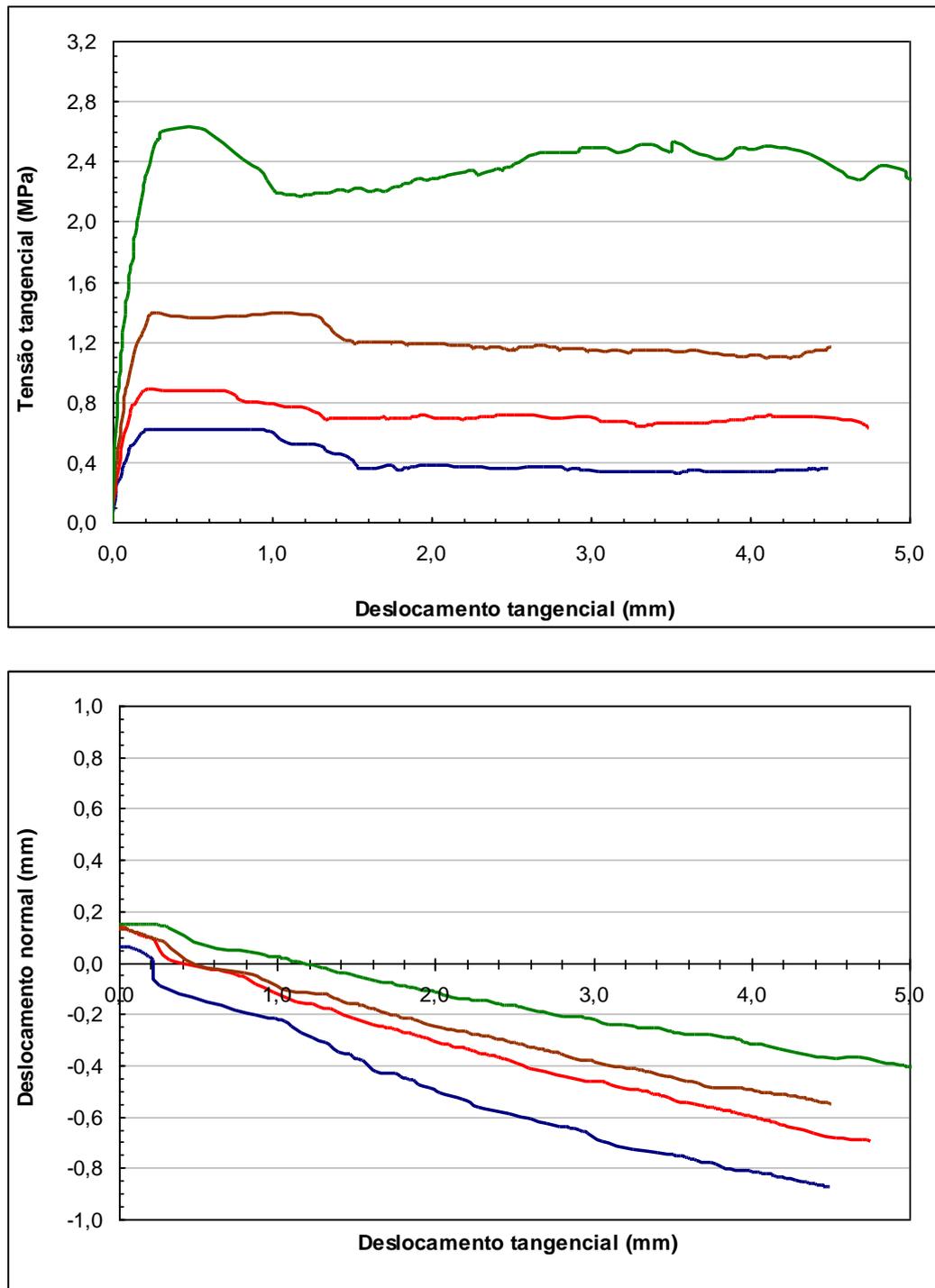


Fig. 40 - Exemplo de gráficos (τ, δ_i) e (δ_n, δ_i) de um ensaio de deslizamento de diaclase (provete 132)

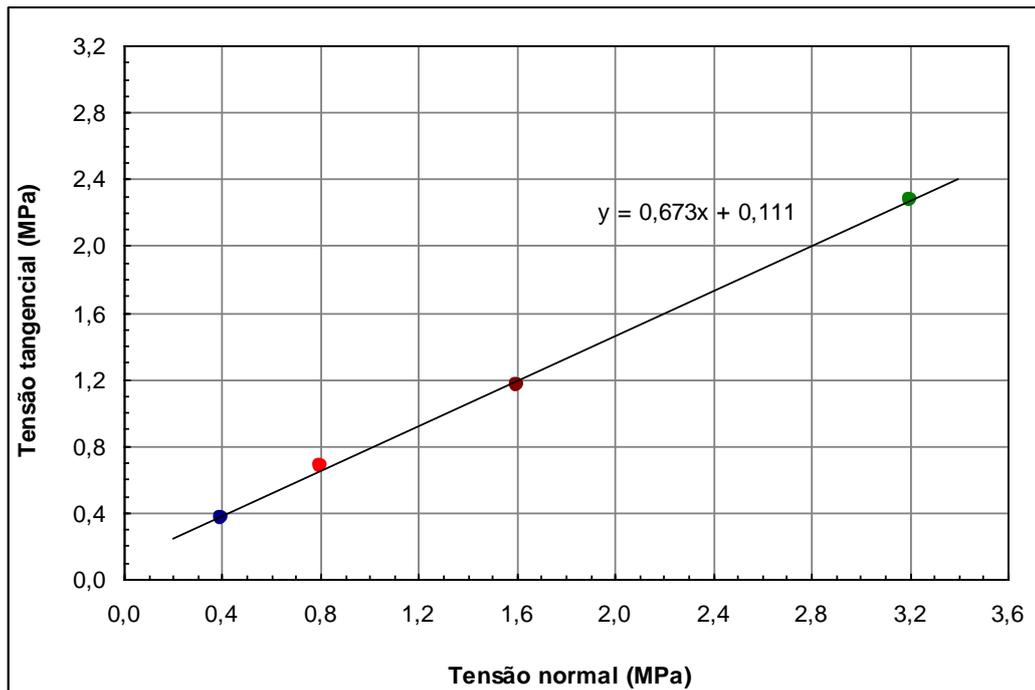


Fig. 41 - Exemplo de gráfico (τ , σ_n) de um ensaio de deslizamento de diaclase com a respectiva envolvente de Mohr-Coulomb (provete 132)

5.2. ENSAIO DE DESLIZAMENTO SEM FORÇA NORMAL (*PUSH TESTS*)

Com este ensaio pretende-se, em primeiro lugar, avaliar a resistência tangencial duma diaclase e, complementarmente, o efeito global da rugosidade. Dado que os ensaios se realizam a tensão normal muito baixa, a rugosidade tem aqui, a sua influência mais expressiva na resistência ao deslizamento duma diaclase. A influência da rugosidade é definida pela dilatância, $\tan(i)$, e pelo respetivo ângulo de dilatância (i), parâmetros deduzidos da análise dos gráficos (δ_n , δ_t) e (τ , δ_t) obtidos do ensaio. O declive do gráfico de deslocamento normal – deslocamento tangencial, para um determinado intervalo de deslocamento tangencial onde a tensão ou força tangencial não apresente variação pronunciada, representa a dilatância. O ângulo de dilatância representa a influência geral da rugosidade no modelo de Barton, combinando a componente geométrica da rugosidade (JRC) e a componente relacionada com a rotura das asperezas (JCS/σ_n), sendo definido pela expressão (11) apresentada no capítulo 3.

Nestes ensaios, onde a leitura dos deslocamentos tangenciais e normais durante a aplicação da força tangencial é contínua, é possível representar o comportamento tangencial da superfície duma diaclase, de forma direta, pelos gráficos força tangencial – deslocamento tangencial e deslocamento normal – deslocamento tangencial, (F_t , δ_t) e (δ_n , δ_t) respetivamente. A Fig. 42 apresenta, a título de exemplo, os resultados obtidos para o provete 132.

O valor da tensão tangencial (τ) é obtido da razão da força tangencial (F_t) pela respetiva área da superfície da diaclase (A), como se apresenta na expressão (18). No entanto, interessa referir, que a força tangencial medida ao longo do ensaio comporta a resistência que os transdutores oferecem ao movimento. Tendo em conta o referido, a tensão tangencial foi calculada com a força tangencial medida subtraída da força mobilizada nos transdutores tangenciais, que é obtida pela lei linear de comportamento dos transdutores obtida da calibração dos mesmos, como se apresenta no capítulo 4. A

Fig. 43 ilustra o exemplo do gráfico tensão tangencial – deslocamento tangencial, (τ, δ_t) , para estes ensaios.

$$\tau = \frac{F_t}{A} \quad (18)$$

No que respeita à tensão normal (σ_n) que se mobiliza na superfície da diaclase durante este ensaio, é obtida da razão do peso exercido sobre a superfície da diaclase pela área da mesma, como se expressa na equação (19). No entanto, salienta-se que neste ensaio o peso exercido sobre a diaclase não é apenas o da metade superior do provete, determinado durante o ensaio *pull*, comporta também o peso do suporte de plástico usado para a interação dos transdutores com essa mesma metade. No âmbito do presente trabalho, para este ensaio, o peso exercido sobre a diaclase foi representado pela sigla W .

$$\sigma_n = \frac{W}{A} \quad (19)$$

Entretanto é importante avaliar a variação da tensão normal durante o deslizamento, pois os transdutores responsáveis pela medição dos deslocamentos normais apresentam resistência ao movimento normal da metade superior do provete em relação ao plano médio do deslizamento, o que se reflete num acréscimo de tensão normal com a dilatância. A Fig. 44 apresenta a variação da tensão normal com o deslocamento tangencial, gráfico (σ_n, δ_t) , do provete 132, com uma tensão normal inicial de 6,96 kPa. Da análise da figura referida, conclui-se que o acréscimo de tensão normal durante o deslizamento (cerca de 0,09 kPa) é reduzido quando comparado com a tensão normal já existente antes do deslizamento, cerca de 1%. Assim, considera-se razoável desprezar a contribuição dos transdutores normais na tensão normal.

Analogamente ao referido anteriormente para os ensaios de deslizamento, nestes ensaios o valor da tensão tangencial resistente e do ângulo de dilatância são obtidos a partir dos gráficos tensão tangencial – deslocamento tangencial e deslocamento normal – deslocamento tangencial. Ambos os valores foram calculados a partir de médias aritméticas para um determinado intervalo de deslocamento tangencial, escolhido em cada provete de acordo com a evolução dos gráficos referidos. A Fig. 45 apresenta um exemplo dos gráficos (τ, δ_t) e (δ_n, δ_t) utilizados para inferir os valores da tensão tangencial resistente e do ângulo de dilatância, estando evidenciado a traço interrompido na figura esses mesmos valores para o intervalo de deslocamento tangencial escolhido.

Os gráficos utilizados para a determinação dos valores da tensão tangencial resistente e do ângulo de dilatância dos restantes provetes, como os apresentados na Fig. 45, encontram-se no Anexo A. No entanto, os valores dos parâmetros, em discussão, de todos os provetes encontram-se na Tabela 4. Ainda na mesma tabela, para cada provete, para além do valor da tensão tangencial resistente média também se apresenta o valor da tensão tangencial máxima medida, os valores dos coeficientes e ângulos de atrito para cada uma dessas tensões (designados $\tan \alpha$ e α , respetivamente), e os parâmetros complementares usados para a determinação dos anteriores. Interessa referir que os parâmetros de atrito são obtidos da relação da tensão tangencial (τ) com a tensão normal (σ_n), pela expressão (20).

$$\tan \alpha = \tau / \sigma_n \quad (20)$$

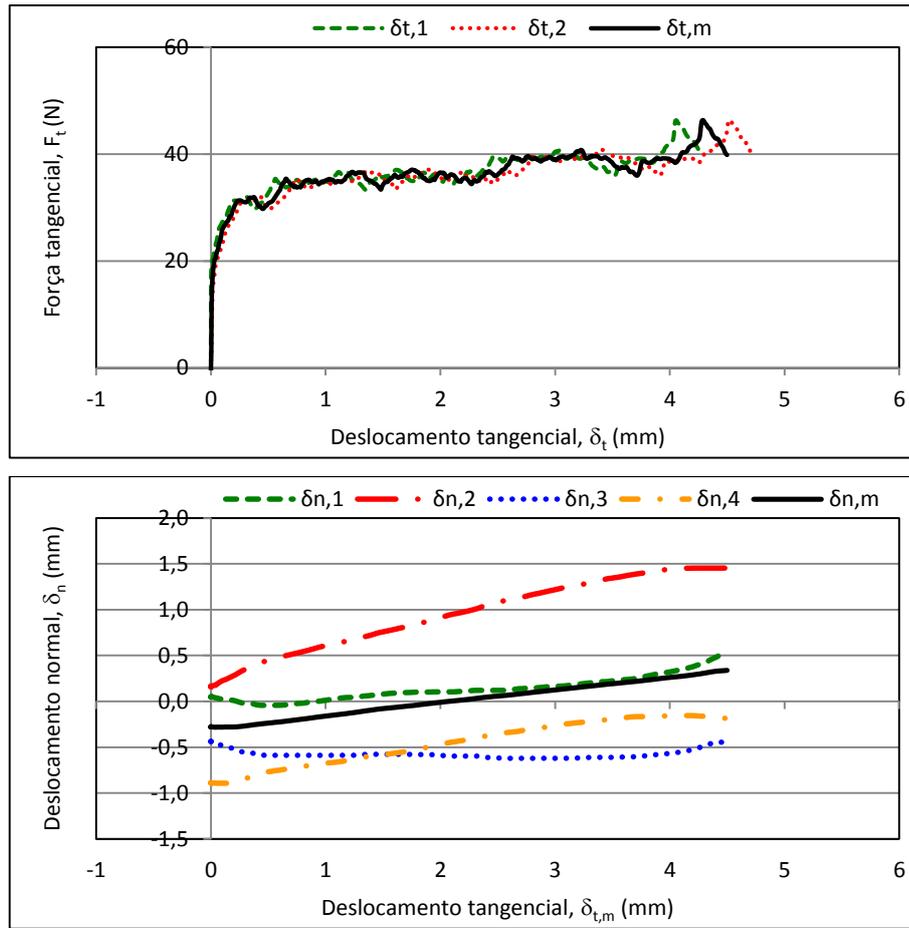


Fig. 42 – Exemplo dos gráficos (F_t , $\delta_{t,m}$) e (δ_n , $\delta_{t,m}$) obtidos no ensaio *push* (provete 132)

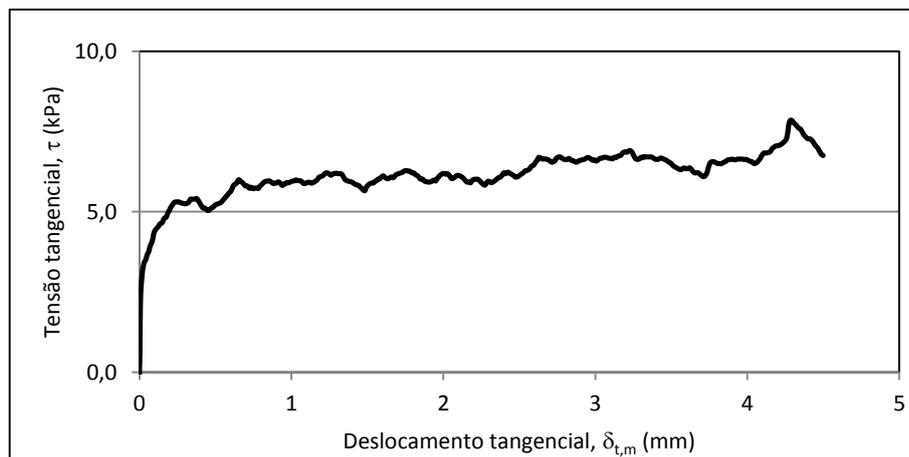


Fig. 43 – Exemplo do gráfico (τ , $\delta_{t,m}$) obtido no ensaio *push* (provete 132)

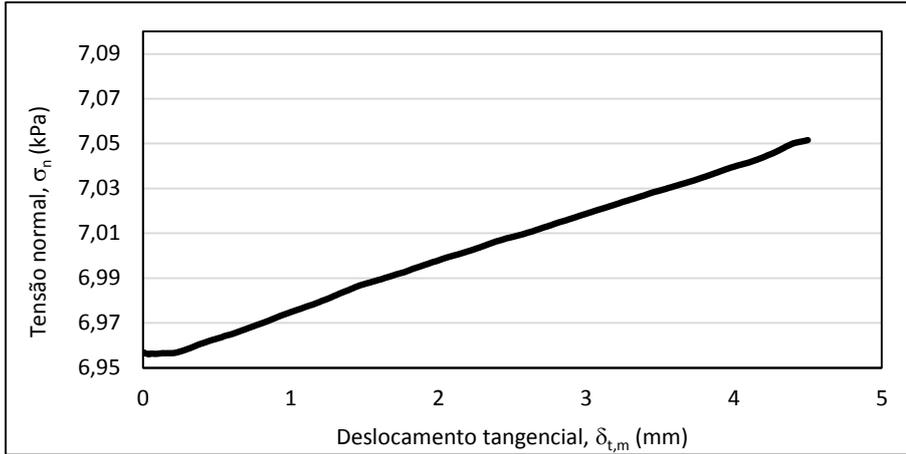


Fig. 44 – Exemplo do gráfico $(\sigma_n, \delta_{t,m})$ obtido no ensaio *push* (provete 132)

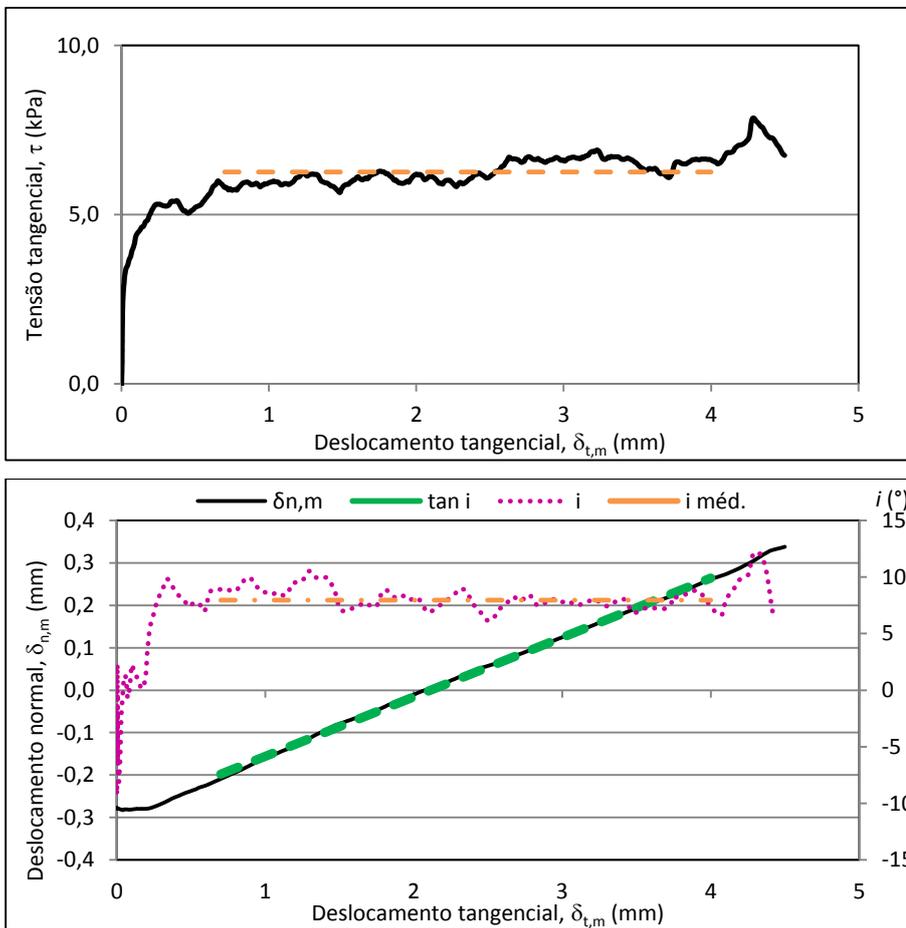


Fig. 45 – Exemplo dos gráficos $(\tau, \delta_{t,m})$ e $(\delta_{n,m}, \delta_{t,m})$ do ensaio *push* utilizados para inferir os valores da tensão tangencial resistente e do ângulo de dilatação (provete 132)

Tabela 4 – Valores da tensão tangencial resistente média ($\tau_{méd.}$) e máxima ($\tau_{máx.}$), dos ângulos de atrito correspondentes às mesmas e dos ângulos de dilatação para todos os provetes no ensaio *push*

Provete	Área (mm ²)	W (g)	W _t (N)	σ_n (kPa)	$\tau_{méd.}$ (kPa)	$\tau_{máx.}$ (kPa)	Médio		Máximo			
							$\tan \alpha$	α	$\tan \alpha$	α	$\tan i$	i (°)
127	3610	3204,6	38,47	10,66	10,18	13,48	0,955	43,7	1,265	51,7	0,061	3,5
130	8375	3492,3	41,29	4,93	3,23	3,79	0,656	33,3	0,768	37,5	0,130	7,4
131	7795	3591,8	42,27	5,42	5,57	6,02	1,026	45,7	1,109	48,0	0,090	5,2
132	5900	3467,0	41,04	6,96	6,26	7,85	0,900	42,0	1,128	48,4	0,140	8,0
133	6435	3532,7	41,69	6,48	5,22	5,84	0,806	38,9	0,901	42,0	0,112	6,4
134	4860	3260,7	39,02	8,03	2,34	5,27	0,292	16,3	0,656	33,3	-0,051	-2,9
135	4280	3245,0	38,87	9,08	6,61	7,45	0,728	36,0	0,821	39,4	0,090	5,1
136	5840	3233,6	38,76	6,64	5,06	8,26	0,762	37,3	1,245	51,2	0,145	8,2
137	4400	3461,4	40,99	9,32	6,31	7,77	0,677	34,1	0,834	39,8	0,133	7,6
140	4100	3496,5	41,33	10,08	6,95	9,78	0,690	34,6	0,970	44,1	0,072	4,1
141	6130	3449,2	40,87	6,67	4,57	6,76	0,686	34,4	1,014	45,4	0,128	7,3
142	4020	3489,5	41,27	10,27	6,06	9,83	0,591	30,6	0,958	43,8	0,115	6,6
143	7780	3589,9	42,25	5,43	3,05	4,18	0,562	29,3	0,771	37,6	0,053	3,1
249	3185	3713,0	43,46	13,64	9,26	16,77	0,679	34,2	1,229	50,9	0,085	4,9
253	5820	3547,9	41,84	7,19	2,18	4,13	0,303	16,9	0,574	29,9	-0,001	0,0
254	4450	3394,0	40,33	9,06	6,14	7,34	0,677	34,1	0,810	39,0	0,053	3,1
255	3600	3430,8	40,69	11,30	11,15	19,00	0,987	44,6	1,681	59,3	0,174	9,9
256	4490	3087,0	37,32	8,31	5,62	7,03	0,676	34,1	0,846	40,2	0,049	2,8
301	5330	3438,7	40,77	7,65	5,42	6,78	0,709	35,3	0,887	41,6	0,093	5,3
302	4970	3401,4	40,40	8,13	8,52	14,15	1,048	46,3	1,741	60,1	0,203	11,5
303	4560	3586,6	42,22	9,26	18,92	23,36	2,044	63,9	2,523	68,4	0,253	14,2
304	3280	3642,4	42,76	13,04	23,67	32,29	1,816	61,2	2,476	68,0	0,210	11,9
305	3750	3522,9	41,59	11,09	23,71	30,25	2,138	64,9	2,728	69,9	0,341	18,8
306	5840	3357,1	39,97	6,84	13,74	17,61	2,008	63,5	2,573	68,8	0,251	14,1
307	5840	3405,5	40,44	6,92	6,83	7,24	0,986	44,6	1,045	46,3	0,166	9,4
308	4640	3271,4	39,13	8,43	10,40	12,70	1,234	51,0	1,507	56,4	0,083	4,8
309	4530	3297,0	39,38	8,69	9,41	11,71	1,082	47,3	1,347	53,4	0,110	6,3
335	4120	3616,2	42,51	10,32	7,64	11,35	0,740	36,5	1,100	47,7	0,139	7,9
336	3890	3580,9	42,16	10,84	14,27	16,28	1,317	52,8	1,502	56,3	0,100	5,7
389	5610	3226,4	38,69	6,90	7,18	14,36	1,041	46,1	2,082	64,3	0,132	7,5
390	4280	3266,9	39,08	9,13	8,70	13,49	0,953	43,6	1,478	55,9	0,133	7,6
391	4750	3050,8	36,96	7,78	6,50	10,30	0,836	39,9	1,324	52,9	0,109	6,2

Comparação dos Modelos de Coulomb e de Barton para a Resistência Tangencial de Descontinuidades Rochosas

392	4675	3128,9	37,73	8,07	13,24	30,57	1,640	58,6	3,788	75,2	0,184	10,4
393	3650	3377,6	40,17	11,00	13,76	15,44	1,251	51,4	1,403	54,5	0,154	8,8
394 A	4100	3341,1	39,81	9,71	9,47	10,48	0,975	44,3	1,079	47,2	0,202	11,4
394 B	4100	3160,4	38,04	9,28	5,99	19,13	0,646	32,9	2,062	64,1	0,244	13,7
395	4210	3336,4	39,76	9,45	12,84	13,80	1,359	53,7	1,461	55,6	0,098	5,6
573	8445	3230,3	38,72	4,59	1,45	2,08	0,316	17,5	0,454	24,4	0,047	2,7
574	8395	3391,8	40,31	4,80	4,17	5,01	0,868	41,0	1,044	46,2	0,154	8,8
575	8115	3214,5	38,57	4,75	2,57	2,77	0,541	28,4	0,584	30,3	0,081	4,6
576	8630	3418,5	40,57	4,70	2,18	2,80	0,464	24,9	0,596	30,8	0,042	2,4
577	7225	3266,4	39,08	5,41	1,91	2,07	0,354	19,5	0,383	20,9	0,067	3,9
578	7750	3292,2	39,33	5,07	1,24	1,89	0,245	13,8	0,372	20,4	0,015	0,8
579	7305	3311,4	39,52	5,41	1,93	1,98	0,356	19,6	0,365	20,1	0,027	1,5
580	7420	3287,7	39,29	5,29	2,22	2,56	0,420	22,8	0,483	25,8	0,007	0,4
581	5050	3327,6	39,68	7,86	3,17	6,48	0,403	22,0	0,825	39,5	0,045	2,6
582	4605	3225,1	38,67	8,40	8,27	11,21	0,985	44,6	1,335	53,2	0,200	11,3
583	5125	3173,0	38,16	7,45	3,83	6,07	0,515	27,2	0,815	39,2	0,095	5,4
584	5460	3306,6	39,47	7,23	8,74	9,60	1,210	50,4	1,328	53,0	0,163	9,2
585	7810	3223,3	38,65	4,95	3,78	5,19	0,763	37,3	1,049	46,4	0,128	7,3
586	7775	3287,2	39,28	5,05	2,75	4,28	0,544	28,5	0,846	40,2	0,110	6,3
587	8135	3341,5	39,81	4,89	2,37	3,55	0,484	25,8	0,726	36,0	0,091	5,2
588	7252	3290,2	39,31	5,42	2,61	3,91	0,481	25,7	0,722	35,8	0,100	5,7
589	9380	3553,4	41,89	4,47	2,89	4,00	0,648	32,9	0,895	41,8	0,088	5,0
590	6500	3346,7	39,86	6,13	2,73	3,39	0,446	24,0	0,553	28,9	0,030	1,7
591	7955	3368,0	40,07	5,04	2,18	2,81	0,433	23,4	0,558	29,1	0,025	1,5
592	7435	3458,2	40,96	5,51	1,61	2,21	0,293	16,3	0,401	21,8	0,021	1,2
593	8965	3376,8	40,16	4,48	2,12	2,77	0,473	25,3	0,618	31,7	0,073	4,2
594	6280	3175,4	38,19	6,08	1,96	2,05	0,323	17,9	0,337	18,6	0,081	4,6
A	10000	2712,3	33,64	3,36	1,75	2,05	0,519	27,4	0,609	31,3	0,016	0,9
B	10000	2945,4	35,93	3,59	3,47	5,17	0,967	44,0	1,439	55,2	0,123	7,0
C	10000	2754,5	34,06	3,41	2,37	4,05	0,696	34,8	1,190	50,0	0,089	5,1
D	10000	3236,3	38,78	3,88	3,77	6,43	0,972	44,2	1,658	58,9	0,218	12,3
E	10000	3100,9	37,45	3,75	3,34	4,42	0,892	41,7	1,180	49,7	0,159	9,0
F	10000	3337,2	39,77	3,98	2,77	3,15	0,697	34,9	0,793	38,4	0,091	5,2
G	10000	2977,3	36,24	3,62	1,86	2,46	0,512	27,1	0,679	34,2	0,027	1,6
H	6290	3325,4	39,66	6,30	4,65	6,51	0,737	36,4	1,033	45,9	0,082	4,7

5.3. ENSAIO SEM FORÇA NORMAL (PULL TESTS)

Com estes ensaios pretende-se avaliar a resistência tangencial das superfícies das diaclases a ensaiar, tendo em conta o valor da força tangencial (F) que puxa e provoca o deslizamento da metade superior do provete, como referido na secção 4.3 do capítulo anterior. No âmbito do presente trabalho, neste ensaio foram realizadas onze determinações da força tangencial para cada provete. Os resultados das onze determinações de cada provete apresentam-se em forma gráfica e por grupos de provetes (grupos referidos anteriormente, com base na litologia). Os resultados referentes ao grupo das diaclases de granitos de grão grosseiro apresentam-se na Fig. 46, os do grupo das diaclases de rochas granitóides na Fig. 47, os do grupo de diaclases de grauvaques e metagruvaques na Fig. 48 e os das restantes diaclases na Fig. 49.

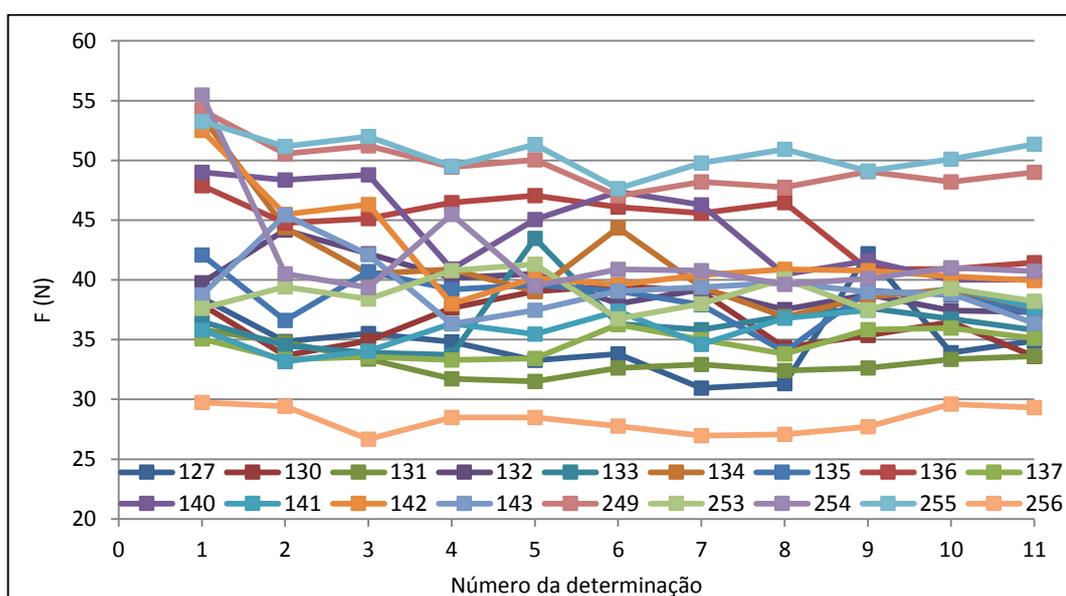


Fig. 46 – Resultados do ensaio *pull* para o grupo de diaclases de granitos

Da análise destas figuras conclui-se que a dispersão do valor da força tangencial, ao longo de todas as determinações, para uma diaclase, é tendencialmente reduzida, no entanto, algumas diaclases têm tendência a apresentar valores iniciais com uma diferença importante (superior a 10%) em relação aos restantes valores. De uma forma geral, na grande maioria das diaclases, a partir da terceira ou quarta determinação os valores da força tangencial tendem a ser muito próximos, havendo casos com pequenas variações pontuais.

De forma a compreender concretamente a dispersão dos valores da força tangencial e escolher um valor que represente adequadamente a força tangencial tendo em conta a sua dispersão ao longo das determinações, foi efetuado um tratamento dos resultados atendendo a parâmetros estatísticos básicos, nomeadamente, valor mínimo, valor máximo, média, mediana, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). A Tabela 5 apresenta, a título de exemplo, os valores dos parâmetros estatísticos básicos para uma diaclase de granito de grão grosseiro (provetes 132). Os valores destes mesmos parâmetros estatísticos de todas as diaclases estudadas apresentam-se em tabela no anexo B.

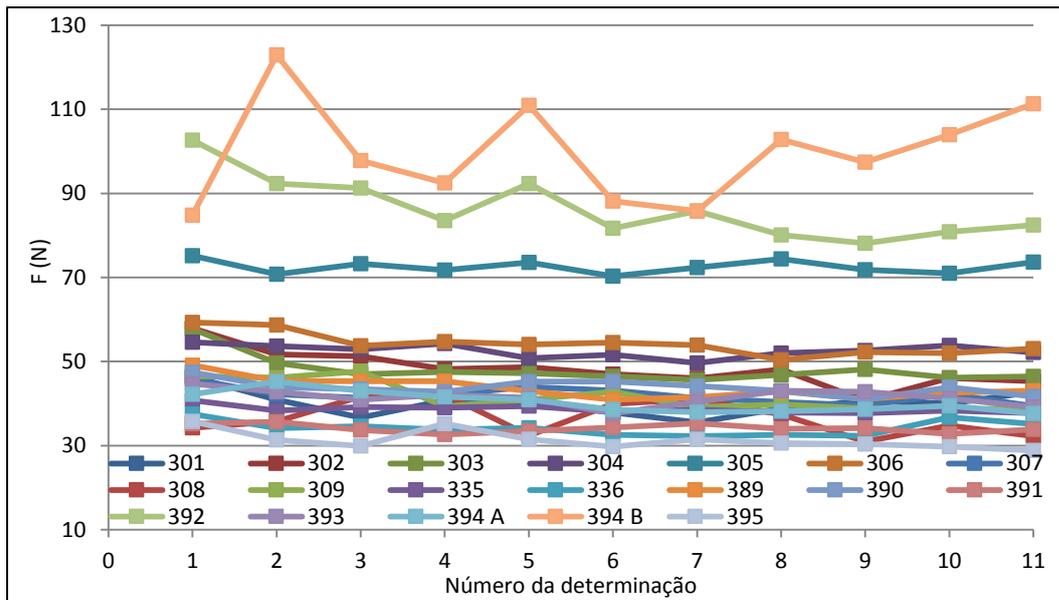


Fig. 47 – Resultados do ensaio *pull* para o grupo de diaclases de rochas granitóides

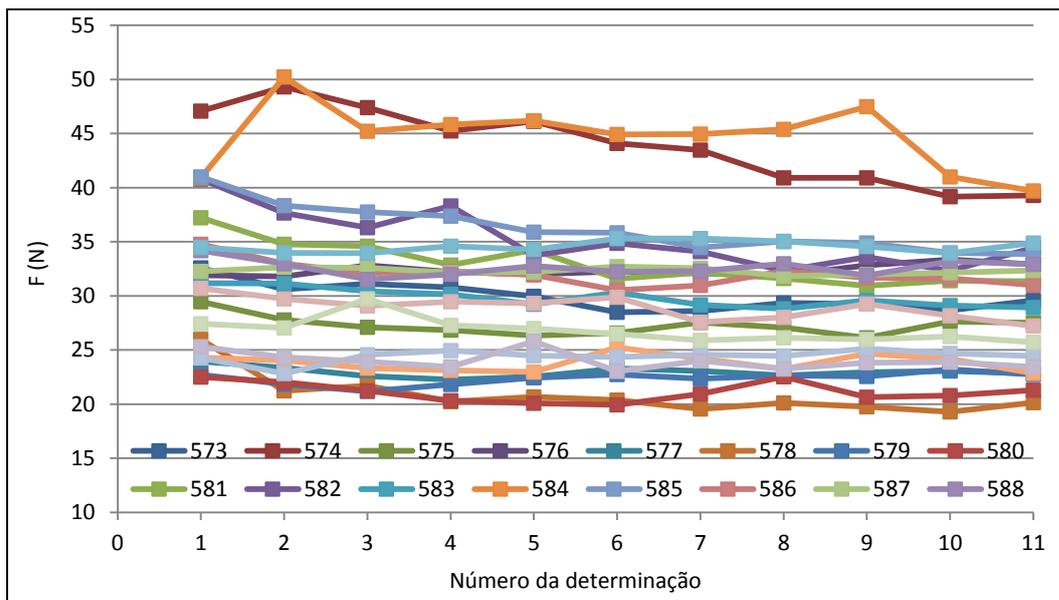


Fig. 48 - Resultados do ensaio *pull* para o grupo de diaclases de grauvaques e metagruvaques

Tabela 5 – Valores dos parâmetros estatísticos dos ensaios *pull* do provete 132

Provete	132
Mínimo (kPa)	37,29
Média (kPa)	39,55
Máximo (kPa)	44,18
Mediana (kPa)	39,21
DP	2,16
CV (%)	5,45

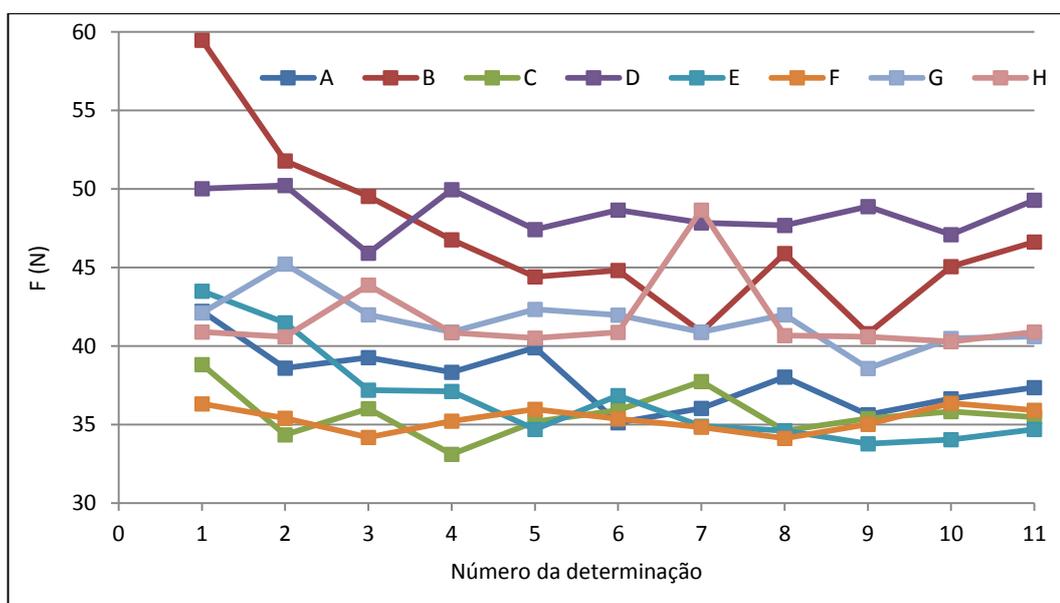


Fig. 49 - Resultados do ensaio *pull* para o grupo das restantes diaclases

Da análise dos parâmetros estatísticos, verifica-se que, geralmente, os valores da média aritmética e da mediana são muito próximos e que os coeficientes de variação são reduzidos: inferiores a 10% em quase todas as diaclases, inferiores a 5% em cerca de 43% dos casos e inferiores a 3% em cerca de 37% dos casos.

No que respeita aos valores da média e da mediana da força tangencial, foi realizada uma análise da sua evolução com o número de determinações, começando-se pelo valor de ambos os parâmetros para as três primeiras determinações e efetuando-se o seu cálculo progressivamente até considerar todas as determinações. Interessa referir que a consideração dos valores destes parâmetros para um número de determinações inferior a três não é aconselhável, pois considerou-se que os mesmos representam de forma precária a força tangencial em termos estatísticos. A evolução do valor da média e da mediana da força tangencial apresenta-se, graficamente: para o grupo das diaclases de granitos de grão grosseiro nas Fig. 50 e Fig. 51; para o grupo das diaclases de rochas granitóides nas Fig. 52 e Fig. 53; para o grupo de diaclases de grauvaques e metagruvaques nas Fig. 54 e Fig. 55; e para as restantes diaclases nas Fig. 56 e Fig. 57.

Da análise das figuras referidas para a análise da evolução do valor da média e da mediana, verifica-se, de forma geral, que a partir da sexta ou sétima determinação os valores apresentam uma variação muito reduzida, e conclui-se que para este ensaio seria aceitável a realização de seis ou sete determinações da força tangencial.

Apesar desta conclusão, que pode servir para incluir no procedimento destes ensaios, no âmbito deste estudo, para o valor da força tangencial, como resultado direto do ensaio de cada diaclase, considerou-se o valor da mediana das onze determinações, pois este valor exclui à partida eventuais extremos. O coeficiente de atrito ($\tan \alpha$), dado pelo cociente da força tangencial (F) pelo peso da metade superior do provete (W), constitui o resultado final deste ensaio. Os resultados dos ensaios *pull* apresentam-se na Tabela 6, referindo-se para cada diaclase os valores da força normal e da força tangencial, bem como os valores do coeficiente de atrito e ângulo de atrito (α).

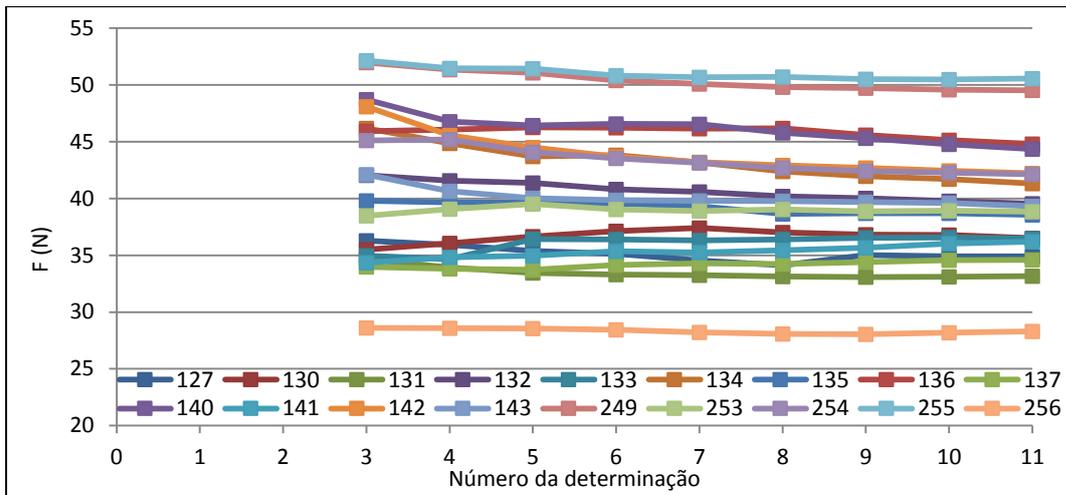


Fig. 50 – Evolução do valor da média da força tangencial das diaclases de granitos de grão grosso

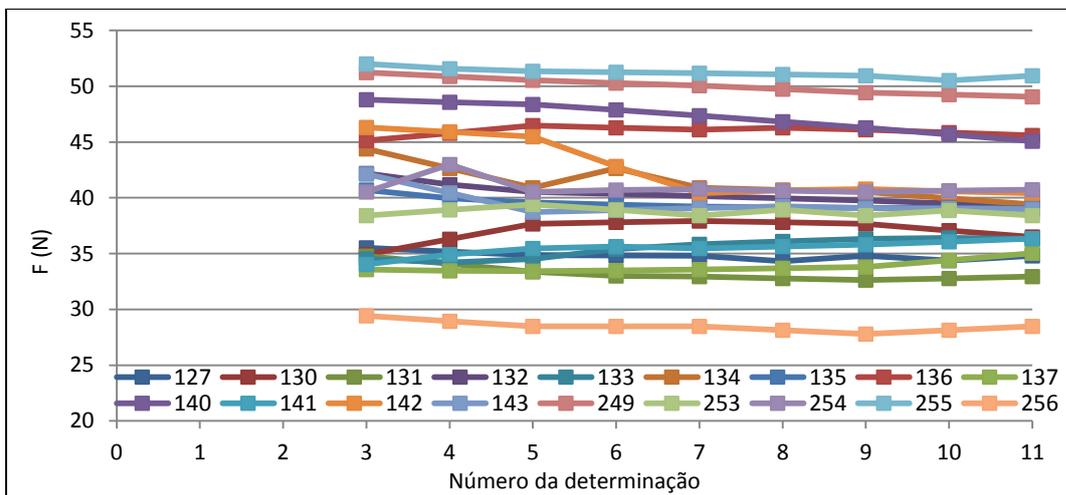


Fig. 51 - Evolução do valor da mediana da força tangencial das diaclases de granitos de grão grosso

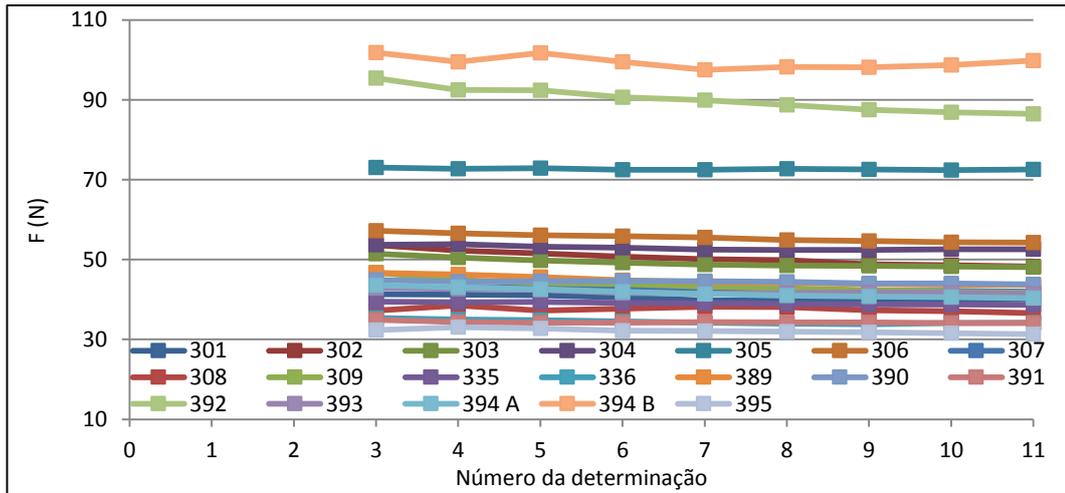


Fig. 52 - Evolução do valor da média da força tangencial das diaclases de rochas granitóides

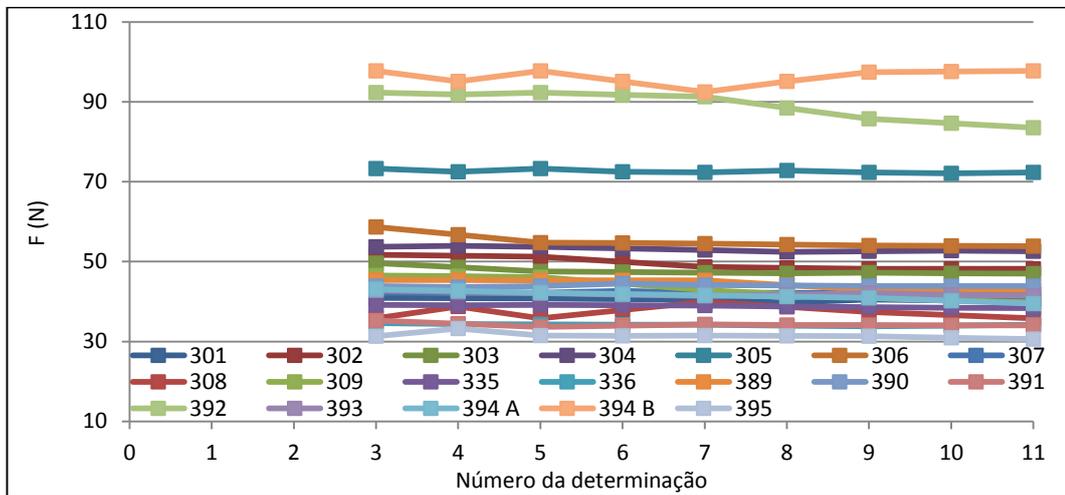


Fig. 53 - Evolução do valor da mediana da força tangencial das diaclases de rochas granitóides

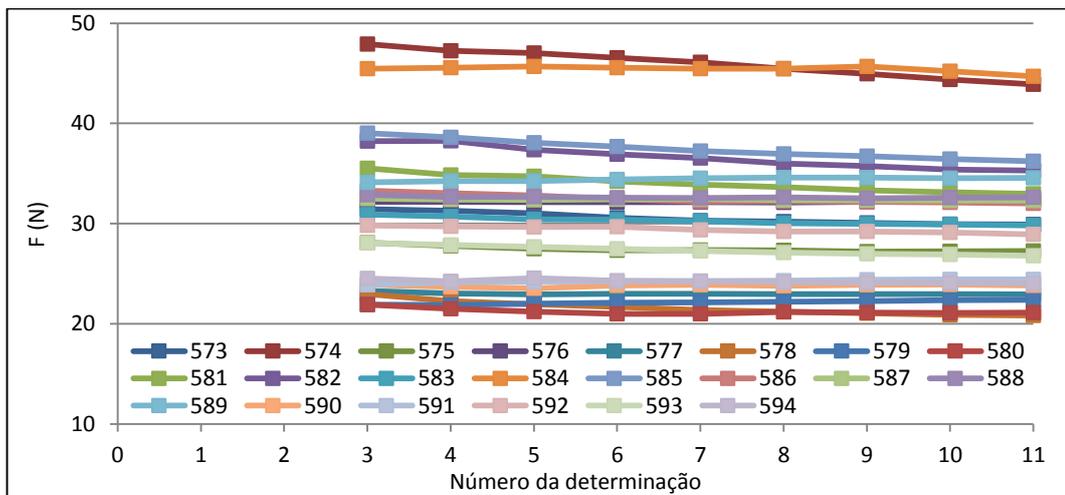


Fig. 54 - Evolução do valor da média da força tangencial das diaclases de grauvaques e metagruvaques

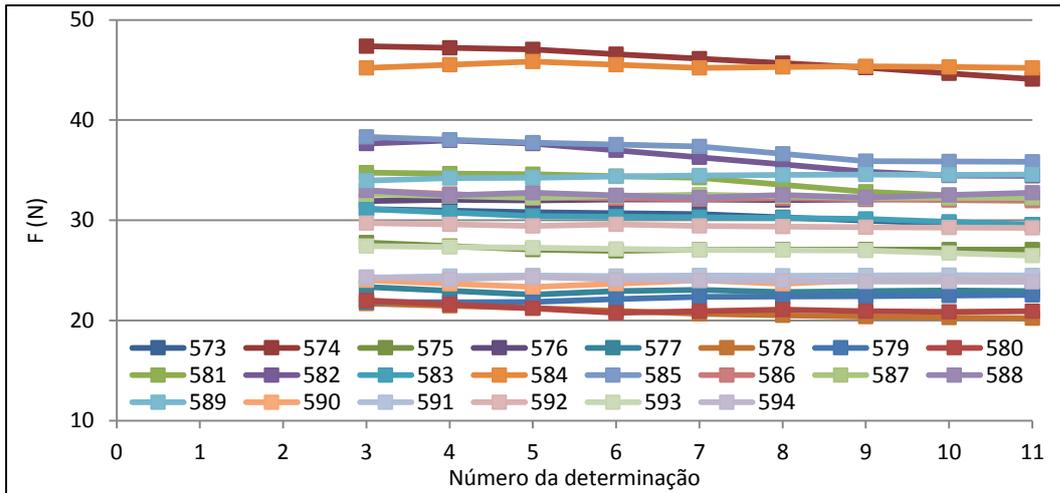


Fig. 55 - Evolução do valor da mediana da força tangencial das diaclases de grauvaques e metagruvaques

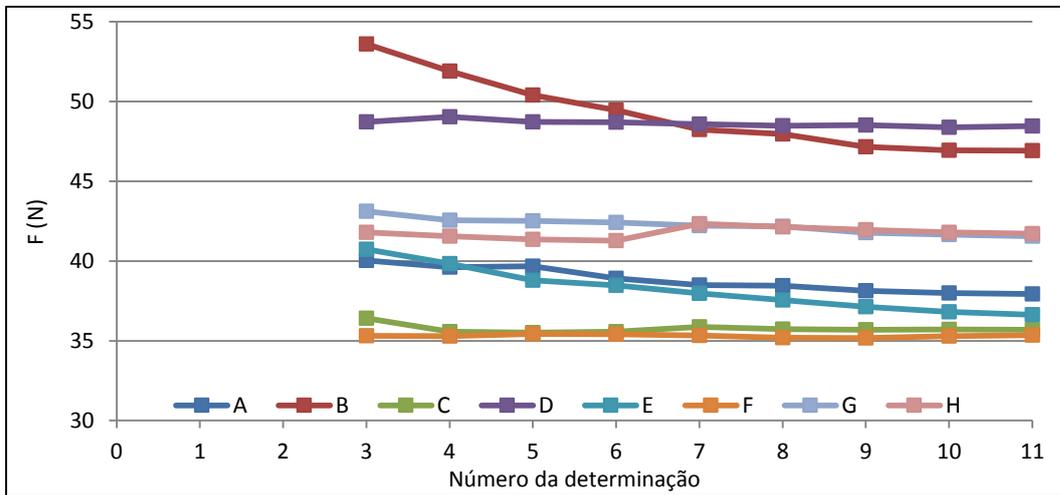


Fig. 56 - Evolução do valor da média da força tangencial das restantes diaclases

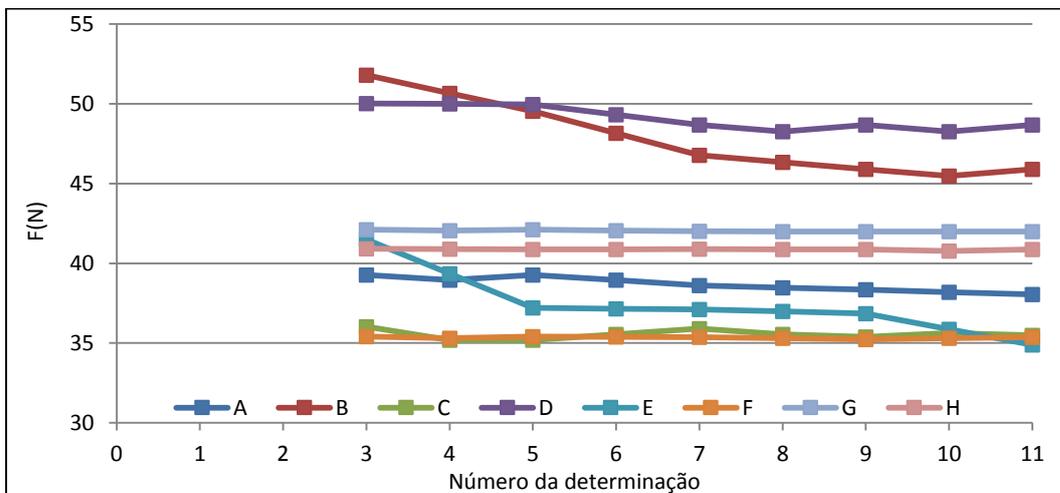


Fig. 57 - Evolução do valor da mediana da força tangencial das restantes diaclases

Tabela 6 – Resultados dos ensaios *pull*

Proвете	W (N)	F (N)	$\tan \alpha$	α	Proвете	W (N)	F (N)	$\tan \alpha$	α
127	31,43	34,81	1,108	47,9	394 A	32,76	39,45	1,204	50,3
130	34,25	36,49	1,065	46,8	394 B	30,99	97,81	3,156	72,4
131	35,22	32,93	0,935	43,1	395	32,72	30,59	0,935	43,1
132	34,00	39,21	1,153	49,1	573	31,68	29,57	0,933	43,0
133	34,64	36,31	1,048	46,3	574	33,26	44,09	1,326	53,0
134	31,98	39,40	1,232	50,9	575	31,52	27,10	0,860	40,7
135	31,82	39,07	1,228	50,8	576	33,52	32,21	0,961	43,9
136	31,71	45,58	1,437	55,2	577	32,03	22,95	0,716	35,6
137	33,94	35,02	1,032	45,9	578	32,29	20,22	0,626	32,1
140	34,29	45,06	1,314	52,7	579	32,47	22,57	0,695	34,8
141	33,83	36,33	1,074	47,0	580	32,24	20,94	0,649	33,0
142	34,22	40,41	1,181	49,7	581	32,63	32,14	0,985	44,6
143	35,20	38,99	1,108	47,9	582	31,63	34,44	1,089	47,4
249	36,41	49,06	1,347	53,4	583	31,12	29,57	0,950	43,5
253	34,79	38,41	1,104	47,8	584	32,43	45,21	1,394	54,3
254	33,28	40,73	1,224	50,7	585	31,61	35,84	1,134	48,6
255	33,64	50,93	1,514	56,5	586	32,24	31,94	0,991	44,7
256	30,27	28,48	0,941	43,3	587	32,77	32,25	0,984	44,5
301	33,72	40,49	1,201	50,2	588	32,27	32,75	1,015	45,4
302	33,36	48,16	1,444	55,3	589	34,85	34,57	0,992	44,8
303	35,17	46,98	1,336	53,2	590	32,82	24,04	0,732	36,2
304	35,72	52,63	1,473	55,8	591	33,03	24,49	0,741	36,6
305	34,55	72,32	2,093	64,5	592	33,91	29,25	0,863	40,8
306	32,92	53,87	1,636	58,6	593	33,12	26,49	0,800	38,7
307	33,40	42,14	1,262	51,6	594	31,14	23,88	0,767	37,5
308	32,08	35,78	1,115	48,1	A	26,60	38,04	1,430	55,0
309	32,33	39,81	1,231	50,9	B	28,88	45,90	1,589	57,8
335	35,46	38,36	1,082	47,3	C	27,01	35,48	1,313	52,7
336	35,12	34,17	0,973	44,2	D	31,74	48,67	1,534	56,9
389	31,64	42,95	1,358	53,6	E	30,41	34,89	1,147	48,9
390	32,04	43,86	1,369	53,9	F	32,73	35,37	1,081	47,2
391	29,92	34,02	1,137	48,7	G	29,20	41,98	1,438	55,2
392	30,68	83,52	2,722	69,8	H	32,61	40,86	1,253	51,4
393	33,12	41,38	1,249	51,3					

5.4. ENSAIO DE INCLINAÇÃO PROGRESSIVA NAS SUPERFÍCIES NATURAIS DAS DIACLASES (TILT TESTS)

Nestes ensaios a inclinação da plataforma rígida no instante do deslizamento da metade superior do provete é o resultado do ensaio e corresponde ao ângulo de atrito (α) da diaclase. No âmbito do presente trabalho, tal como para os ensaios *pull*, foram realizadas onze determinações do ângulo de atrito para cada diaclase. Os resultados das onze determinações apresentam-se considerando os mesmos conjuntos

dos ensaios *pull*. Os resultados referentes ao grupo das diaclases de granitos de grão grosso apresentam-se na Fig. 58; os do grupo das diaclases de rochas granitóides na Fig. 59; os do grupo de diaclases de grauvaques e metagrauvaques na Fig. 60; e os das restantes diaclases na Fig. 61.

Da análise das figuras referidas anteriormente, conclui-se que a dispersão do valor do ângulo de atrito para uma diaclase é tendencialmente reduzida, mostrando-se no caso do grupo dos provetes de A a H ligeiramente superior à dos restantes grupos. De uma forma geral, em todas as determinações os valores do ângulo de atrito são muito próximos, havendo pontualmente resultados cujo valor apresenta uma diferença importante em relação aos restantes.

Foi efetuado um tratamento dos resultados atendendo a parâmetros estatísticos básicos, como o efetuado para o ensaio *pull*. A Tabela 7 apresenta, a título de exemplo, os valores dos parâmetros estatísticos para uma diaclase de granito de grão grosso (proвете 132). Os valores dos parâmetros estatísticos básicos relativos ao ensaio *tilt* das superfícies naturais das diaclases apresentam-se em tabela no anexo B.

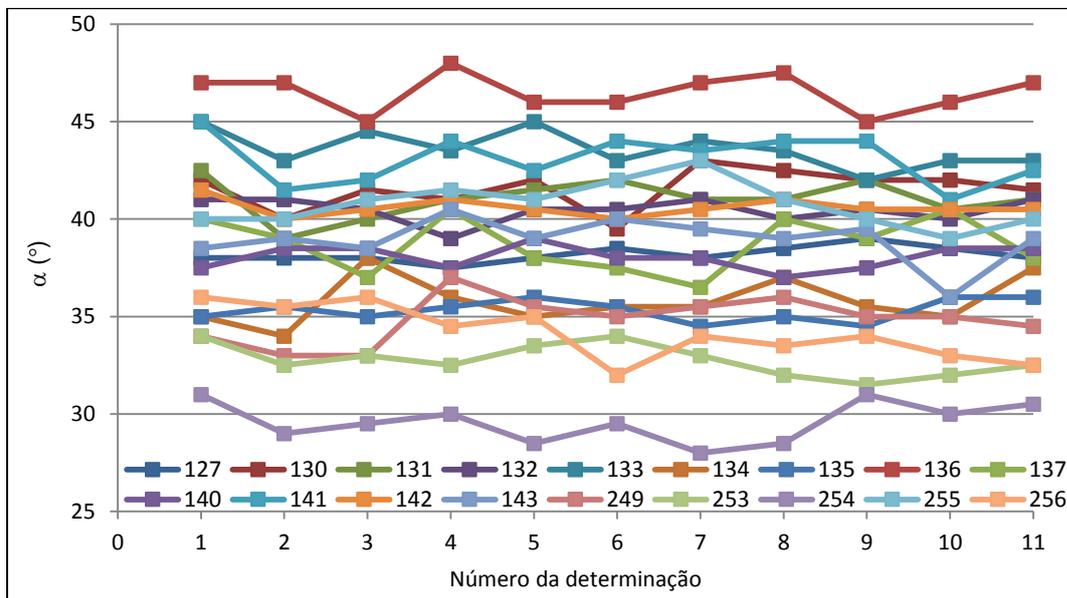


Fig. 58 - Resultados do ensaio *tilt* para as superfícies naturais de diaclases de granitos de grão grosso

Atendendo aos parâmetros estatísticos, verifica-se que os valores da média aritmética e da mediana são geralmente iguais, e que coeficientes de variação são muito reduzidos, apresentando-se, na grande maioria das diaclases, entre os 2 e 3%.

Analogamente aos ensaios *pull*, foi realizada uma análise da evolução dos valores da média e mediana do ângulo de atrito (α) com o número de determinações. A evolução do valor da média e da mediana do ângulo de atrito apresenta-se graficamente: para o grupo das diaclases de granitos de grão grosso na Fig. 62 e Fig. 63; para o grupo das diaclases de rochas granitóides na Fig. 64 e Fig. 65; para o grupo de diaclases de grauvaques e metagrauvaques na Fig. 66 e Fig. 67; e para as restantes diaclases na Fig. 68 e Fig. 69.

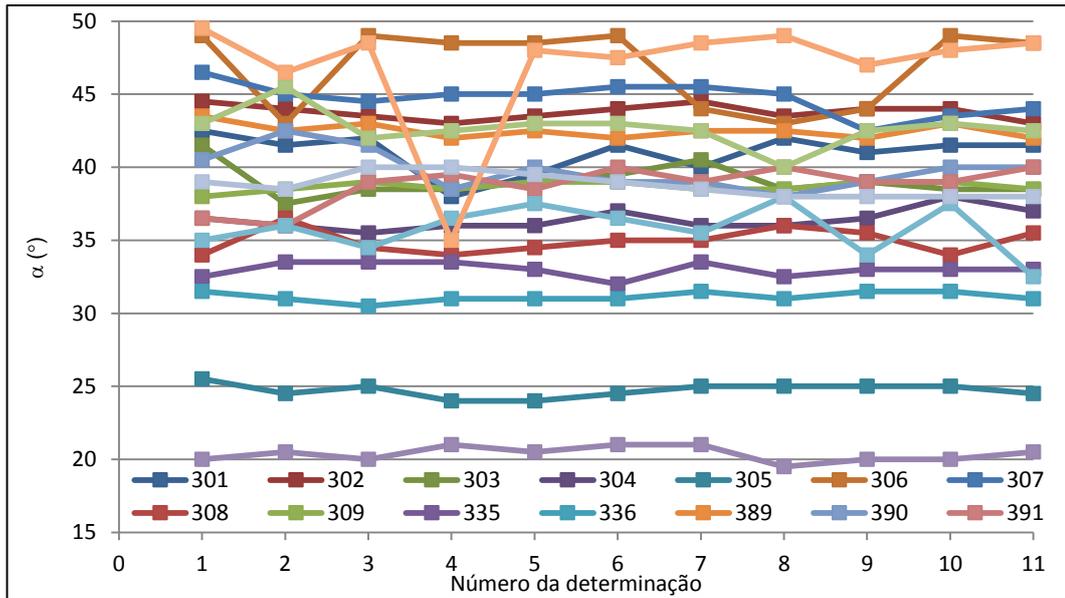


Fig. 59 - Resultados do ensaio *tilt* para as superfícies naturais de diaclases de rochas granitóides

Tabela 7 - Valores dos parâmetros estatísticos básicos do ensaio *tilt* do provete 132

Provete	132
Mínimo (°)	39,0
Média (°)	40,5
Máximo (°)	41,0
Mediana (°)	40,5
DP	0,61
CV (%)	1,51

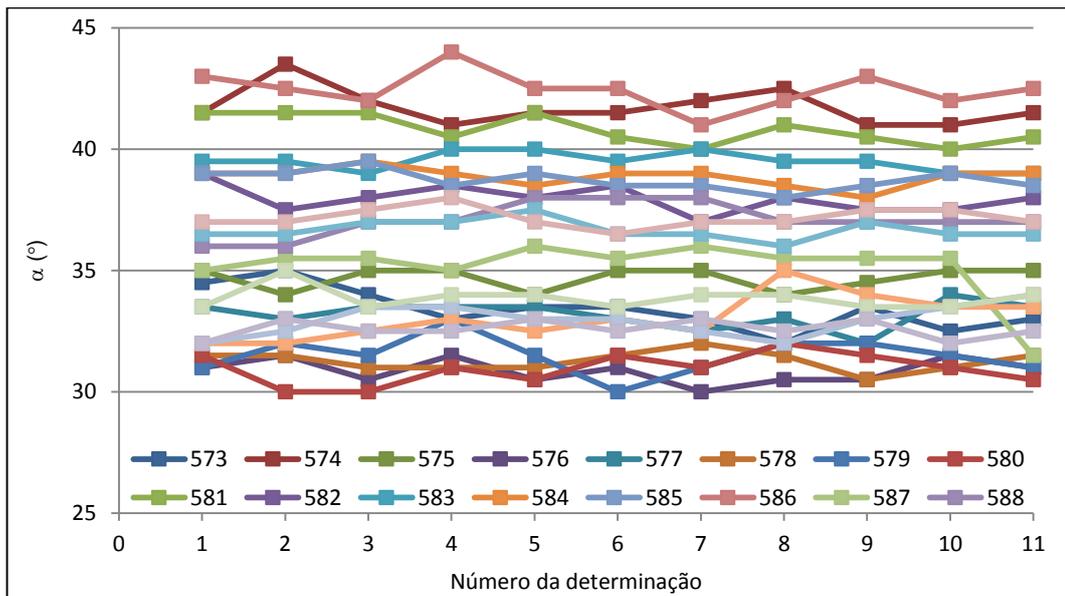


Fig. 60 - Resultados do ensaio *tilt* para as superfícies naturais de diaclases de grauvaques e metagruvaques

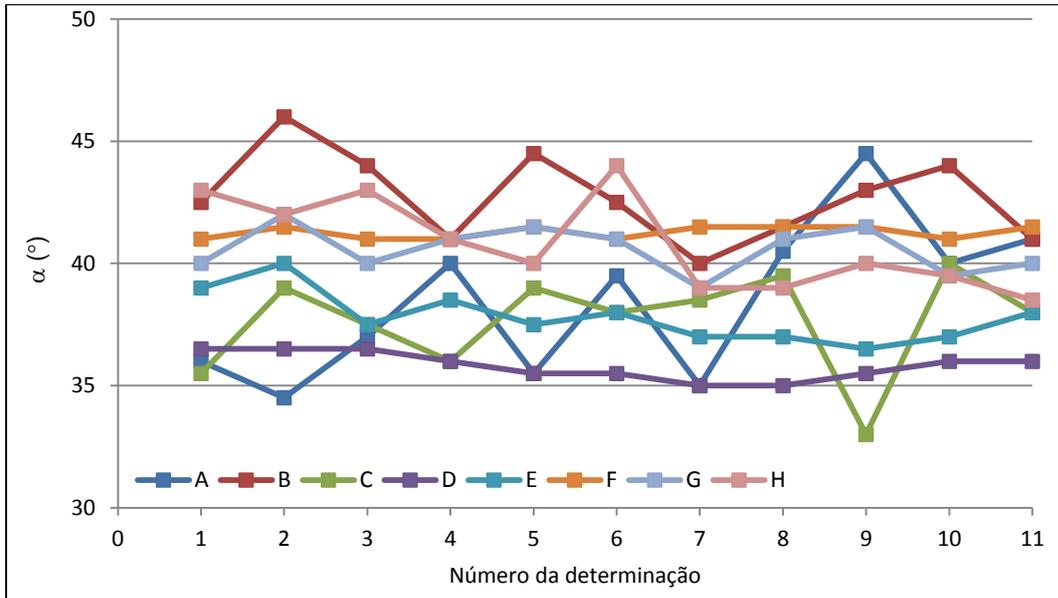


Fig. 61 - Resultados do ensaio *tilt* para as superfícies naturais das restantes diaclases

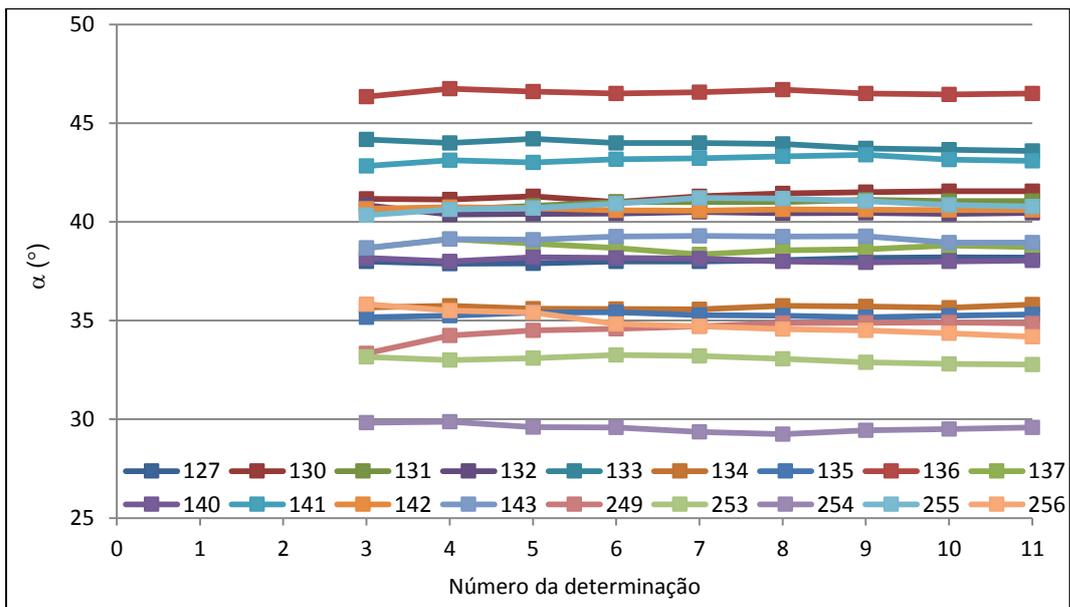


Fig. 62 – Evolução do valor da média do ângulo de atrito das diaclases de granitos de grão grosso

Analisando estas evoluções apresentadas nos gráficos referidos anteriormente, verifica-se, para os grupos de diaclases com a mesma litologia, que a partir da quarta ou quinta determinação os valores permanecem praticamente constantes. Do referido, conclui-se que para este ensaio a realização de cinco determinações seria suficiente para obter o ângulo de atrito.

Apesar desta conclusão e tal como para os ensaios de *pull*, para o valor do ângulo de atrito como resultado do ensaio em cada diaclase considerou-se a mediana das onze determinações. No entanto, de modo a averiguar se a mediana das onze determinações é um valor aceitável do ângulo de atrito, efetuou-

se uma comparação desse valor com o valor de cada uma das determinações, representada pela diferença entre eles. Esta comparação é apresentada em forma gráfica para os grupos das diaclases em estudo na Fig. 70, Fig. 71, Fig. 72 e Fig. 73, respectivamente.

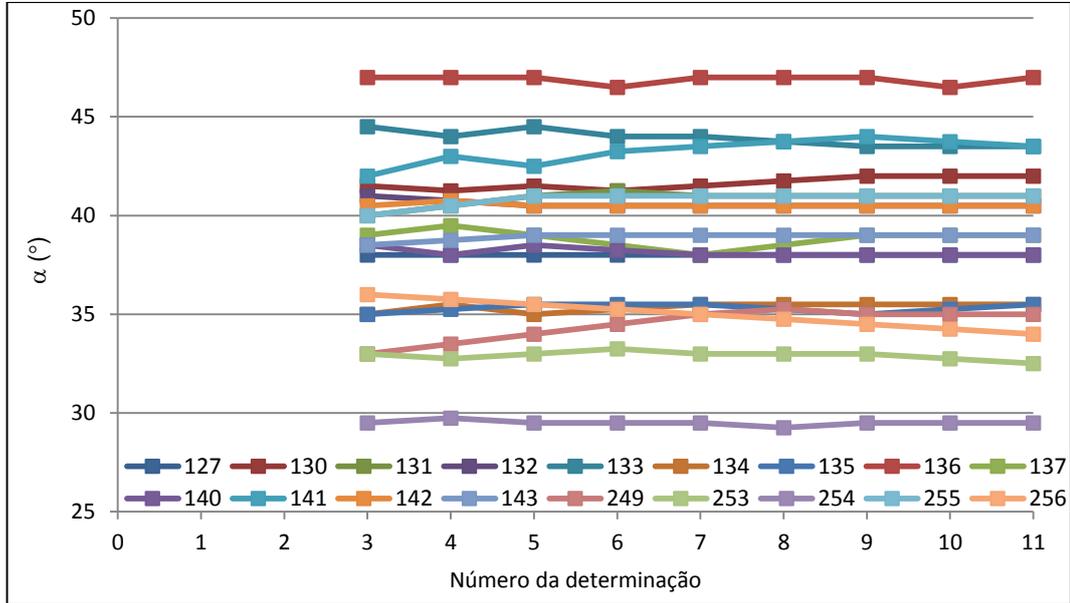


Fig. 63 – Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito das diaclases de granitos de grão grosseiro

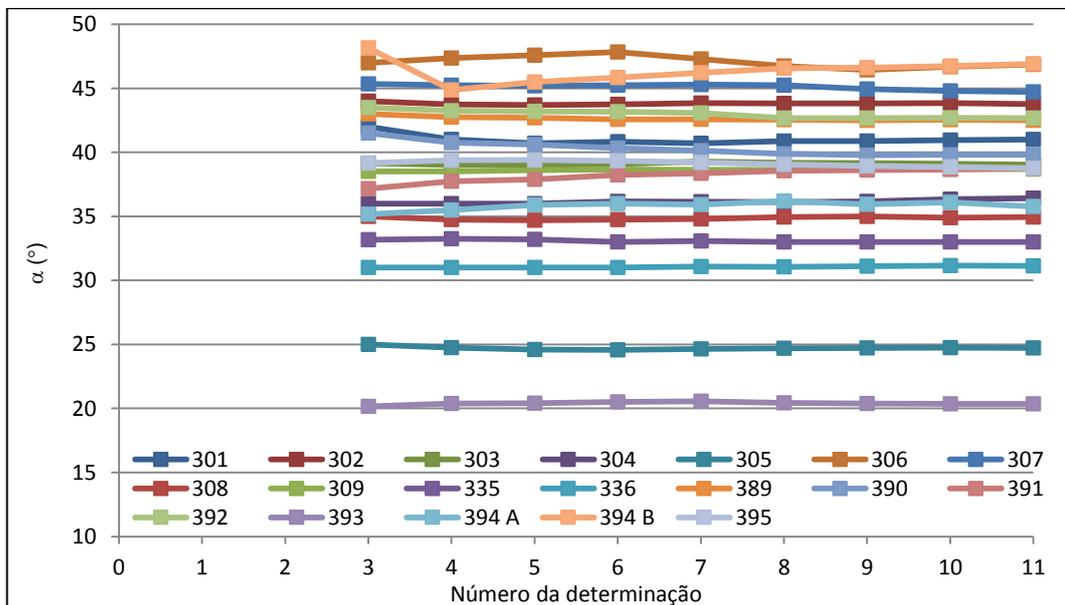


Fig. 64 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito das diaclases de rochas granitóides

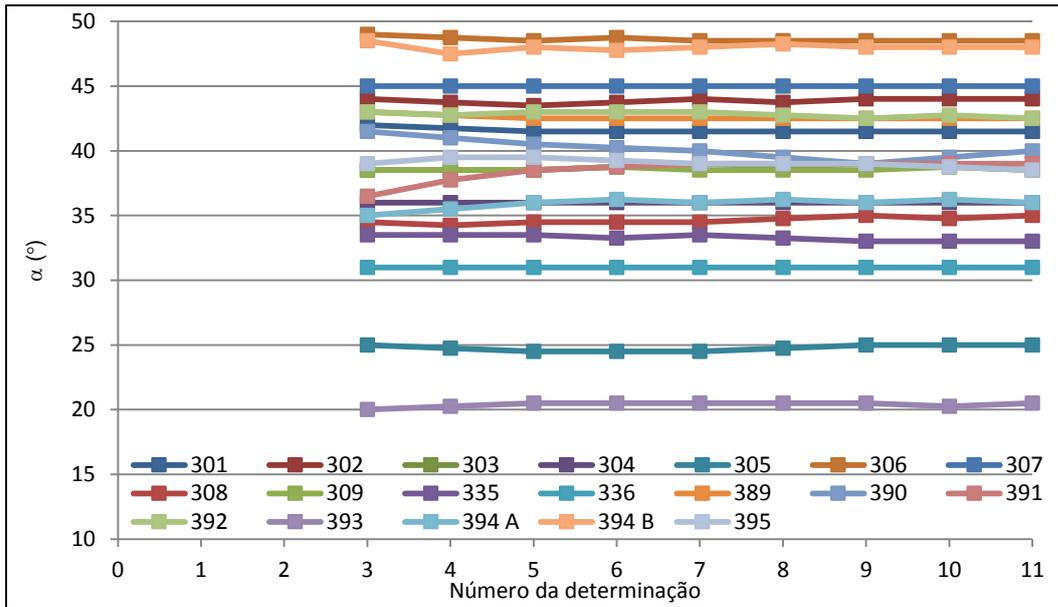


Fig. 65 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito das diaclases de rochas granitóides

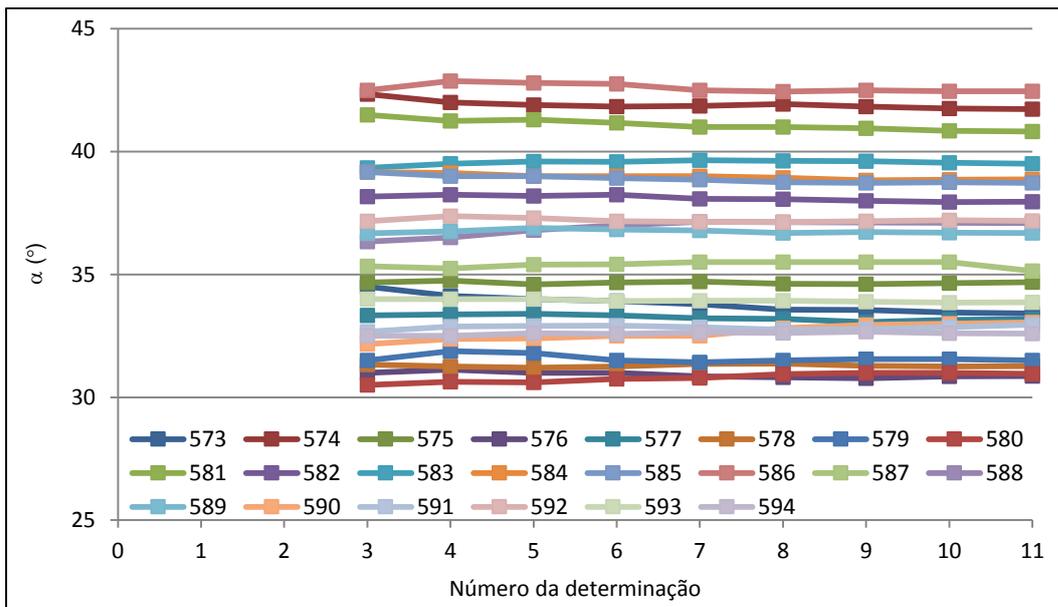


Fig. 66 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito das diaclases de grauvaques e metagrauvaques

Da comparação anterior é possível perceber, analisando os gráficos referidos, que a consideração da mediana das onze determinações como resultado do ângulo de atrito é bastante razoável, pois a diferença entre o seu valor e o valor das restantes determinações é geralmente inferior a um grau para a grande maioria das diaclases.

Os resultados dos ensaios *tilt* nas superfícies naturais das diaclases apresentam-se na Tabela 8, referindo-se para cada diaclase os valores do ângulo de atrito (α) e o correspondente ângulo de inclinação limite (β). A determinação destes valores foi descrita no capítulo anterior (secção 4.4). Todos os ângulos de

atrito determinados nos ensaios são inferiores aos correspondentes ângulos de inclinação limite, o que garante que o movimento ocorreu por deslizamento e não por derrubamento.

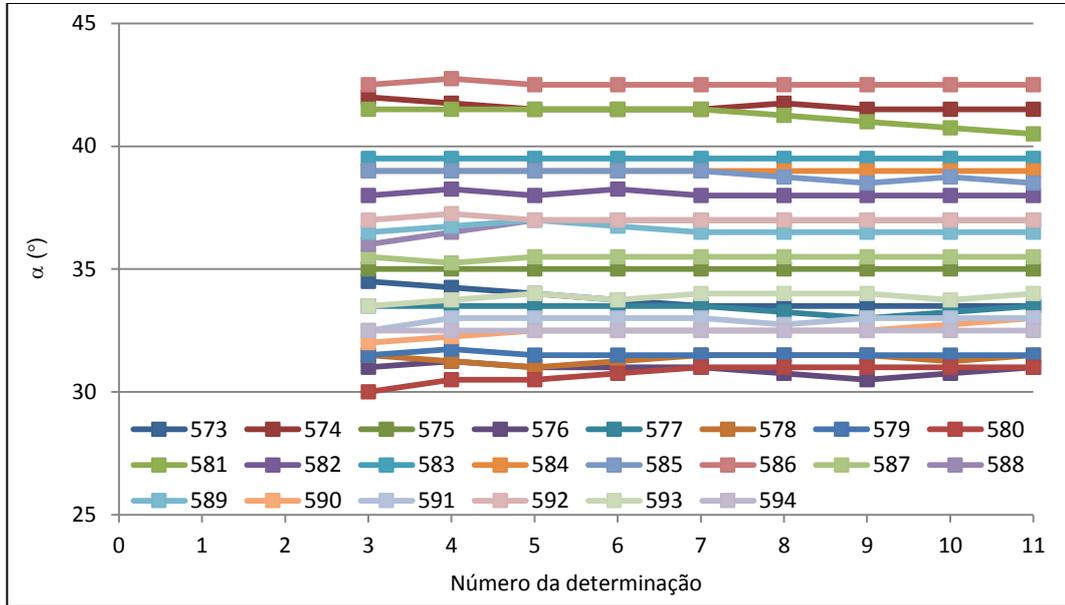


Fig. 67 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito das diaclases de grauvaques e metagrauvas

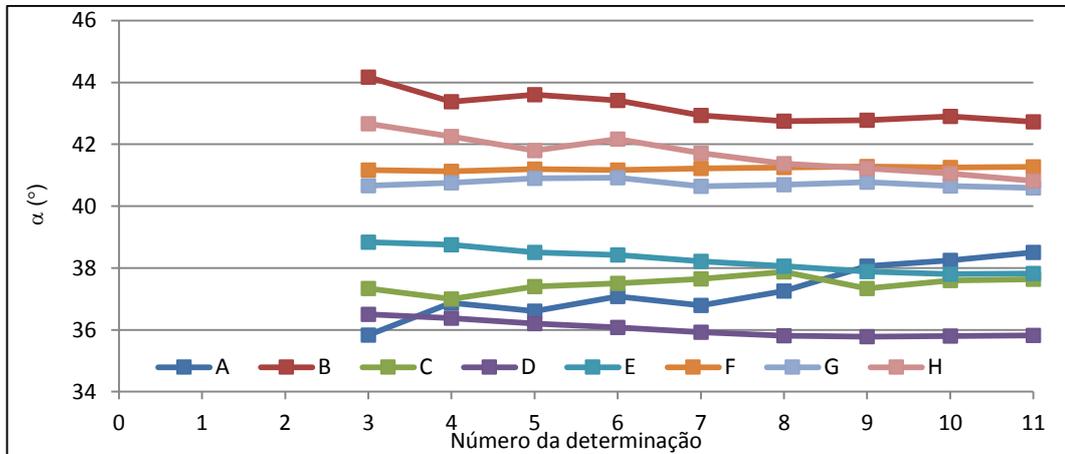


Fig. 68 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito das restantes diaclases

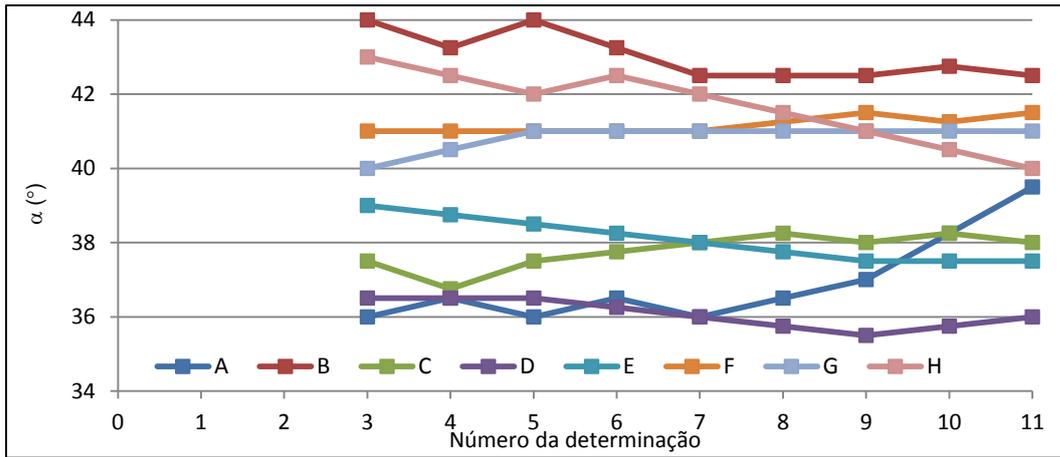


Fig. 69 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito das restantes diaclases

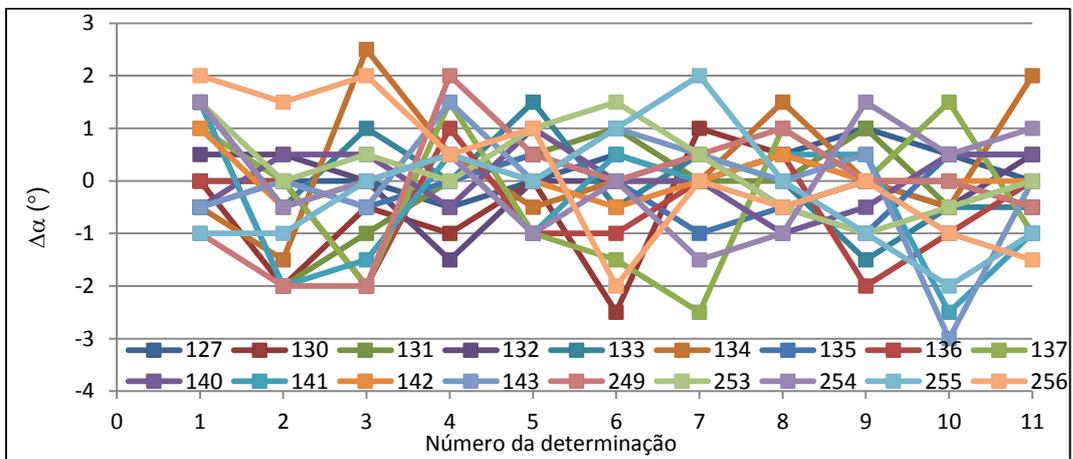


Fig. 70 – Diferença da mediana (α) pelo valor da determinação nas diaclases de granitos de grão grosso

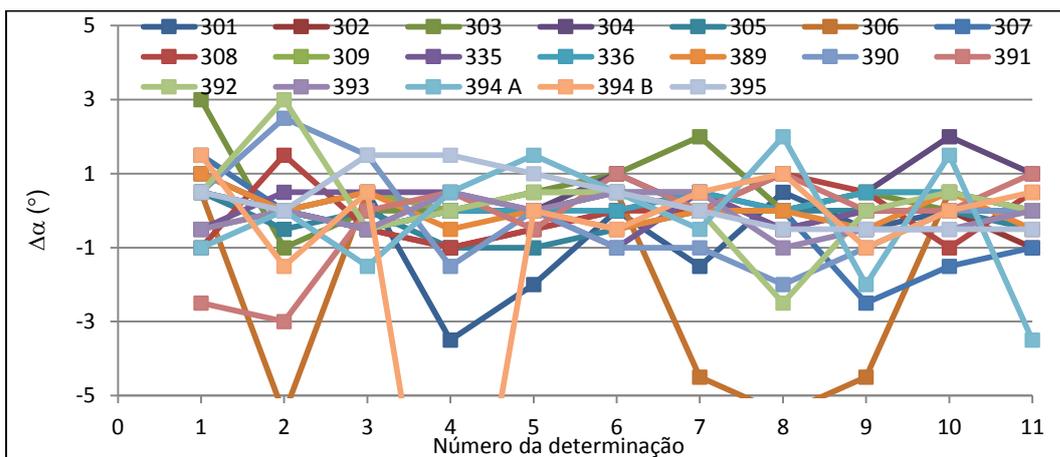


Fig. 71 – Diferença da mediana (α) pelo valor da determinação nas diaclases de rochas graníticas

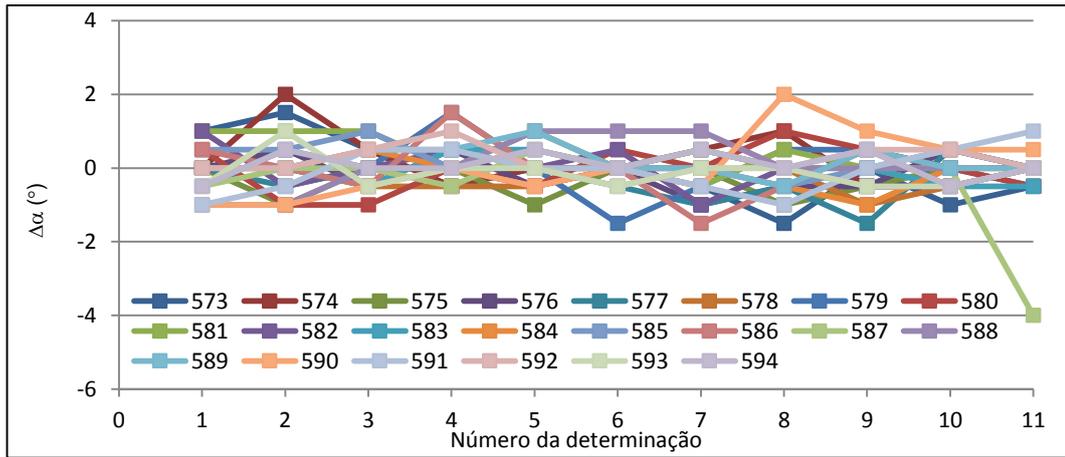


Fig. 72 – Diferença da mediana (α) pelo valor da determinação nas diaclases de grauvaques e metagruvaques

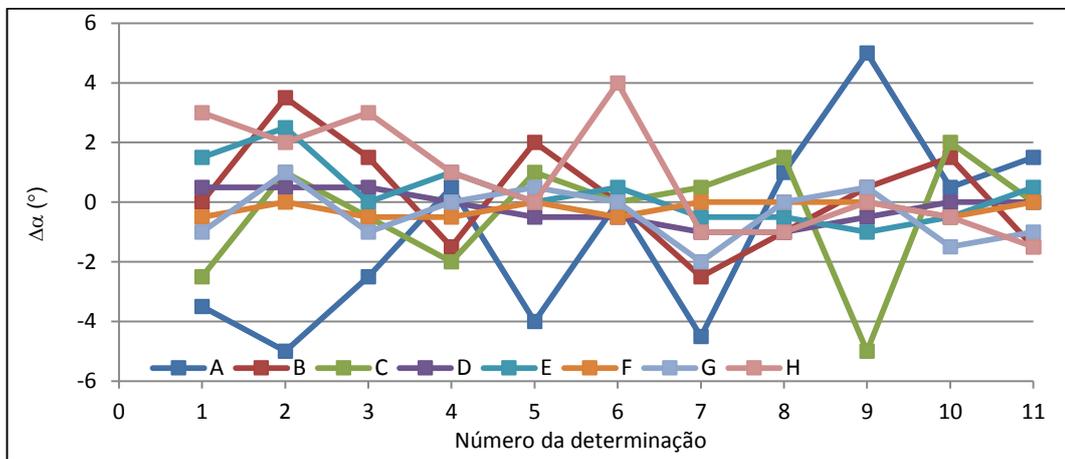


Fig. 73 – Diferença da mediana (α) pelo valor da determinação nas restantes diaclases

Tabela 8 - Resultados dos ensaios *tilt* nas superfícies naturais das diaclases

Provete	α	β_i	Provete	α	β_i
127	38,0	42,8	394 A	36,0	44,6
130	42,0	58,7	394 B	48,0	52,8
131	41,0	56,8	395	38,5	48,8
132	40,5	56,7	573	33,5	59,0
133	43,5	56,0	574	41,5	56,6
134	35,5	46,2	575	35,0	58,6
135	35,5	44,8	576	31,0	57,3
136	47,0	51,5	577	33,5	56,4
137	39,0	44,4	578	31,5	53,7
140	38,0	43,8	579	31,5	51,1
141	43,5	53,3	580	31,0	53,4
142	40,5	44,4	581	40,5	48,8

143	39,0	55,3	582	38,0	48,9
249	35,0	46,4	583	39,5	52,6
253	32,5	53,4	584	39,0	50,1
254	29,5	49,9	585	38,5	56,0
255	41,0	47,8	586	42,5	56,1
256	34,0	56,7	587	35,5	55,3
301	41,5	50,0	588	37,0	55,6
302	44,0	51,4	589	36,5	57,0
303	38,5	47,2	590	33,0	54,7
304	36,0	42,8	591	33,0	56,3
305	25,0	40,7	592	37,0	55,0
306	48,5	54,0	593	34,0	58,5
307	45,0	55,9	594	32,5	50,6
308	35,0	47,4	A	39,5	63,0
309	38,5	46,3	B	42,5	63,0
335	33,0	41,9	C	38,0	57,0
336	31,0	41,8	D	36,0	51,1
389	42,5	54,0	E	37,5	53,4
390	40,0	51,5	F	41,5	57,9
391	39,0	51,6	G	41,0	60,2
392	42,5	52,1	H	40,0	54,5
393	20,5	47,7			

5.5. ENSAIO DE INCLINAÇÃO PROGRESSIVA DAS SUPERFÍCIES SERRADAS (*TILT TESTS*)

Nestes ensaios a inclinação da plataforma rígida no instante do deslizamento da metade superior do provete corresponde ao ângulo de atrito básico da diaclase (ϕ_b). No âmbito do presente trabalho, foram realizadas onze determinações do ângulo de atrito básico para cada diaclase. Os resultados das onze determinações apresentam-se de forma gráfica, analogamente aos últimos dois tipos de ensaios. Os resultados referentes ao grupo das diaclases de granitos de grão grosseiro apresentam-se na Fig. 74; os do grupo das diaclases de rochas granitóides na Fig. 75; os do grupo de diaclases de grauvaques e metagrauvaques na Fig. 76; e os das restantes diaclases na Fig. 77.

Analisando os resultados, pelas figuras referidas anteriormente, conclui-se que o valor do ângulo de atrito básico apresenta uma dispersão tendencialmente reduzida nas diaclases de rochas granitóides e nas de grauvaques e metagrauvaques, e uma dispersão mais acentuada nas restantes diaclases.

Realizou-se um tratamento dos resultados atendendo a parâmetros estatísticos básicos, como o efetuado anteriormente. A Tabela 9 apresenta, a título de exemplo, os valores dos parâmetros estatísticos básicos referentes ao ângulo de atrito básico para uma diaclase de granito de grão grosseiro (proвете 132). Os valores dos parâmetros estatísticos básicos relativos ao ensaio de *tilt* em superfícies serradas das diaclases apresentam-se em tabela no anexo B.

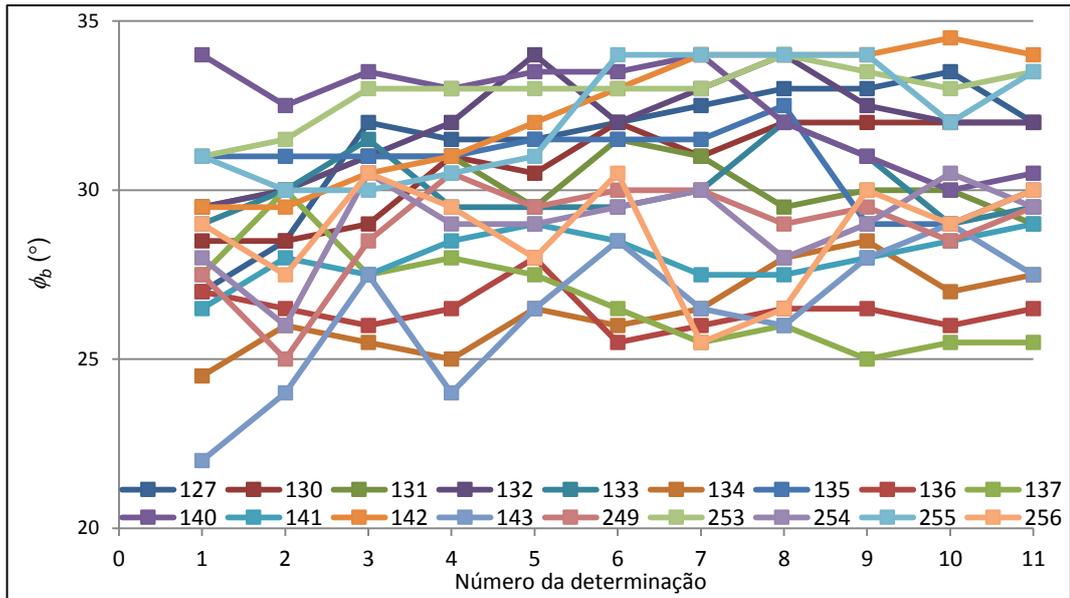


Fig. 74 - Resultados do ensaio *tilt* para as superfícies serradas de diaclases de granitos de grão grosseiro

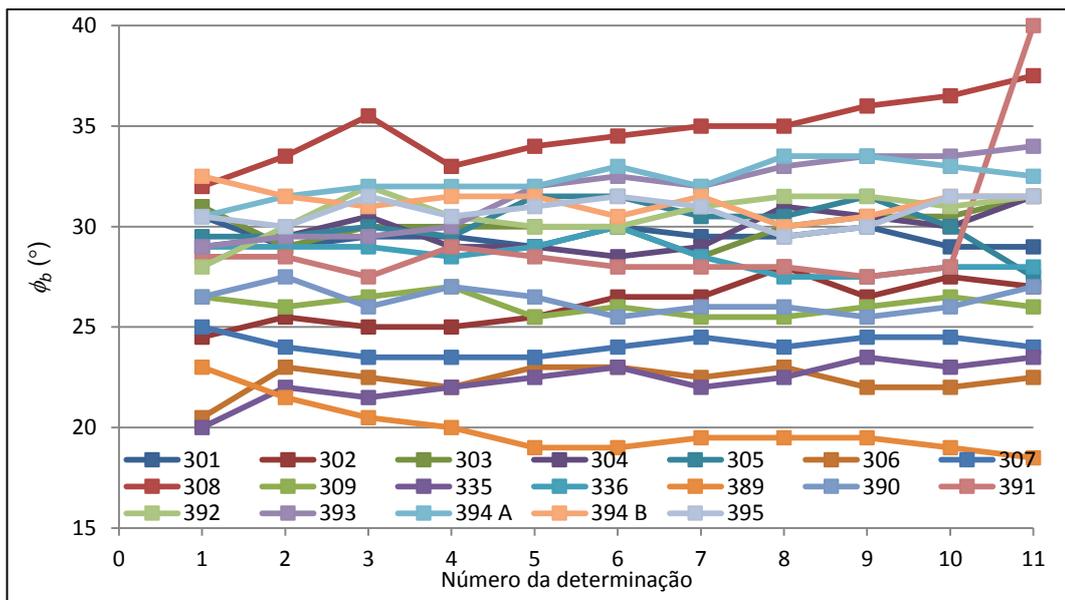


Fig. 75 - Resultados do ensaio *tilt* para as superfícies serradas de diaclases de rochas granitóides

Tabela 9 - Valores dos parâmetros estatísticos básicos referentes ao ensaio *tilt* numa superfície serrada

Provete	132
Mínimo (°)	29,5
Média (°)	32,0
Máximo (°)	34,0
Mediana (°)	32,0
DP	1,43
CV (%)	4,47

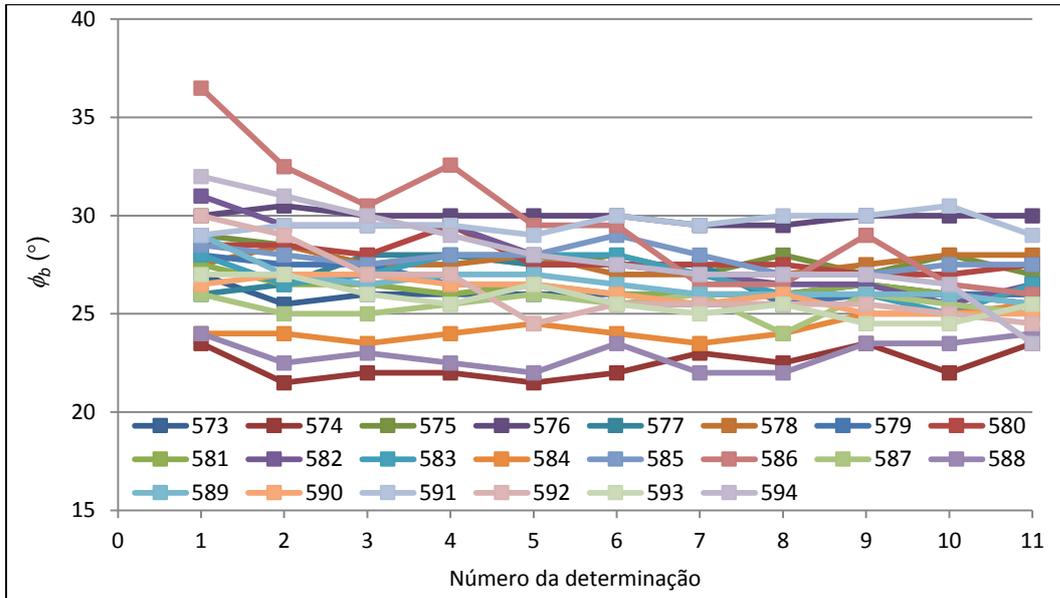


Fig. 76 - Resultados do ensaio *tilt* para as superfícies serradas de diaclases de grauvaques e metagruvaques

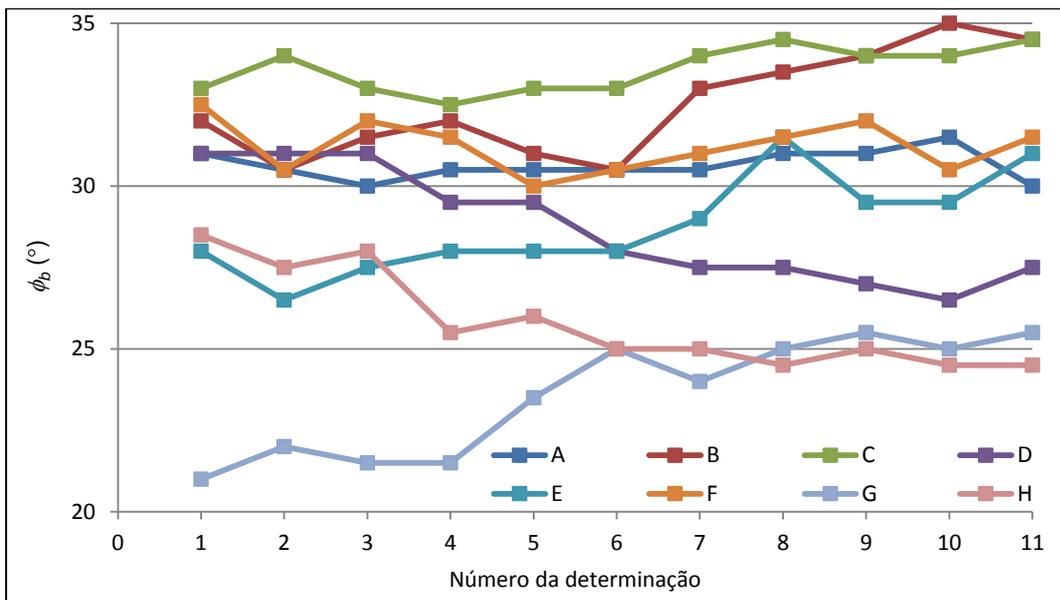


Fig. 77 - Resultados do ensaio *tilt* para as superfícies serradas das restantes diaclases

Analisando aos parâmetros estatísticos básicos do ângulo de atrito básico, verifica-se que os valores da média aritmética e da mediana são praticamente iguais, com uma diferença máxima de 0,5 graus em regra, e que os coeficientes de variação são muito reduzidos, apresentando-se na grande maioria das diaclases inferiores a 5%.

Analogamente aos últimos dois ensaios, neste ensaio foi, também, realizada uma análise da evolução do valor da média e mediana do ângulo de atrito básico. A evolução do valor da média e da mediana do ângulo de atrito básico apresenta-se graficamente: para o grupo das diaclases de granitos de grão

grossoiro na Fig. 78 e Fig. 79; para o grupo das diaclases de rochas granitóides na Fig. 80 e Fig. 81; para o grupo de diaclases de grauvaques e metagruvaques na Fig. 82 e Fig. 83; e para as restantes diaclases na Fig. 84 e Fig. 85.

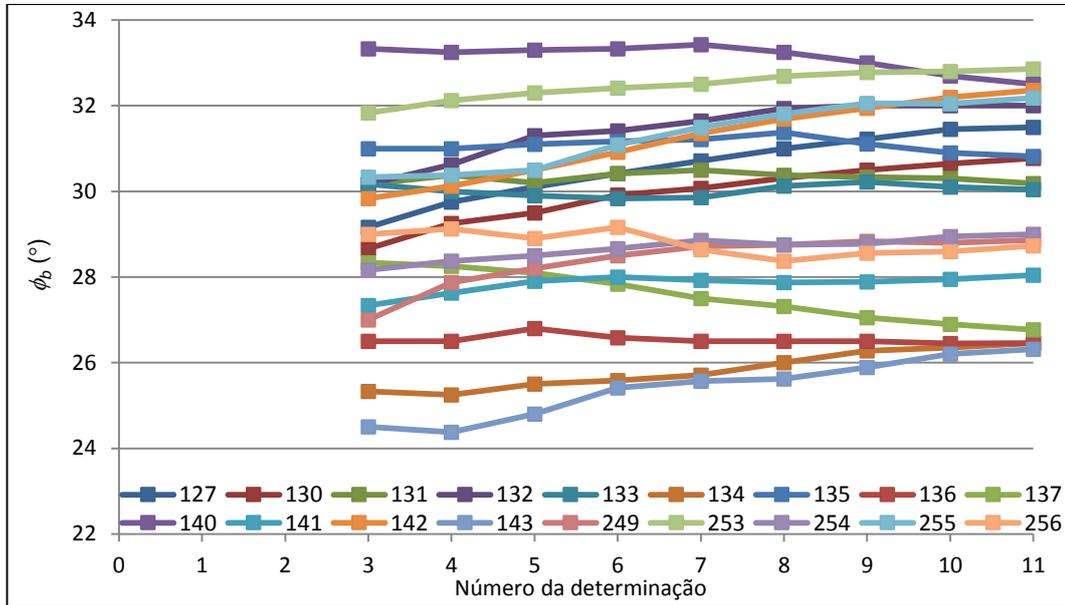


Fig. 78 – Evolução do valor da média do ângulo de atrito básico das diaclases de granitos de grão grossoiro

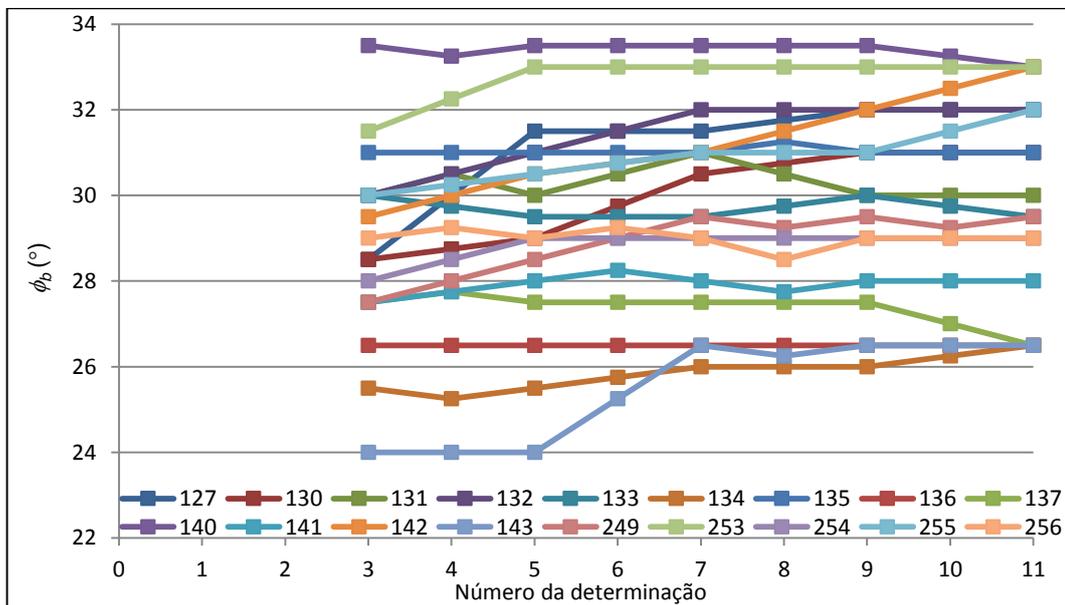


Fig. 79 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito básico das diaclases de granitos de grão grossoiro

Analisando a evolução do valor da média e da mediana do ângulo de atrito básico, pela sua representação gráfica, verifica-se, de forma geral, que a variação dos valores tende a estabilizar sensivelmente a partir da sexta determinação, havendo no entanto diaclases em que a evolução dos valores se apresenta pouco

uniforme. Da análise, conclui-se que, de certa forma, a realização de seis ou sete determinações seria aceitável.

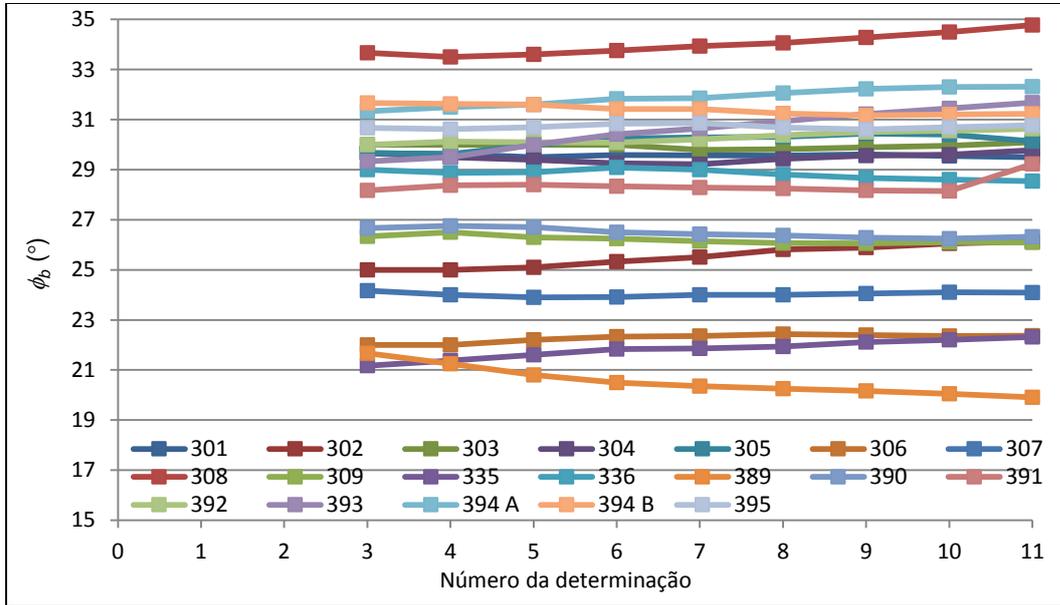


Fig. 80 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito básico das diaclases de rochas granitoides

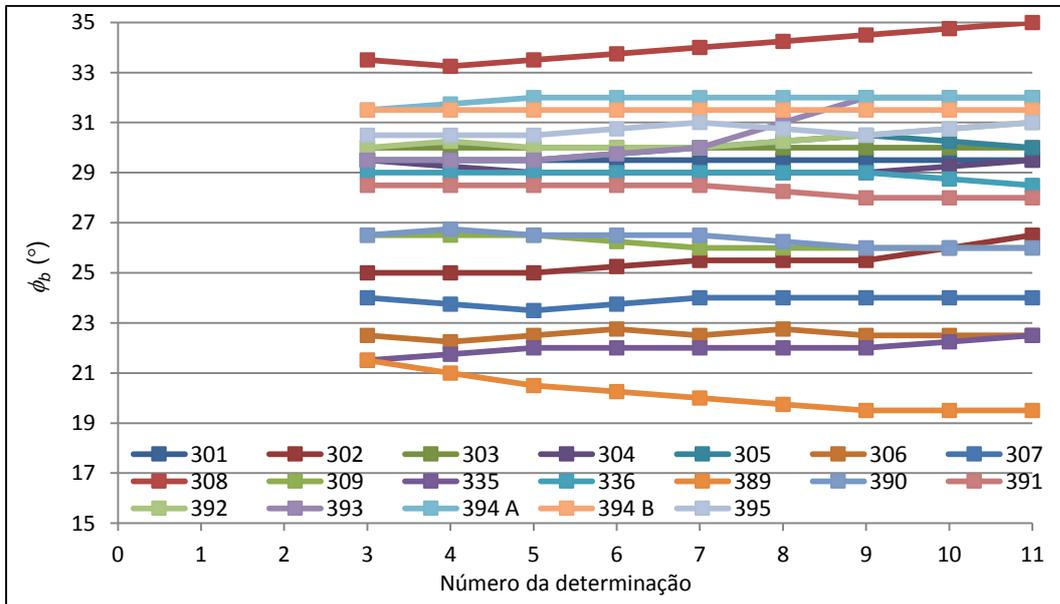


Fig. 81 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito básico das diaclases de rochas granitoides

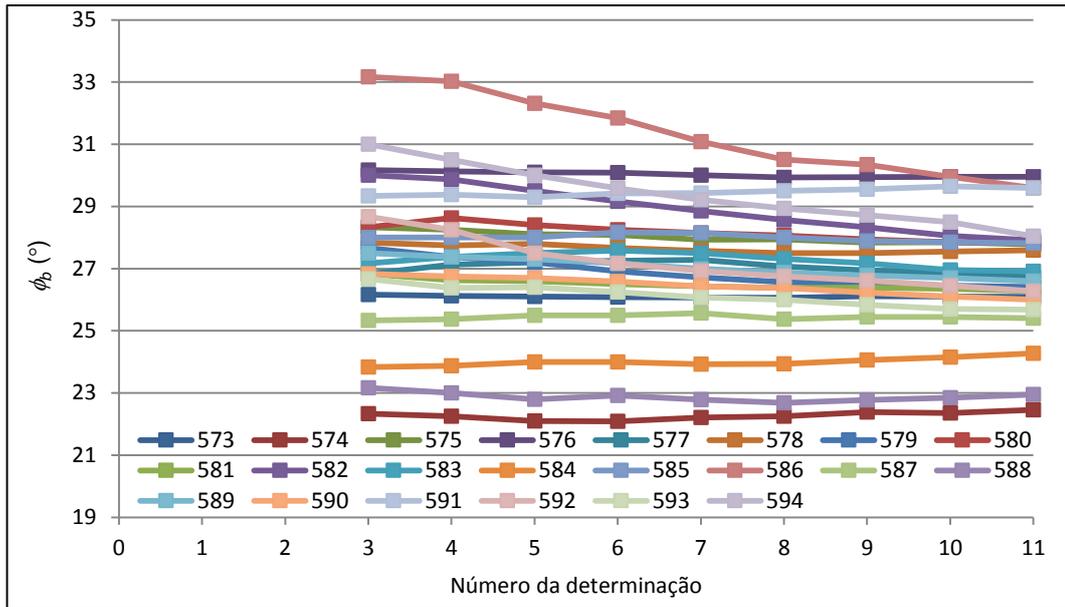


Fig. 82 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito básico das diaclases de grauvaques e metagrauvaques

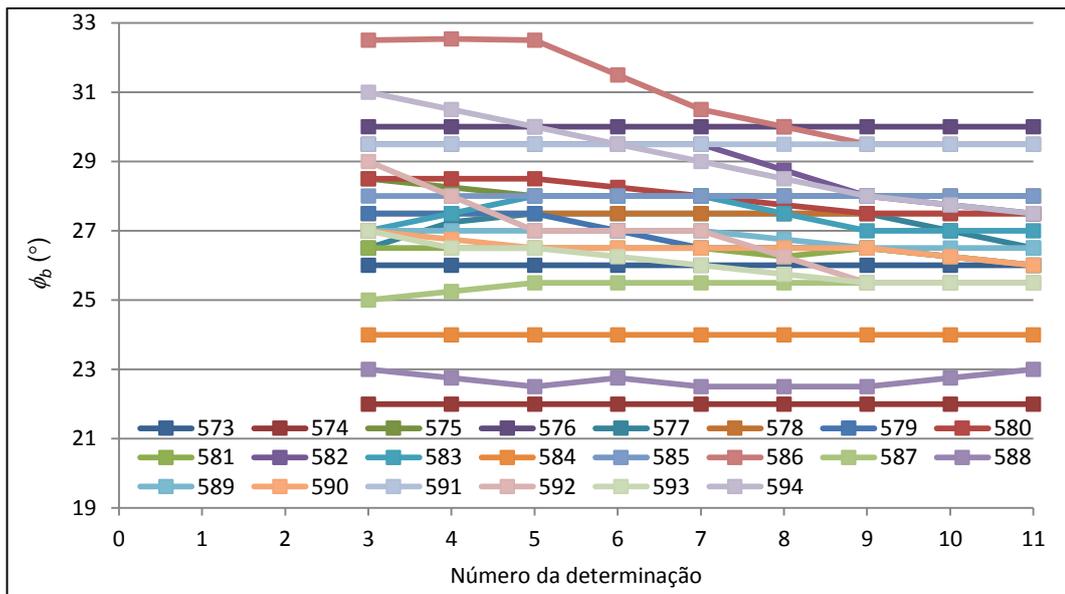


Fig. 83 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito básico das diaclases de grauvaques e metagrauvaques

Para o valor do ângulo de atrito básico como resultado do ensaio em cada diaclase considerou-se a mediana das onze determinações. Efetuou-se, à luz do que foi feito no ensaio anterior, uma comparação do valor da mediana das onze determinações com o valor de cada uma das determinações, representada pela diferença entre eles, e apresentada em forma gráfica para os diferentes grupos de diaclases na Fig. 86, Fig. 87, Fig. 88 e Fig. 89.

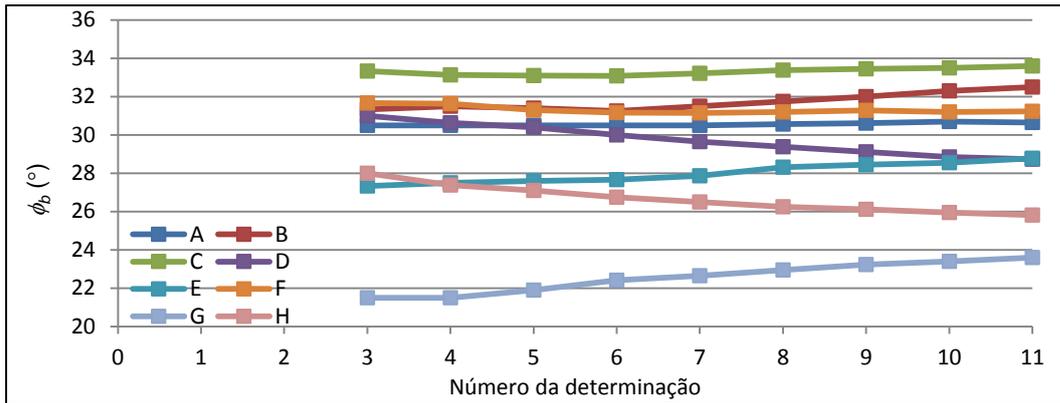


Fig. 84 - Evolução do valor da média do ângulo de atrito básico das restantes diaclases

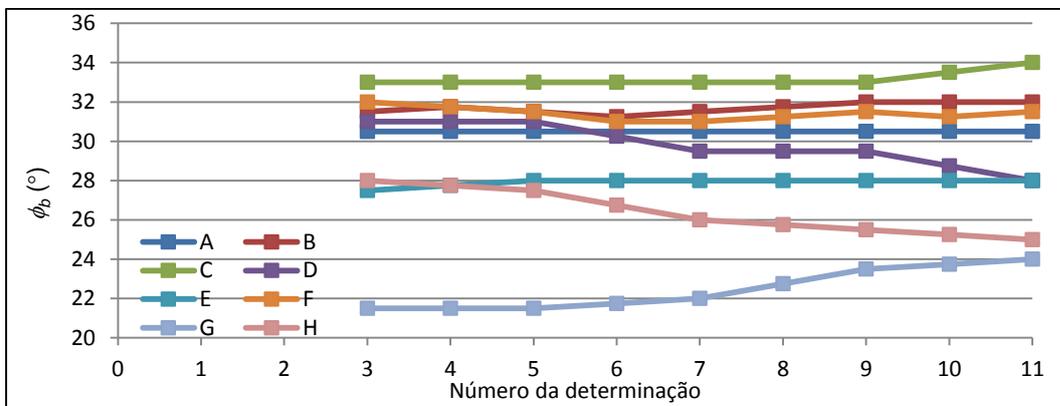


Fig. 85 - Evolução do valor da mediana do ângulo de atrito básico das restantes diaclases

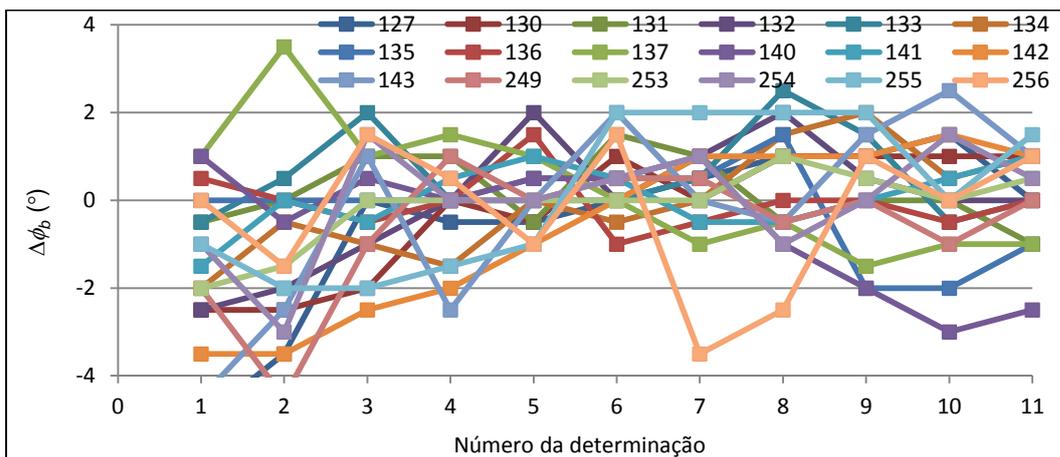


Fig. 86 - Diferença da mediana (ϕ_b) pelo valor da determinação nas diaclases de granitos de grão grosseiro

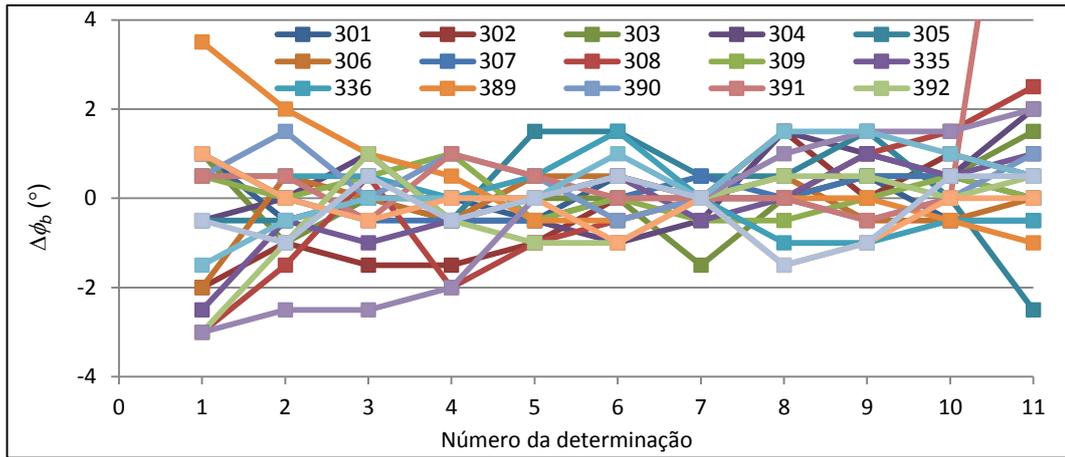


Fig. 87 – Diferença da mediana (ϕ_b) pelo valor da determinação nas diaclases de rochas granitoides

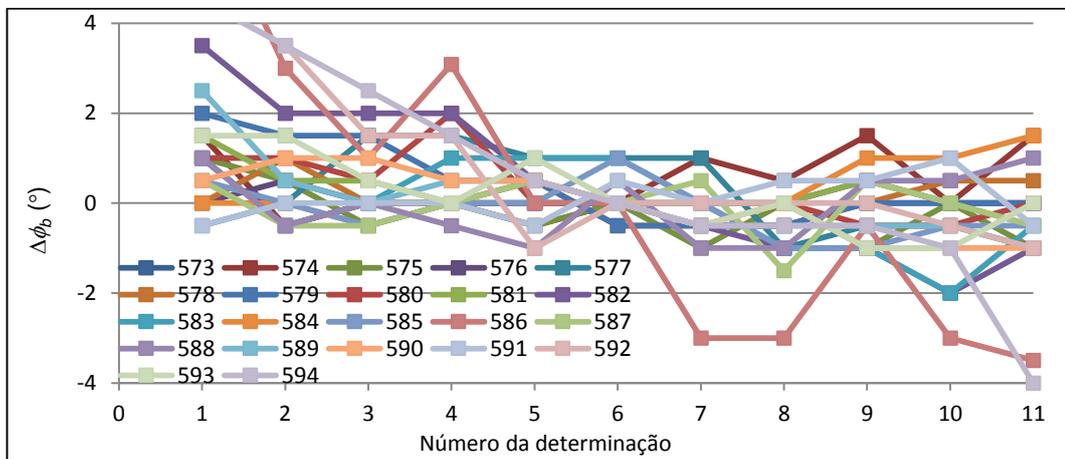


Fig. 88 – Diferença da mediana (ϕ_b) pelo valor da determinação nas diaclases de grauvaques e metagruvaques

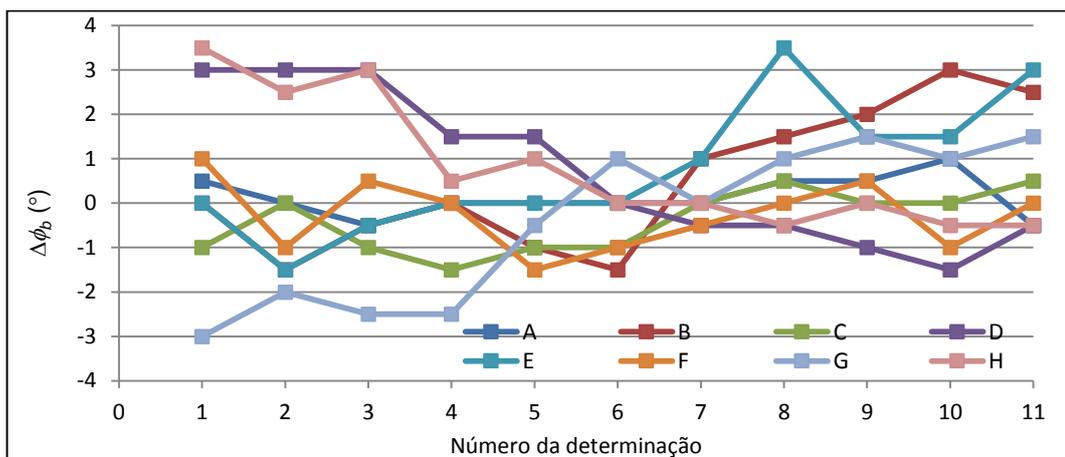


Fig. 89 – Diferença da mediana (ϕ_b) pelo valor da determinação nas restantes diaclases

Analisando a diferença entre a mediana e o valor o ângulo de atrito básico em cada determinação, verifica-se, de um modo geral, que a mesma é da ordem de dois graus. Assim, é possível afirmar que a mediana das onze determinações é um valor aceitável para a caracterização do ângulo de atrito básico neste ensaio.

Os resultados dos ensaios *tilt* nas superfícies serradas das diaclases apresentam-se na Tabela 10, referindo-se para cada diaclase os valores do ângulo de atrito básico (ϕ_b) e o correspondente ângulo de inclinação limite (β_l). Todos os ângulos de atrito básicos são inferiores aos correspondentes ângulos de inclinação limite, o que garante o deslizamento em vez do derrubamento.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios *tilt* nas superfícies serradas das diaclases

Provete	ϕ_b	β_l	Provete	ϕ_b	β_l
127	32,0	42,8	394 A	32,0	44,6
130	31,0	58,7	394 B	31,5	52,8
131	30,0	56,8	395	31,0	48,8
132	32,0	56,7	573	26,0	59,0
133	29,5	56,0	574	22,0	56,6
134	26,5	46,2	575	28,0	58,6
135	31,0	44,8	576	30,0	57,3
136	26,5	51,5	577	26,5	56,4
137	26,5	44,4	578	27,5	53,7
140	33,0	43,8	579	26,0	51,1
141	28,0	53,3	580	27,5	53,4
142	33,0	44,4	581	26,0	48,8
143	26,5	55,3	582	27,5	48,9
249	29,5	46,4	583	27,0	52,6
253	33,0	53,4	584	24,0	50,1
254	29,0	49,9	585	28,0	56,0
255	32,0	47,8	586	29,5	56,1
256	29,0	56,7	587	25,5	55,3
301	29,5	50,0	588	23,0	55,6
302	26,5	51,4	589	26,5	57,0
303	30,0	47,2	590	26,0	54,7
304	29,5	42,8	591	29,5	56,3
305	30,0	40,7	592	25,5	55,0
306	22,5	54,0	593	25,5	58,5
307	24,0	55,9	594	27,5	50,6
308	35,0	47,4	A	30,5	63,0
309	26,0	46,3	B	32,0	63,0
335	22,5	41,9	C	34,0	57,0
336	28,5	41,8	D	28,0	51,1
389	19,5	54,0	E	28,0	53,4
390	26,0	51,5	F	31,5	57,9

391	28,0	51,6	G	24,0	60,2
392	31,0	52,1	H	25,0	54,5
393	32,0	47,7			

5.6. MARTELO DE SCHMIDT

Neste ensaio foram realizadas dez medições por superfície, considerando-se a média dos cinco valores mais elevados como o resultado dos parâmetros r e R , de acordo com o preconizado no procedimento de Barton e Choubey (1977). Os resultados destes parâmetros apresentam-se na Tabela 11, referindo-se para cada diaclase os valores de r para a superfície inferior e superior, e seu valor médio, bem como os valores de R para uma das suas superfícies, geralmente a inferior.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios com o martelo de Schmidt nas superfícies naturais e serradas das diaclases

Provete	r			R	Provete	r			R
	Inferior	Superior	Médio			Inferior	Superior	Médio	
127	53,2	54,3	53,7	59,6	394 A	53,8	55,9	54,9	59,9
130	54,5	25,4	54,5	64,2	394 B	41,6	49,3	45,5	57,0
131	51,9	48,2	50,1	59,1	395	55,4	49,3	52,4	56,7
132	49,5	49,5	49,5	56,0	573	34,2	28,7	31,5	37,5
133	57,6	54,9	56,3	61,1	574	37,8	36,3	37,0	41,5
134	49,1	39,0	49,1	56,2	575	38,1	37,7	37,9	38,1
135	48,9	45,9	47,4	59,4	576	40,8	37,6	39,2	44,8
136	26,6	28,8	27,7	35,4	577	28,7	36,9	32,8	39,5
137	54,0	55,3	54,7	60,0	578	36,2	27,4	31,8	35,2
140	59,7	57,4	58,6	59,9	579	34,2	35,6	34,9	36,4
141	48,4	50,2	49,3	60,4	580	38,0	36,2	37,1	32,9
142	57,3	51,9	54,6	63,5	581	25,5	22,8	24,2	33,2
143	48,4	46,2	47,3	59,6	582	30,1	27,4	28,7	37,5
249	49,7	55,3	52,5	47,4	583	42,0	36,4	39,2	45,5
253	47,3	45,9	46,6	55,5	584	29,3	32,0	30,6	37,0
254	38,6	33,5	36,1	52,5	585	37,4	37,4	37,4	39,4
255	51,3	47,0	49,2	61,5	586	38,2	38,0	38,1	43,4
256	54,1	50,8	52,5	60,1	587	35,6	34,7	35,1	42,0
301	49,8	50,2	50,0	51,4	588	37,7	37,7	37,7	45,8
302	44,5	47,4	45,9	61,7	589	41,0	40,6	40,8	46,8
303	44,3	42,3	43,3	44,7	590	40,5	41,4	40,9	40,2
304	47,9	52,0	49,9	57,7	591	40,9	40,0	40,4	46,5
305	34,0	39,3	36,6	40,0	592	32,0	40,9	36,5	49,8
306	44,4	51,3	47,8	58,9	593	41,3	41,3	41,3	51,6
307	36,8	38,2	37,5	55,5	594	41,5	40,1	40,8	41,8
308	56,0	53,2	54,6	61,9	A	29,3	32,0	30,7	37,9
309	34,2	32,6	33,4	52,8	B	43,0	32,0	32,0	39,8
335	41,3	48,2	44,8	62,7	C	47,3	46,8	47,0	51,4
336	47,5	49,5	48,5	60,4	D	43,0	45,2	44,1	58,8

389	38,1	31,6	34,9	49,1	E	38,0	37,5	37,8	54,4
390	50,7	52,0	51,4	60,1	F	36,6	33,9	35,2	47,8
391	52,6	43,9	48,3	55,1	G	50,8	46,2	48,5	59,9
392	51,9	43,3	47,6	59,3	H	38,9	38,4	38,7	45,6
393	50,3	41,2	45,8	60,3					

Os valores assinalados a sombreado no quadro identificam as superfícies que ficaram danificadas na realização do ensaio com o martelo de Schmidt, não sendo esses valores utilizados para efeitos de cálculo. No caso do provete B aconselha-se para eventuais cálculos o menor valor, dado que ambas as superfícies fraturaram.

Verificaram-se alguns casos em que os valores de R foram inferiores aos respetivos valores de r . Tal ocorre em diaclases pouco alteradas. Nestes casos, a relação r/R foi considerada igual a 1.

6

Análise de resultados

6.1. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE BARTON

Neste capítulo é apresentada a análise dos resultados e a comparação dos modelos de Barton e de Coulomb. Inicia-se pela determinação dos parâmetros do modelo de Barton, definidos na equação (10) do capítulo 3, para o provete 132 que tem vindo a servir de exemplo neste trabalho.

Em primeiro lugar, procede-se à determinação do parâmetro JCS , com base no resultado aferido dos ressaltos com o martelo de Schmidt nas superfícies naturais das diaclases (apresentado na secção 5.6 do capítulo anterior), a partir da correlação apresentada por Barton e Choubey (1977) e definida pela equação (12), apresentada na secção 3.3.3 do capítulo 3. Dado que a correlação anterior foi definida para o martelo de Schmidt do tipo L e no âmbito do presente trabalho foi utilizado um martelo do tipo N, procedeu-se à correção do valor do resultado obtido no ensaio pela correlação proposta por Aydin (2009), definida pela seguinte expressão:

$$r_N = 1,0646 \cdot r_L + 6,3673 \quad (21)$$

onde r_N corresponde ao valor médio do resultado do ensaio com o martelo do tipo N e o r_L representa o valor do ressalto, para o martelo do tipo L, utilizado na equação (12).

O ângulo de atrito residual, ϕ_r , é determinado pela equação (13) (apresentada na secção 3.3.3 do capítulo 3). No domínio deste parâmetro, o valor do ressalto do martelo de Schmidt nas superfícies naturais das diaclases (r) corresponde ao valor médio do resultado obtido no ensaio (para o martelo do tipo N). O valor do ressalto do martelo de Schmidt nas superfícies serradas (R) é o apresentado como resultado na secção 5.6 do capítulo anterior. Ainda para a determinação deste parâmetro é necessário ter em conta o valor do ângulo de atrito básico, ϕ_b , que se apresenta como o resultado direto dos ensaios de inclinação progressiva (secção 5.5 do capítulo anterior).

No que respeita ao parâmetro JRC , no âmbito do presente trabalho, foi determinado a partir dos ensaios *push*, *pull* e *tilt* nas superfícies naturais das diaclases, com base na expressão (14) apresentada no capítulo 3. No entanto, é necessário ter em atenção que o valor da tensão normal (σ_{n0}) utilizada no cálculo do parâmetro não é igual para todos os ensaios, no caso do ensaio *tilt* esta tensão, que varia com a variação da inclinação ao longo do ensaio, é calculada pela expressão empírica proposta por Barton e Choubey (1977) e definida pela equação (22). No ensaio *push* e *pull* a tensão normal (σ_{n0}) é simplesmente o cociente do peso exercido sobre a superfície (W) pela área nominal da mesma (A). O ângulo α é o ângulo de atrito obtido no respetivo ensaio.

$$\sigma_{n0} = \frac{W}{A} \cdot \cos^2 \alpha \tag{22}$$

É ainda, importante referir que o parâmetro, em questão, foi calculado no caso do ensaio *push* para a tensão tangencial máxima e média, sendo a tensão tangencial máxima a tensão tangencial medida mais elevada ao longo de todo o deslizamento e a tensão tangencial média correspondente à média dos valores de tensão tangencial com variação pouco pronunciada ao longo de um determinado intervalo de deslocamento tangencial.

Os parâmetros do modelo de Barton referentes ao provete 132 apresentam-se na Tabela 12. Nesta tabela encontram-se os valores dos ressaltos do martelo de Schmidt (r_N , r_L e R) necessários aos cálculos, o valor do ângulo de atrito básico (ϕ_b), o valor do ângulo de atrito residual (ϕ_r), o valor de JCS e o valor de JRC para cada ensaio, incluído o valor para o *push* com a tensão tangencial máxima e média ($JRC_{push,máx.}$ e $JRC_{push,méd.}$ respetivamente).

Tabela 12 – Exemplo do cálculo dos parâmetros do modelo de Barton para o provete 132

Provete	132
r_N	49,5
r_L	40,5
R	56,0
ϕ_b (°)	32,0
JCS (MPa)	86
ϕ_r (°)	29,7
$JRC_{Push\ médio}$	3,0
$JRC_{Push\ máximo}$	4,6
JRC_{Pull}	4,6
JRC_{Tilt}	2,5

O resultado destes cálculos permitem apresentar o gráfico da Fig. 90, que relaciona, em escala semi-logarítmica, ângulos de atrito com a tensão normalizada pela resistência das paredes da diaclase. Estes gráficos são apropriados para representar o modelo de Barton, pois aqui ele aparece como linear, a inclinação das retas é JRC e a interseção com o eixo vertical é ϕ_r , como se pode facilmente depreender da equação (23).

$$\arctan(\tau/\sigma_n) = JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \tag{23}$$

No gráfico referido anteriormente, as retas representam a variação do ângulo de atrito com a tensão normal aplicada em cada deslizamento, tendo em conta a influência da rugosidade, dada pelo parâmetro JRC , aferido nos respetivos ensaios de *push*, *pull* e *tilt*. A influência da rugosidade é definida pela inclinação da reta, sendo a sua influência mais expressiva quanto maior a inclinação. Os pontos, salientes no gráfico, para os ensaios *push*, *pull* e *tilt*, definem o ângulo de atrito obtido em cada ensaio associado

à tensão normal aplicada no mesmo e à influência da rugosidade estimada, expressa por *JRC*. No caso dos ensaios de deslizamento, os pontos salientes no gráfico representam os ângulos de atrito obtidos para as respectivas tensões normais aplicadas no ensaio, tendo em conta apenas o valor *JCS* para além da tensão normal.

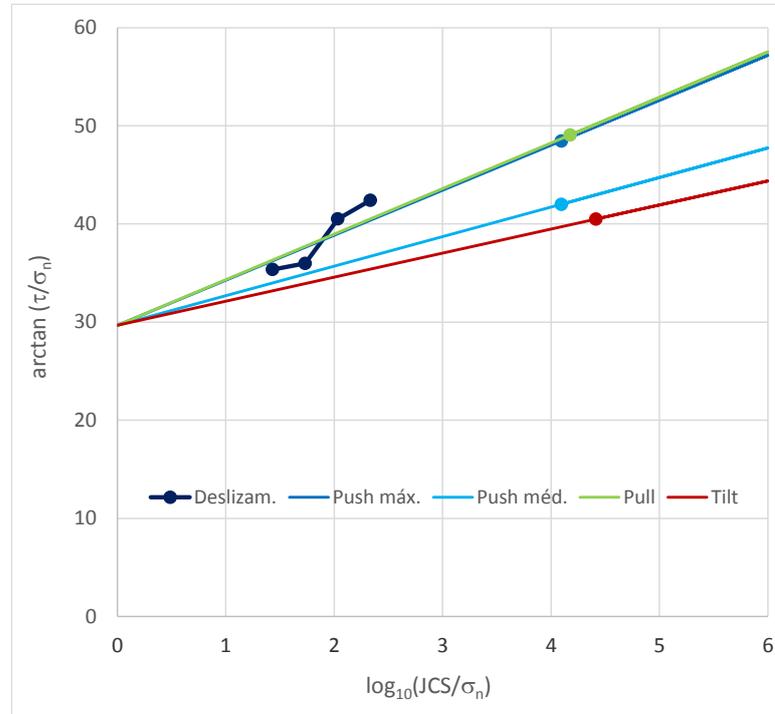


Fig. 90 – Exemplo do gráfico ângulo de atrito – tensão normal normalizada do modelo de Barton para o provete
132

Passando estes mesmos resultados para o espaço de Mohr (τ, σ_n), obtém-se o gráfico da Fig. 91. Este gráfico apresenta, no caso dos ensaios de deslizamento, os pares de valores (τ, σ_n) para os quais se deu a rotura da diaclase por corte, representando cada ponto a tensão tangencial resistente para a respetiva tensão normal aplicada no ensaio. As curvas presentes na figura apresentam a extrapolação dos valores da tensão tangencial resistente pelo modelo de Barton, atendendo aos valores dos parâmetros determinados em cada ensaio, *push*, *pull* e *tilt*, respetivamente.

Chama-se a atenção para que todos os ensaios a tensões normais baixas (*push*, *pull* e *tilt*), que serviram para determinar os parâmetros para as envolventes do modelo de Barton, se encontram sob o ponto encarnado próximo da origem.

Estes gráficos mostram que as diferenças entre os resultados determinados a partir dos resultados dos diferentes ensaios (deslizamento e *push*, *pull* e *tilt*), que parecem ser muito importantes no modelo de Barton, quando são transferidas para o espaço de Mohr-Coulomb, e avaliadas em termos de tensão tangencial resistente para uma dada tensão normal, apresentam valores relativamente reduzidos.

Dos gráficos da Fig. 90 e Fig. 91 conclui-se ainda que, no caso deste provete, os ensaios de *push* e de *pull* apresentam resultados idênticos e muito próximos do resultado do último ensaio de deslizamento, realizado anteriormente à tensão normal de 3,2 MPa. Esta comparação é a mais aconselhável porque os

ensaios de deslizamento geralmente provocam algum desgaste da rugosidade da diaclase, mas como os ensaios para a determinação de JRC são efetuados a tensões muito mais baixas (duas ordens de grandeza), este efeito deve ser pouco importante.

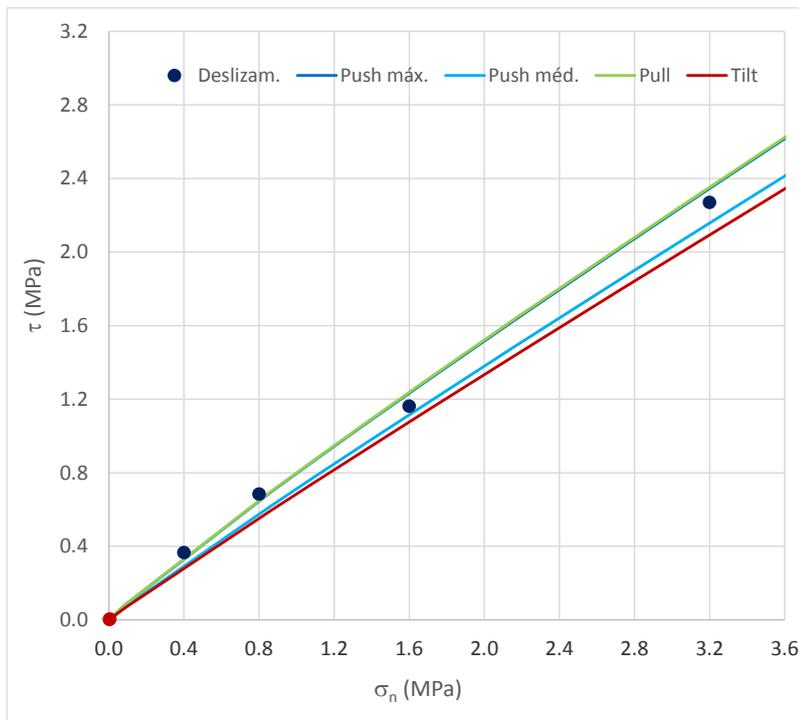


Fig. 91 – Exemplo do gráfico da tensão tangencial – tensão normal para o provete 132

Esta metodologia, que seguiu os procedimentos indicados em Barton e Choubey (1977) foi também aplicada a todos os restantes provetes e os seus resultados (gráficos semelhantes aos da Fig. 90 e Fig. 91) encontram-se no anexo C.

A análise dos gráficos do anexo C mostra que existem diferenças importantes entre as envolventes de Barton determinadas pelos vários tipos de ensaios e que se verificam alguns casos relativos aos provetes de grauvaques em que as envolventes de Barton são retas com inclinação negativa. A primeira constatação, que será analisada na secção seguinte, resulta das diferenças dos valores dos ângulos de atrito determinados pelos diferentes ensaios. A segunda está relacionada com o facto de se tratarem de diaclases quase planas, logo com rugosidades muito baixas e valores de JRC próximos de 0. Nestes gráficos, poderia ter sido considerado que estas diaclases apresentavam $JRC = 0$, mas foram mantidos os valores calculados porque eles são o resultado direto da análise dos resultados experimentais. Quando se realizar uma análise conjunta estas diaclases serão consideradas com $JRC = 0$, ou seja, com ϕ_r igual a ϕ_b .

Da análise dos gráficos de todos os provetes, excluindo os provetes de A a G, verifica-se que o ensaio *pull* é o que apresenta com maior frequência resultados próximos dos ensaios de deslizamento à tensão normal de 3,2 MPa, ficando quase em pé de igualdade com o ensaio *push*. Os resultados dos ensaios *push* apresentam-se como os mais próximos dos de deslizamento em 43% dos casos, os *pull* em cerca de 50% e os *tilt* em apenas 7% dos casos.

6.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS A TENSÕES NORMAIS BAIXAS

Os ensaios a tensões normais baixas (*push*, *pull* e *tilt*) são usados para a determinação de *JRC* a partir da equação (14), apresentada no capítulo 3. No conjunto de 67 ensaios realizados, os diferentes ensaios forneceram valores distintos para cada diaclase, o que conduziu a algumas diferenças na determinação dos correspondentes valores de *JRC*.

Nas figuras seguintes apresentam-se as relações entre os valores do ângulo de atrito (α) determinados pelos ensaios de *push*, *pull* e *tilt*: relação entre ensaios de *push* e *pull* (Fig. 92); relação entre ensaios de *push* e *tilt* (Fig. 93); e a relação entre ensaios de *tilt* e *pull* (Fig. 94).

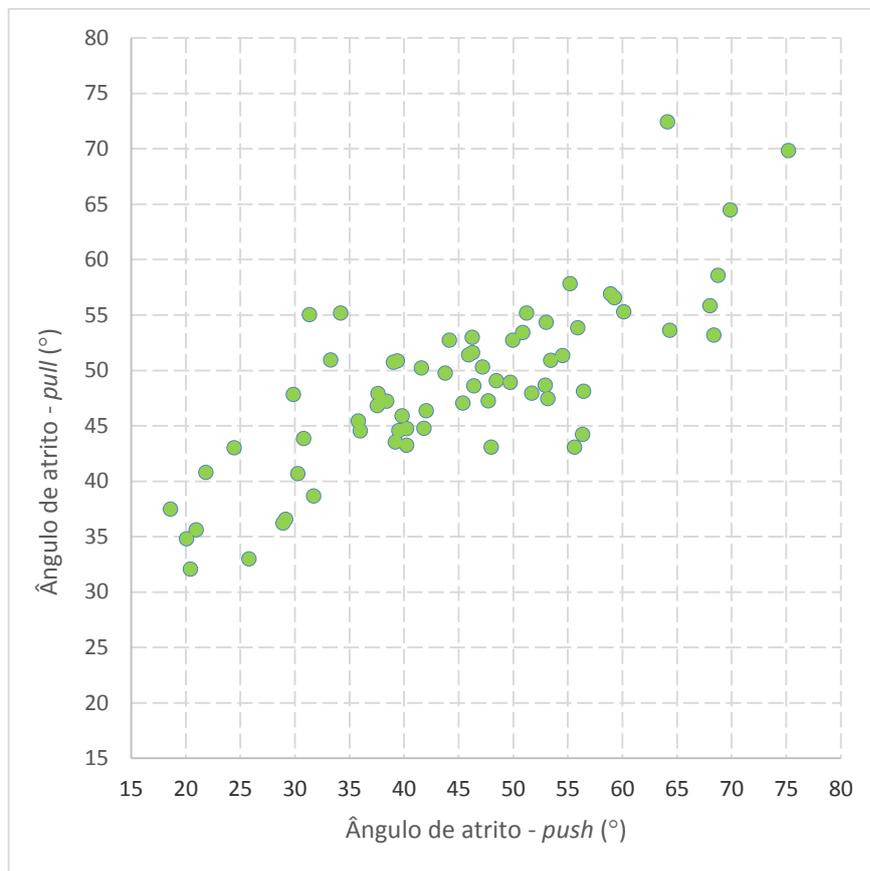


Fig. 92 – Comparação entre os ensaios *pull* e *push*

Estes ensaios mostram que a correlação entre os resultados dos vários tipos de ensaios não é muito forte, em especial para o caso dos ensaios de *push* e de *pull*. Estes dois tipos de ensaios são semelhantes em termos de distribuição das tensões na superfície das diaclases, ao passo que no ensaio de *tilt* a distribuição das tensões varia ao longo do ensaio devido à variação da inclinação.

Verifica-se, ainda, que os ensaios de *pull* conduziram a valores de ângulo de atrito mais elevados, o que pode dever-se ao facto de neste ensaio não ser permitida a rotação da metade superior da diaclase. Neste

sentido aponta também o facto de se ter observado no *tilt* este pequeno movimento de rotação antes do deslizamento franco da diaclase.

Nesta comparação não foram incluídos os valores do ângulo de atrito médio dos ensaios de *push* porque o modelo de Barton é referido a valores da resistência tangencial máxima e por conduzirem a valores muito baixos de *JRC*.

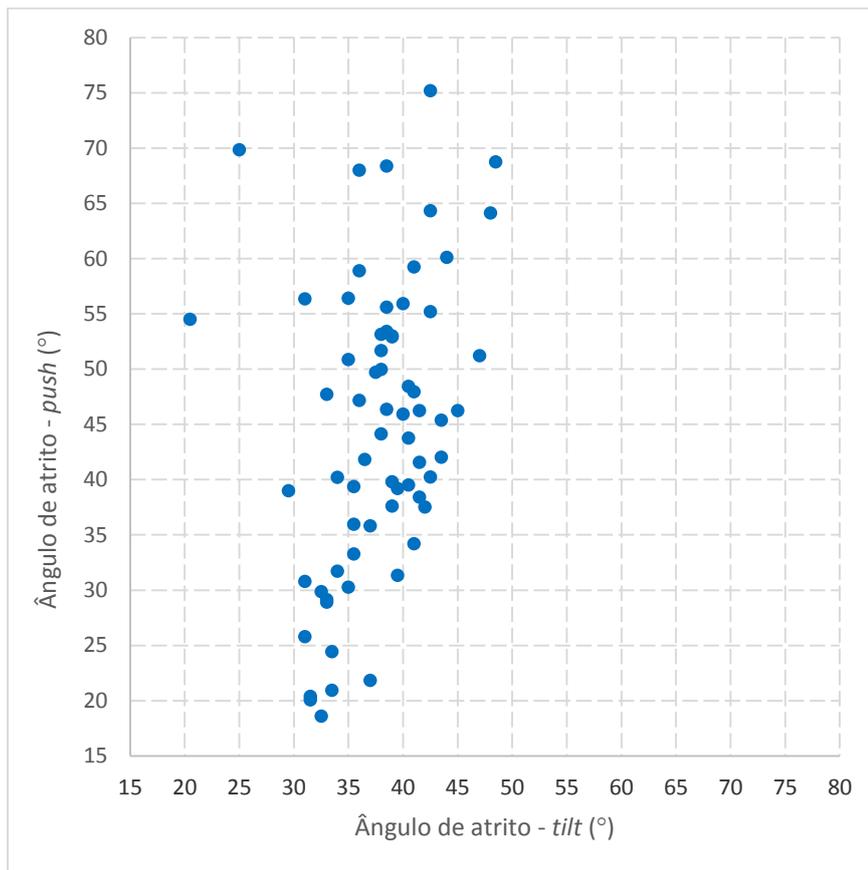


Fig. 93 – Comparação entre os ensaios *push* e *tilt*

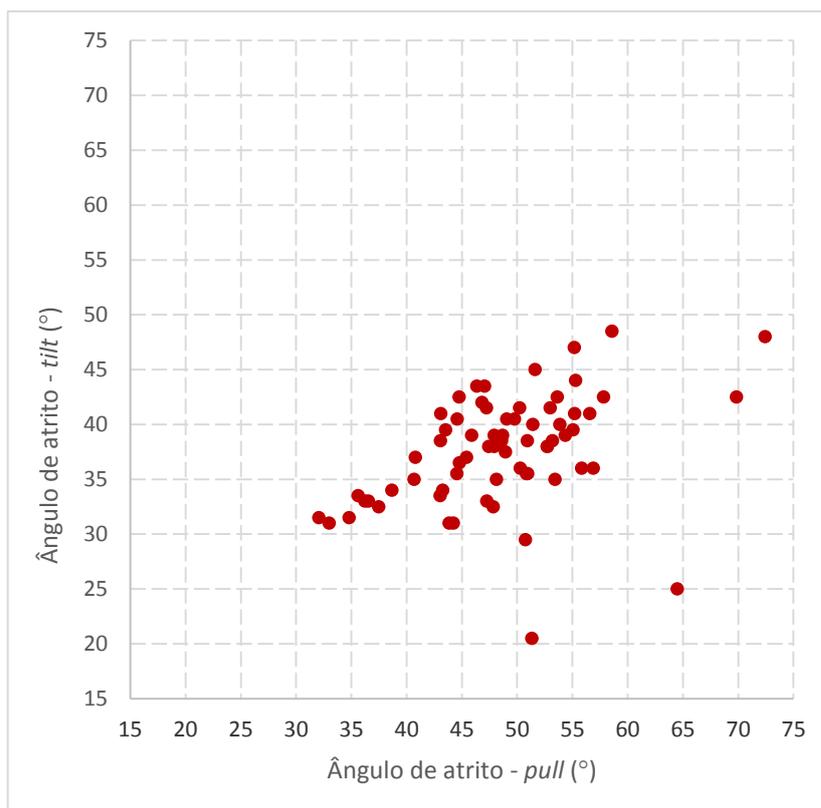


Fig. 94 – Comparação entre os ensaios *tilt* e *pull*

6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CONJUNTOS DE DIACLASES

Tal como recomendado por Barton (1999), os resultados destes ensaios devem ser analisados estatisticamente. Assim, foram considerados os conjuntos dos granitos, com 18 amostras, o conjunto das rochas granitóides, com 19 amostras, e o conjunto dos grauvaques, com 22 amostras.

Em primeiro lugar, para estes três conjuntos, foram construídos os histogramas dos parâmetros de Barton (JRC , JCS e ϕ_r), apresentados da Fig. 95 à Fig. 103. Em seguida, foram estimados valores médios para estes parâmetros considerando médias aritméticas, com exceção de ϕ_r em que se efetuou a média aritmética dos coeficientes de atrito respetivos. Estes valores são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Exemplo do cálculo dos parâmetros do modelo de Barton para os conjuntos de diaclases

Conjunto	Granitos	Granitóides	Grauvaques
$JRC_{Push\ médio}$	2,7	3,3	2,8
$JRC_{Push\ máximo}$	5,4	7,4	4,5
JRC_{Pull}	2,2	6,4	1,3
JRC_{Tilt}	4,1	8,7	2,7
JCS (MPa)	90,7	75,8	48,3
ϕ_r (°)	27,1	24,8	24,2

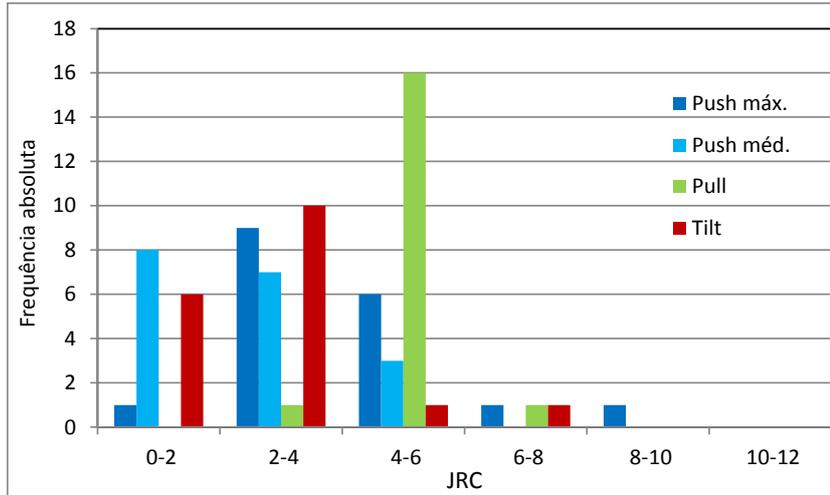


Fig. 95 – Histograma de JRC para o conjunto de diaclases de granitos

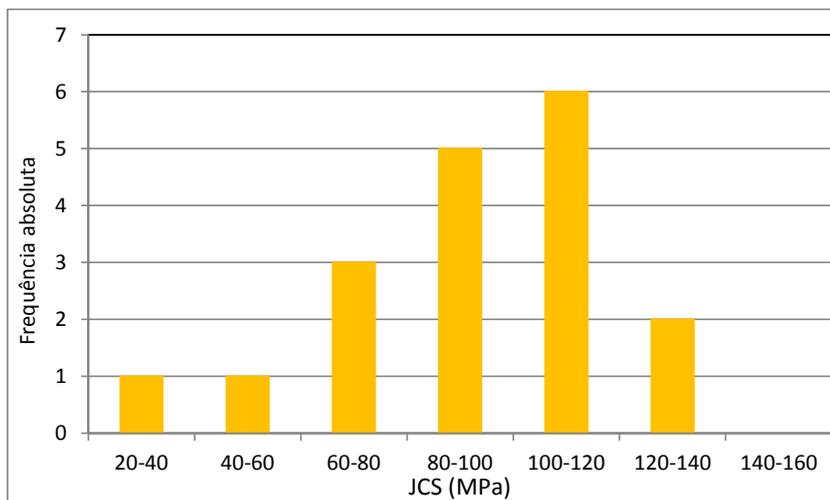


Fig. 96 – Histograma de JCS para o conjunto de diaclases de granitos

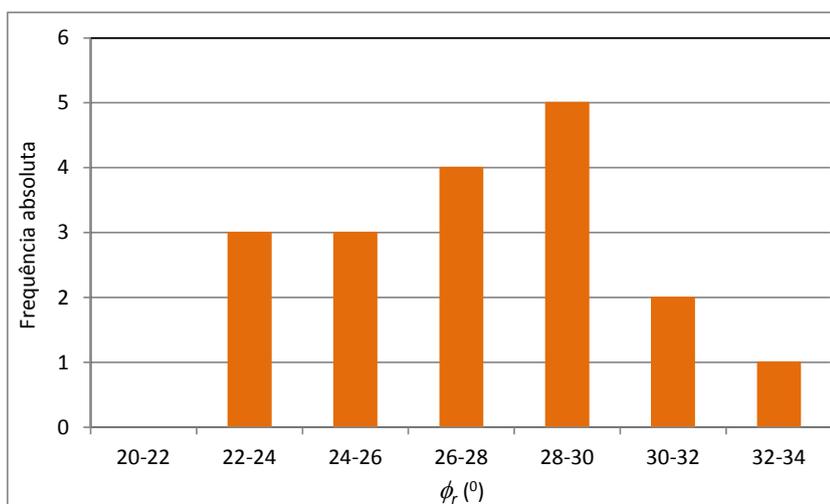


Fig. 97 – Histograma de ϕ_r para o conjunto de diaclases de granitos

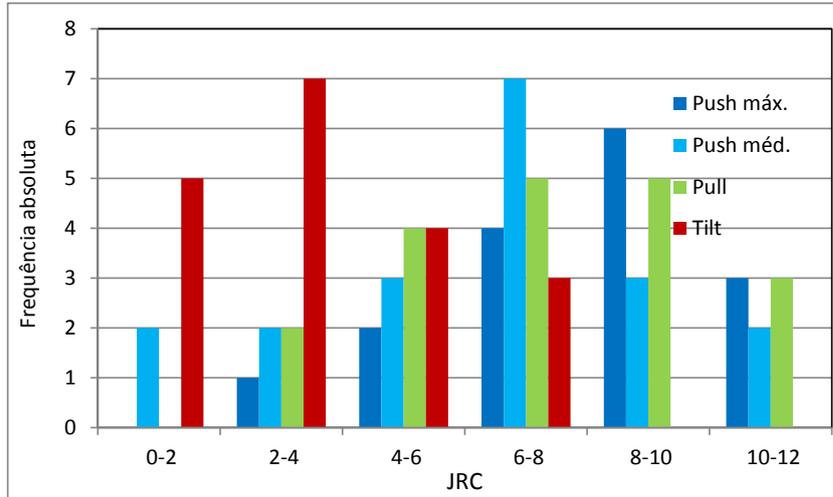


Fig. 98 – Histograma de JRC para o conjunto de diaclases de granitóides

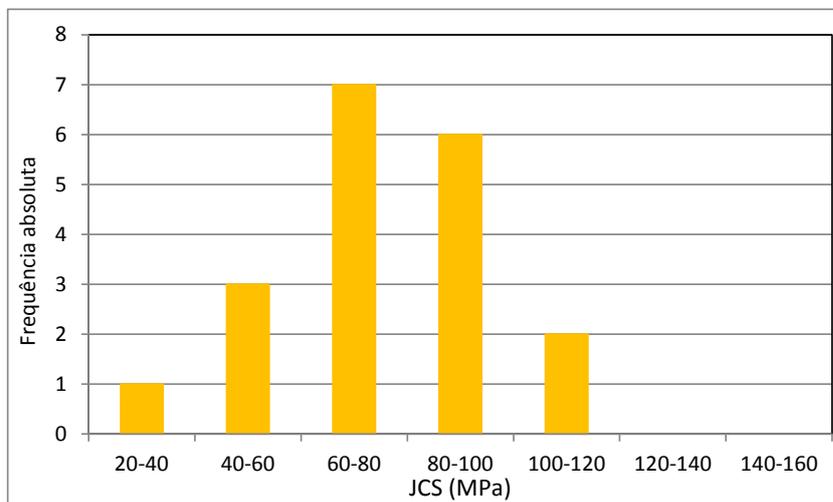


Fig. 99 – Histograma de JCS para o conjunto de diaclases de granitóides

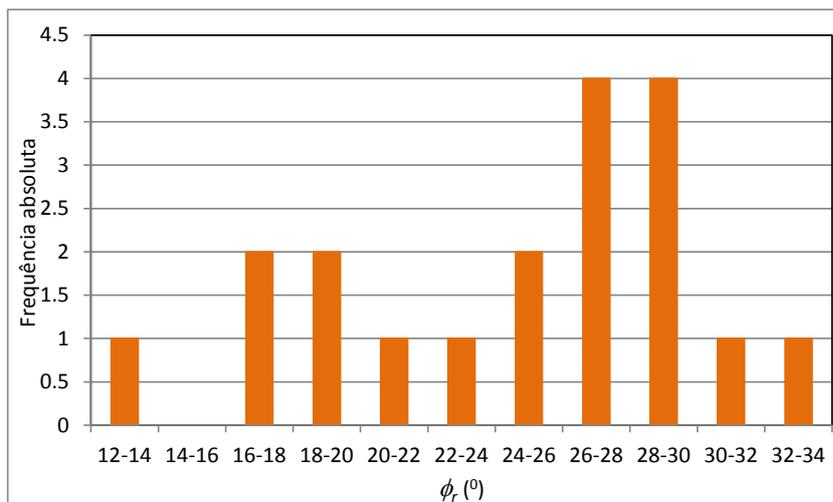


Fig. 100 – Histograma de ϕ_r para o conjunto de diaclases de granitóides

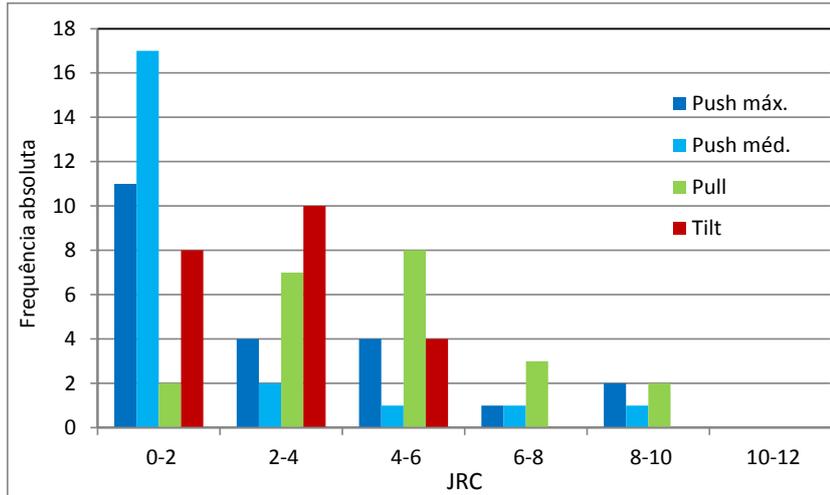


Fig. 101 – Histograma de JRC para o conjunto de diaclases de grauvaques

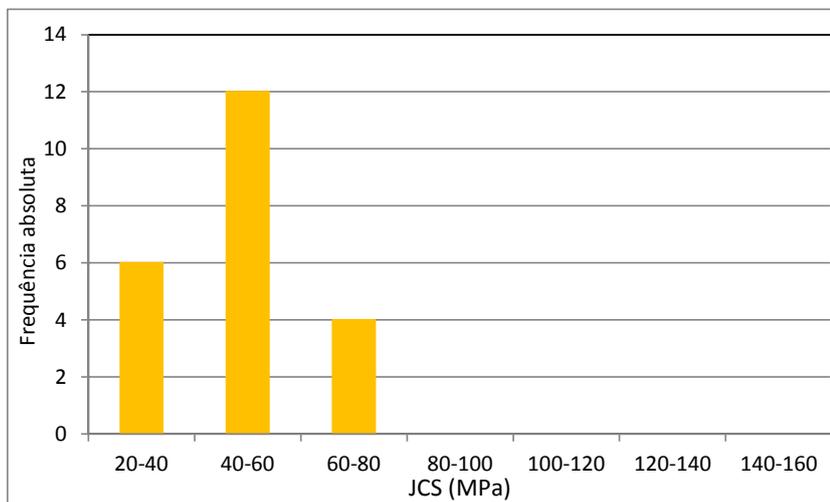


Fig. 102 – Histograma de JCS para o conjunto de diaclases de grauvaques

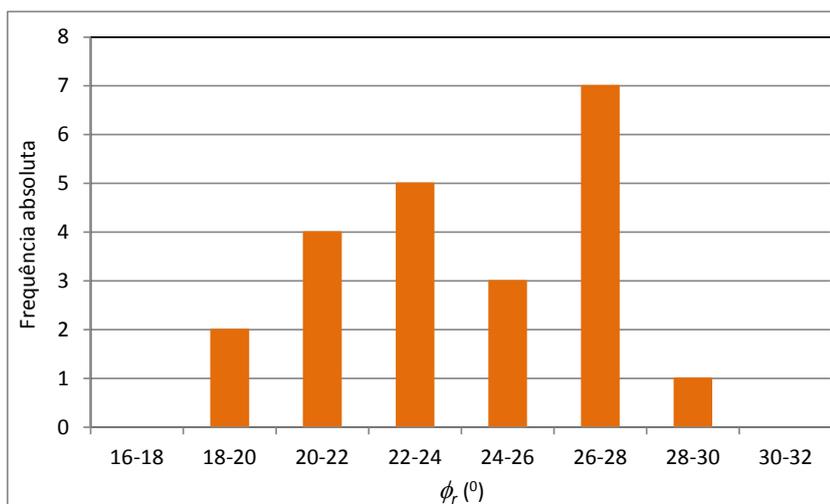


Fig. 103 – Histograma de φr para o conjunto de diaclases de grauvaques

Como o modelo de Barton não é linear e a percentagem de participação de cada um dos parâmetros na resistência tangencial não é fácil de definir, a consideração das médias aritméticas é uma hipótese de partida que se considera aceitável. A análise dos histogramas mostra que, em regra, as distribuições são simétricas e os valores apresentados estão próximos dos valores mais frequentes, o que serve para justificar a afirmação anterior.

Com base nestes valores podem definir-se as envolventes médias do modelo de Barton para os três conjuntos de litologias. Estas envolventes, juntamente com as envolventes médias do modelo de Coulomb respetivas, podem ser apresentadas em gráficos ângulo de atrito – tensão normal normalizada, bem como nos habituais gráficos no plano de tensões de Mohr (tensão tangencial – tensão normal), tal como se ilustra da Fig. 104 à Fig. 109.

Nestes gráficos pode ver-se que, para os conjuntos de diaclases de granitos e grauvaques, existe uma muito boa correspondência entre as envolventes de Barton determinadas com os resultados dos ensaios de *pull* e as correspondentes envolventes de Coulomb determinadas a partir dos ensaios de deslizamento. No caso do conjunto de diaclases em rochas granitóides, a correspondência é muito fraca e os valores de resistência tangencial destas diaclases determinados neste trabalho são inferiores aos determinados previamente. Tal pode dever-se ao desgate da rugosidade provocado pelos ensaios de deslizamento, tendo sido reduzida a resistência das rochas granitóides. No caso dos granitos e dos grauvaques, este efeito parece não ter influência: nos granitos por estes serem mais resistentes (valores de resistência à compressão e *JCS* superiores), nos grauvaques por apresentarem menor resistência e por serem diaclases muito pouco rugosas ou mesmo planas em que a rugosidade foi logo desgastada nos primeiros deslizamentos.

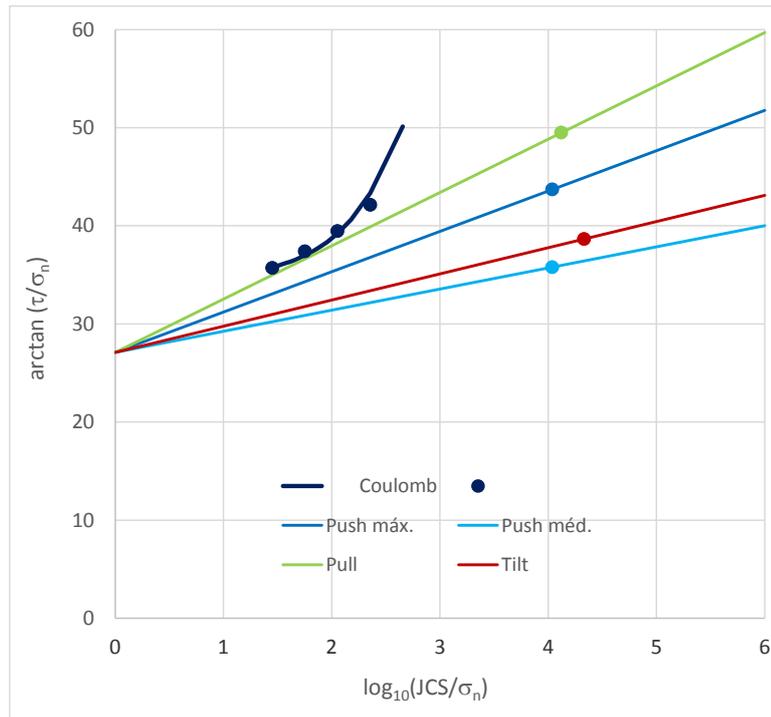


Fig. 104 – Gráficos ângulo de atrito – tensão normal normalizada das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de granitos

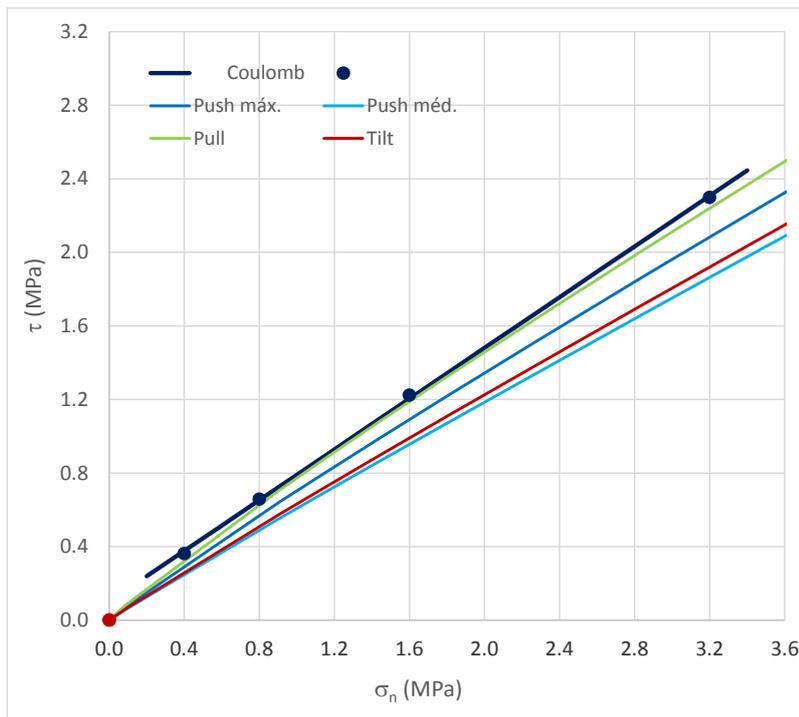


Fig. 105 – Gráficos tensão tangencial – tensão normal das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de granitos

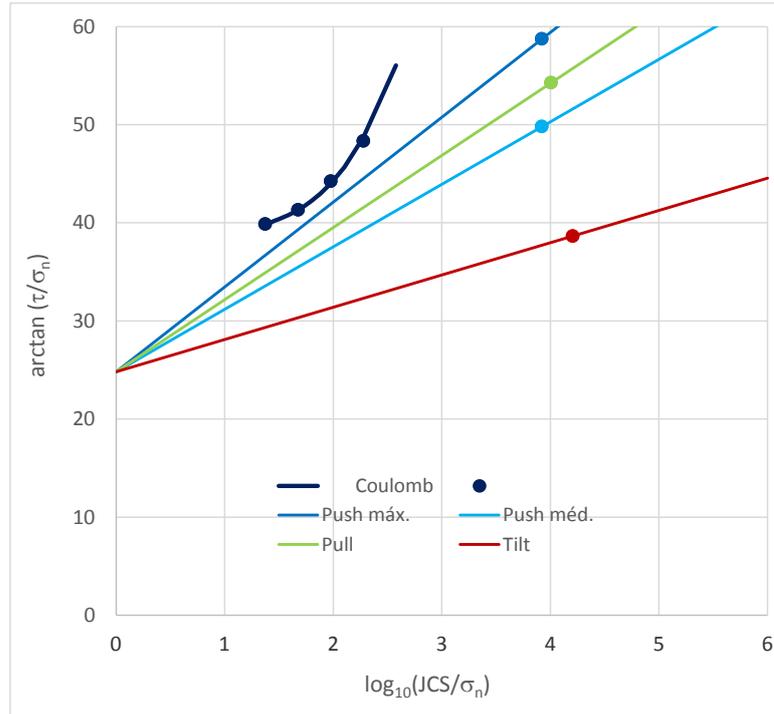


Fig. 106 – Gráficos ângulo de atrito – tensão normal normalizada das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de granitóides

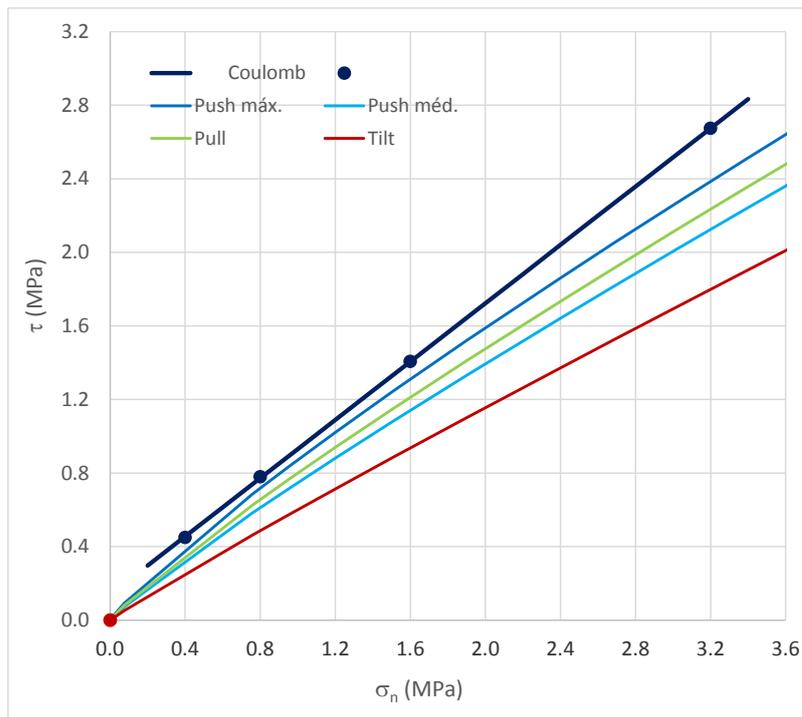


Fig. 107 – Gráficos tensão tangencial – tensão normal das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de granitóides

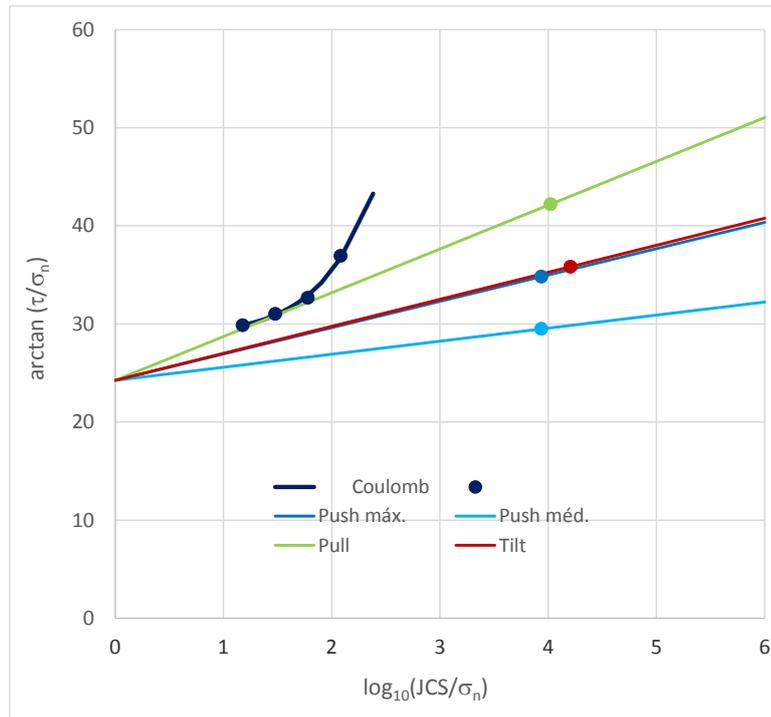


Fig. 108 – Gráficos ângulo de atrito – tensão normal normalizada das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de grauvaques

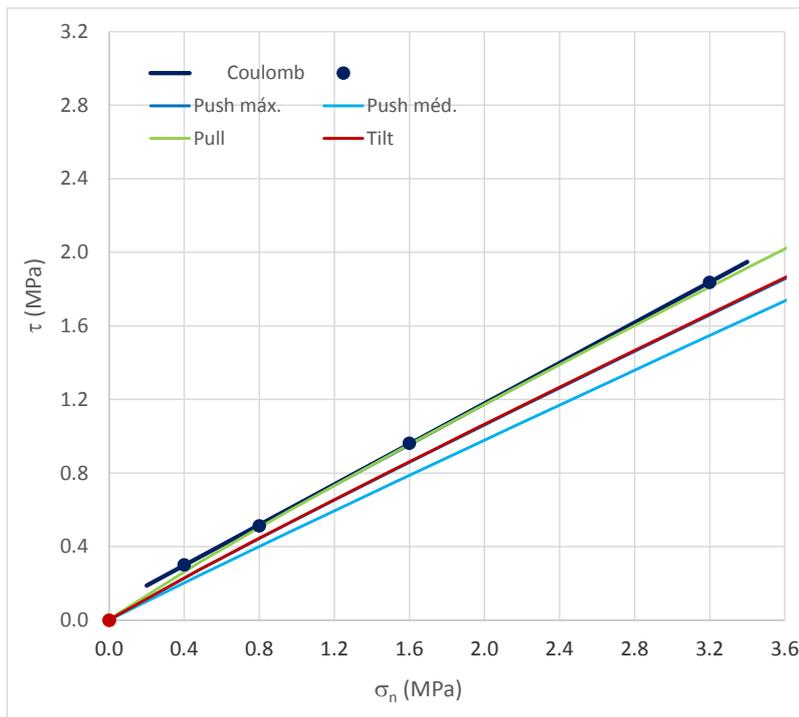


Fig. 109 – Gráficos tensão tangencial – tensão normal das envolventes dos modelos de Barton e Coulomb para as diaclases de grauvaques

7

Conclusões e desenvolvimentos futuros

O principal objetivo do trabalho, que teve uma componente experimental importante, foi comparar os resultados dos modelos de Coulomb e de Barton para modelar a resistência tangencial de diaclases rochosas. Os parâmetros de ambos os modelos foram calculados com base em ensaios de 67 diaclases: ensaios a tensões normais baixas e com martelo de Schmidt para o modelo de Barton; e ensaios de deslizamento a tensão normal constante para o modelo de Coulomb. Estes últimos ensaios já tinham sido previamente realizados fora do âmbito deste trabalho, pelo que só se apresentam os resultados necessários a realizar a comparação referida.

De acordo com o seu autor (Barton e Choubey 1977), a determinação dos parâmetros do modelo de Barton deve ser feita com base em ensaios. Em particular o parâmetro da rugosidade (*JRC*) deve ser determinado a partir dos resultados de ensaios a tensões normais baixas: ensaios de *tilt* ou ensaios de *pull*, no caso de os primeiros permitirem o derrubamento em vez de ocorrer o deslizamento. Para além destes dois ensaios, neste trabalho foi ainda executado um novo tipo de ensaio a tensão normal baixa. Tratou-se do ensaio sem força normal aplicada ou ensaio de *push*, em que a tensão normal na diaclase era a mesma dos outros dois ensaios e resultava do peso da metade superior do provete, mas em que era realizada a medição contínua da força tangencial e dos deslocamentos tangenciais e normais. Assim, foi possível verificar o andamento destas grandezas e determinar a resistência tangencial máxima e média, bem como a dilatância. Para estes ensaios, no presente trabalho foi definido o procedimento com base numa série de ensaios experimentais que permitiram verificar que os resultados eram repetíveis e definir um procedimento.

Os ensaios realizados permitiram introduzir diversas melhorias nos equipamentos. No caso dos ensaios de *push* e de *pull*, salienta-se a necessidade de permitir o deslizamento vertical (perpendicular à aplicação da força tangencial) entre os espaçadores e o provete colocando nessa interface chapas metálicas e roletes para permitirem esse movimento e para que não se mobilizassem forças. Esta melhoria resultou do facto de se tratar de ensaios em que as forças em jogo são relativamente reduzidas (da ordem das dezenas de Newton). No caso dos ensaios de deslizamento, em que as forças são uma a duas ordens de grandeza maiores, esta necessidade nunca tinha sido identificada.

Outro aspeto importante relativo aos ensaios de *pull* e de *tilt* prende-se com a definição do número de repetições a realizar e da forma de calcular o valor do parâmetro a determinar. Neste trabalho em que

foram executadas 11 determinações para cada ensaio, em primeiro lugar, verificou-se que não existem diferenças significativas entre considerar a média aritmética ou a mediana de todas as determinações.

Assim, foi utilizada a mediana por se tratar de uma medida estatisticamente mais robusta do que a média, ou seja, menos sensível à ocorrência de valores extremos. Este facto teve ainda em conta que em alguns dos ensaios de *pull* se verificava uma diminuição da força necessária ao deslizamento depois das primeiras determinações. Considerar a mediana soluciona esta questão. Por outro lado, nos ensaios de *tilt*, em que o resultado de cada determinação é o valor da inclinação do plano da diaclase quando se dá o deslizamento, a mediana apresenta a grande vantagem de permitir uma determinação direta, ao passo que a média aritmética, para ser correta, precisaria de ser efetuada em termos das tangentes dos ângulos.

A comparação dos resultados destes ensaios (ângulo de atrito) para as mesmas diaclases mostrou que a sua correlação era fraca, e que, em regra, os ensaios de *pull* conduziam aos resultados mais elevados e os ensaios de *push* aos resultados mais baixos. A fraca correlação pode ser devida ao facto de a aplicação das tensões nos três tipos de ensaios ser muito diferente. Nos ensaios de *tilt* as tensões normais e tangencial vão variando ao longo do ensaio à medida que a diaclase vai sendo inclinada. Apesar de nos ensaios de *push* e de *pull* as tensões normais serem aplicadas da mesma forma, nos ensaios de *pull* a rotação do provete no plano do deslizamento está impedida, o que não acontece nos ensaios de *push* e de *tilt*. Considera-se que é esta restrição que leva a que os resultados dos ensaios de *pull* sejam os mais elevados.

Por outro lado, em relação à variabilidade dos resultados, deve salientar-se que foram tidos cuidados particulares na colocação prévia dos provetes à realização de cada ensaio, pois a posição relativa das faces das diaclases poderia influenciar os resultados. Neste trabalho, verificou-se, a partir dos valores dos coeficientes de variação, que a dispersão dos resultados das diversas determinações era relativamente reduzida. Concluiu-se ainda que os ensaios de *tilt* conduziam a valores de dispersão inferiores aos dos ensaios de *pull*.

Após a determinação dos parâmetros do modelo de Barton para cada diaclase, iniciou-se a comparação com o modelo de Coulomb, cujos parâmetros tinham sido previamente calculados com base em ensaios de deslizamento sob tensão normal constante. O facto de estes ensaios iniciais já terem produzido algum desgaste das superfícies das diaclases, reduzindo assim a sua rugosidade e resistência tangencial, foi tido em conta durante as análises que foram efetuadas. Assim, a maioria das conclusões tem em conta de forma particular as comparações entre os vários ensaios a tensões normais baixas, em que o desgaste deve ser muito reduzido ou mesmo nulo, e os resultados da tensão tangencial resistente do último deslizamento realizado à tensão normal de 3,2 MPa.

A comparação entre os modelos de Barton e de Coulomb baseou-se, em larga medida, na comparação dos gráficos das envolventes de ambos os modelos. Para cada diaclase foram considerados os gráficos das envolventes de ambos os modelos no espaço de Mohr (τ , σ_n), em que o modelo de Coulomb é representado por uma reta, e os gráficos das mesmas envolventes nos eixos ângulo de atrito – tensão normal normalizada, em que o modelo de Barton se apresenta como uma reta com declive igual a JRC e interseção com o eixo vertical dada por ϕ_r .

Estes gráficos revelam de forma muito clara a diferença significativa entre as gamas de tensões que estão envolvidas nos ensaios que permitem a determinação dos parâmetros dos dois modelos. Em particular no caso do modelo de Barton, os gráficos mostram que os parâmetros do modelo são determinados para tensões normais baixas e os seus resultados são depois extrapolados para tensões

várias ordens de grandeza mais elevadas. Mesmo no caso da análise da estabilidade de um talude rochoso, as tensões normais são bastante mais elevadas do que as que são usadas para determinar JRC , JCS e ϕ_r .

Estes gráficos mostram ainda que as diferenças visíveis entre os resultados de ambos os modelos no espaço do modelo de Barton, quando traduzidas em termos de tensões tangenciais resistentes (espaço de Mohr) conduzem apenas a desvios em muitos casos pouco significativos.

Como os valores do parâmetro JRC do modelo de Barton foram determinados a partir dos valores dos ângulos de atrito que resultaram dos ensaios de *push*, *pull* e *tilt*, a análise realizada neste trabalho considerou e comparou estas diferentes possibilidades. Verificou-se que o ensaio que conduz a piores aproximações foi o ensaio de *tilt*, levando à melhor aproximação em apenas 7% dos casos, já os ensaios *push* e *pull* apresentaram-se como os mais representativos, com a melhor aproximação em cerca de 43% e 50% dos casos respetivamente.

Como era possível agrupar as diaclases em três conjuntos de acordo com a sua litologia (granitos, granitóides e grauvaques), foi igualmente executada a comparação das envolventes médias destes conjuntos. Esta comparação mostrou que, em termos médios, para os granitos e grauvaques o modelo de Barton com os parâmetros calculados com base nos ensaios de *pull* e o modelo Coulomb eram quase coincidentes na estimativa das tensões tangenciais para a gama de tensões normais vulgarmente existente em obras de engenharia. Para os granitóides, os valores de tensão tangencial determinados com o modelo de Barton eram inferiores aos inicialmente determinados a partir dos ensaios de deslizamento, possivelmente devido ao efeito do desgaste da rugosidade ter sido mais importante neste tipo de rochas.

Este trabalho permitiu ainda evidenciar alguns aspetos que merecem a realização de futuros estudos. No domínio dos ensaios de *push* considera-se interessante avaliar a influência da dilatância e a sua relação com os parâmetros do modelo de Barton, nomeadamente com JRC . No caso dos ensaios de *pull*, como já referido, pode adaptar-se o equipamento com um sistema simples que permita a rotação do provete no plano do deslizamento para que as condições sejam mais próximas das dos restantes ensaios. Dado que as correlações entre os resultados destes três tipos de ensaios não foram satisfatórias, um estudo futuro deveria realizar os três tipos de ensaios sobre as superfícies serradas para garantir que as diferenças evidenciadas neste trabalho se devem à resposta da rugosidade das diaclases face às condições dos diferentes tipos de ensaio. Em relação ao número de determinações necessárias para cada ensaio, concluiu-se que a partir de 5-7 repetições os resultados não apresentavam alterações sensíveis, mas seria importante efetuar um estudo estatístico de um novo conjunto de ensaios para reduzir o número de repetições por meio de uma regra baseada na evolução dos resultados.

Dada a reconhecida influência do efeito do desgaste da rugosidade das superfícies na resistência das diaclases, um futuro estudo deste tipo deve ser realizado de forma a que os primeiros ensaios sejam os efetuados a tensões normais baixas e somente após estes os ensaios de deslizamento habituais. Dada a não-linearidade do modelo de Barton e devido ao facto de os seus resultados serem extrapolados para gamas de tensão normal mais elevadas, seria interessante avaliar a influência de cada um dos seus parâmetros, JRC , JCS e ϕ_r , na resistência tangencial das diaclases. Esta análise seria um primeiro passo para estudar se é possível considerar fatores de segurança parciais diferentes para estes parâmetros ou se a redução da resistência deve ser realizada diretamente na tensão tangencial resistente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aydin, A. (2009). *ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 46(3): 627-634.
- Bandis, S. C. (1980). *Experimental Studies of Scale Effects on Shear Strength and Deformation of Rock Joints*. Dissertação de Doutorado, The University of Leeds.
- Barton, N., V. Choubey (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock mechanics 10(1-2): 1-54.
- Barton, N. (1999). *General report concerning some 20th Century lessons and 21st Century challenges in applied rock mechanics, safety and control of the environment*. Proc. Of 9th ISRM Congress, Paris, 3: 1659-1679. Rotterdam: Balkema.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications : a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York, Wiley.
- Brady, B. H. G., E. T. Brown (2005). *Rock Mechanics for underground mining*, Springer Science e Business Media, Inc.
- Duffaut, P. (2013). *The traps behind the failure of Malpasset arch dam, France, in 1959*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 5 (2013) 335–341
- Geologia de Engenharia (2014). Textos de apoio de Geologia de Engenharia. FEUP, Porto.
- González de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid [etc.], Pearson.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. New York, John Wiley & Sons.
- Grasselli, G. (2001). *Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description*. Dissertação de Doutorado, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*.
- Hudson, J., J. P. Harrison (1997). *Engineering rock mechanics : an introduction to the principles*. Tarrytown, NY, Pergamon.
- ISRM (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. 15: 319-368.
- ISRM (1981). *Basic geotechnical description of rock masses*. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. 18: 85-110.
- Muralha (1997). *Abordagem probabilística do comportamento mecânico de descontinuidades de maciços rochosos*. Dissertação Doutorado, Instituto Superior Técnico.
- Muralha, J., et al. (2014). *ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version*. Rock Mechanics and Rock Engineering 47(1): 291-302.
- Rocha, M. C. M. d. (1981). *Mecânica das rochas*. Lisboa, LNEC.
- http://en.wikipedia.org/wiki/Vajont_Dam. 07/01/2015

ANEXOS

ANEXO A

Gráficos do ensaio de deslizamento sem força normal

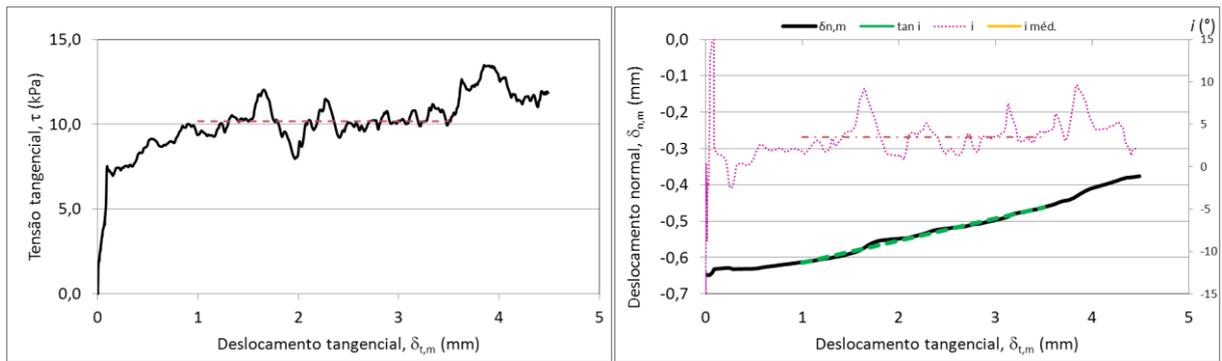


Fig. 110A – Gráficos do provete 127

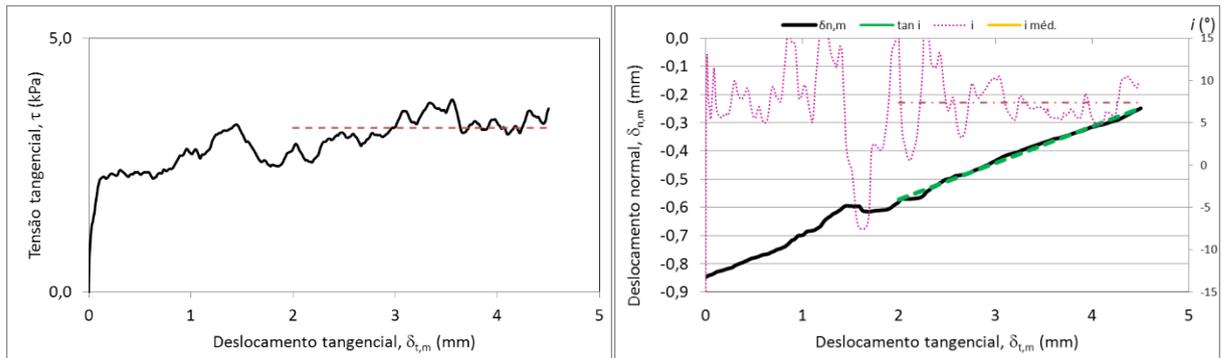


Fig. 111A – Gráficos do provete 130

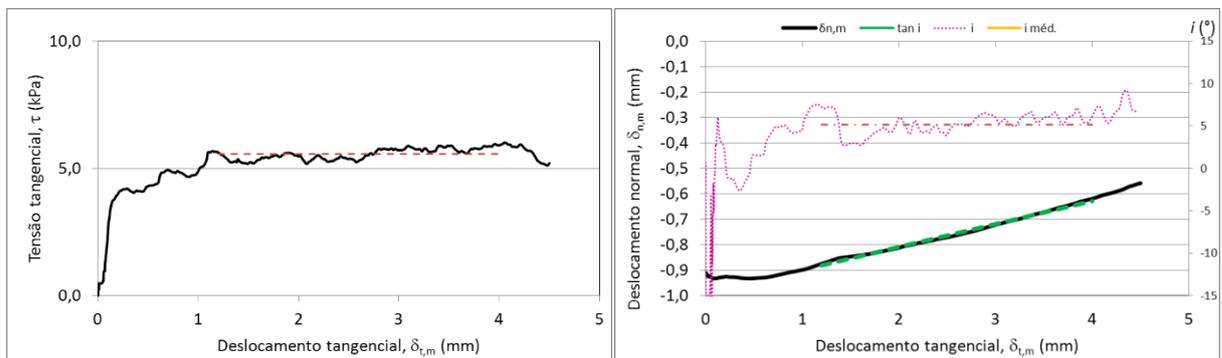


Fig. 112A – Gráficos do provete 131

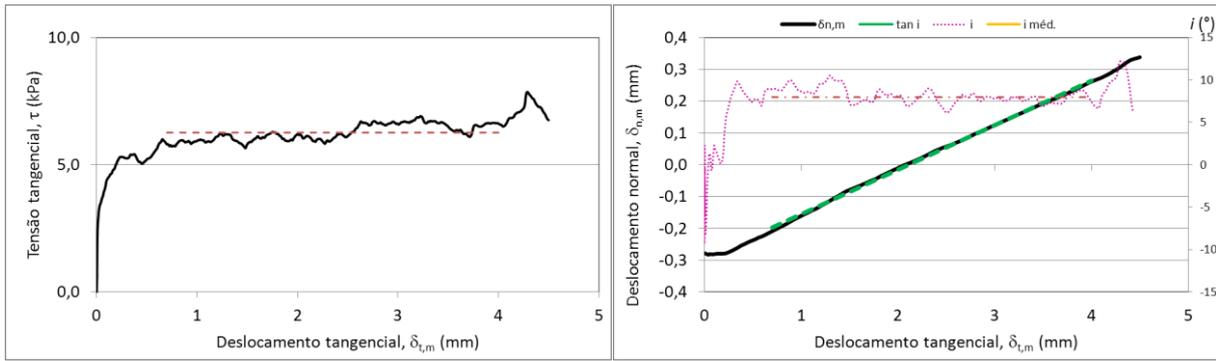


Fig. 113A – Gráficos do provete 132

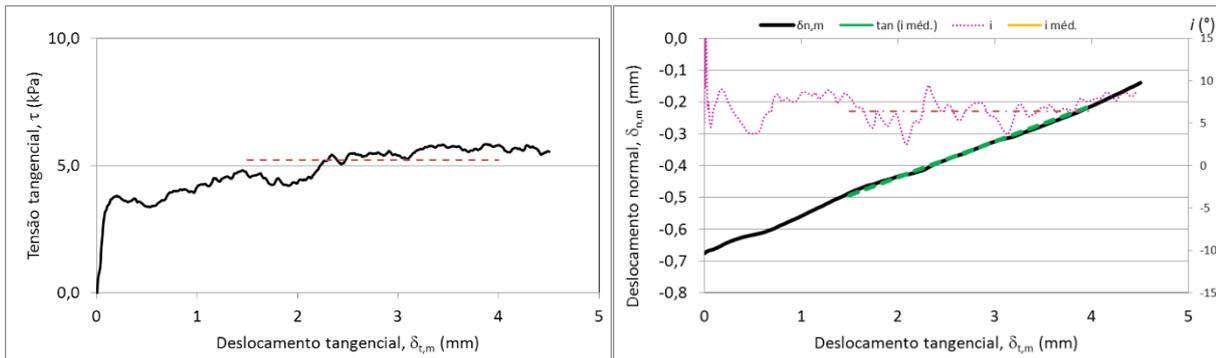


Fig. 114A – Gráficos do provete 133

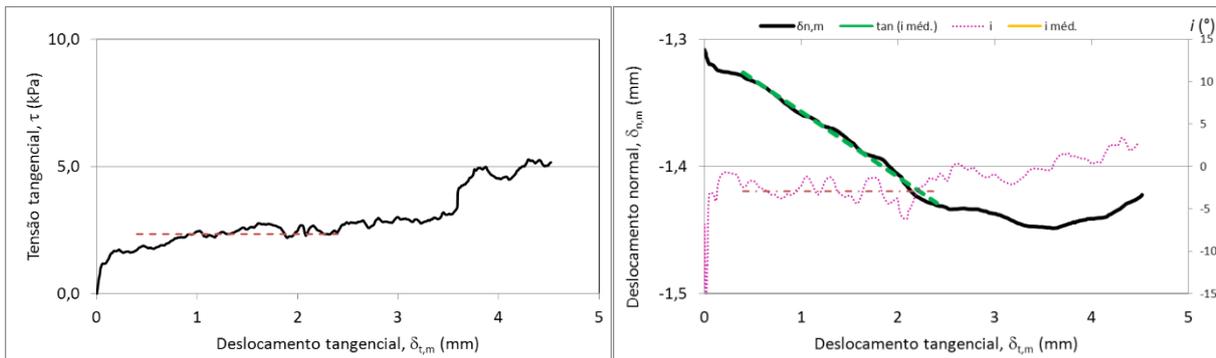


Fig. 115A – Gráficos do provete 134

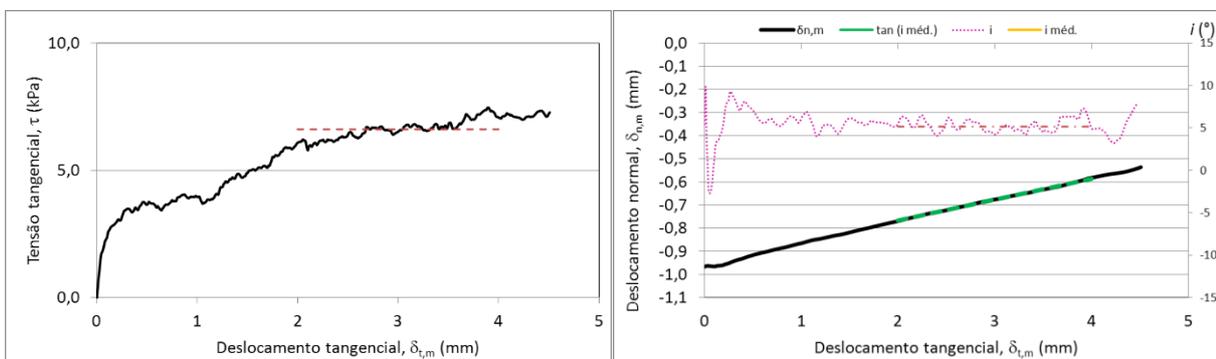


Fig. 116A – Gráficos do provete 135

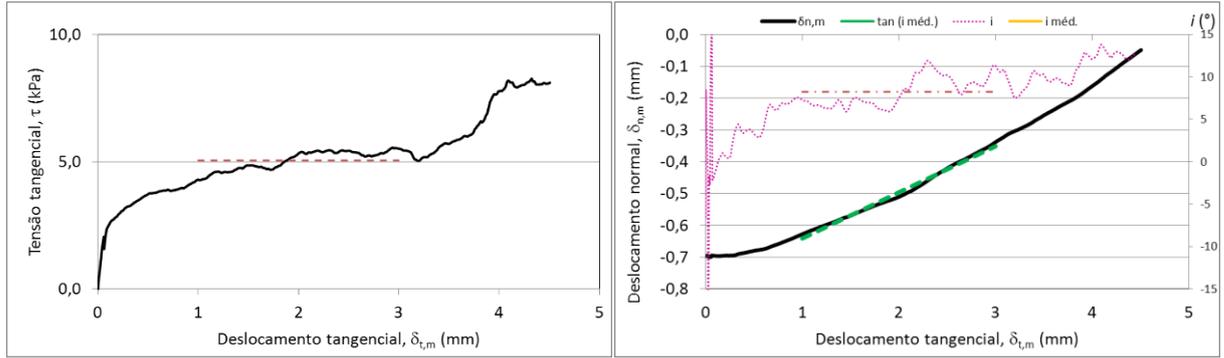


Fig. 117A – Gráficos do provete 136

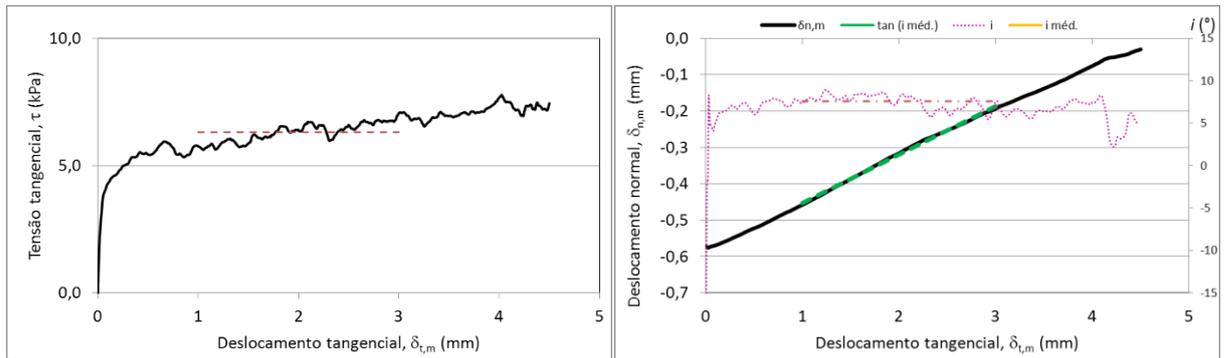


Fig. 118A – Gráficos do provete 137

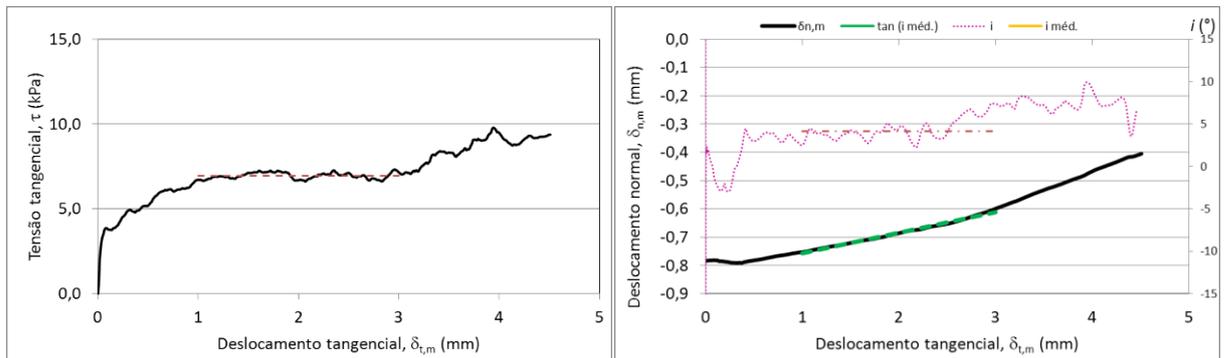


Fig. 119A – Gráficos do provete 140

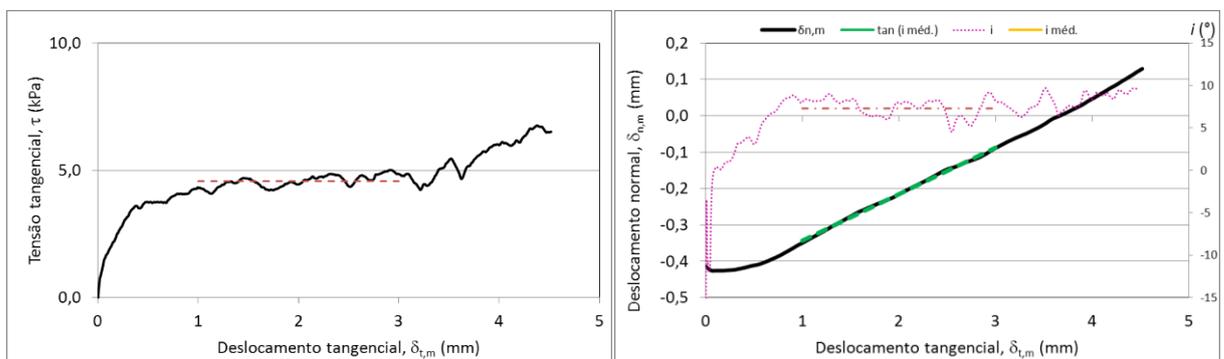


Fig. 120A – Gráficos do provete 141

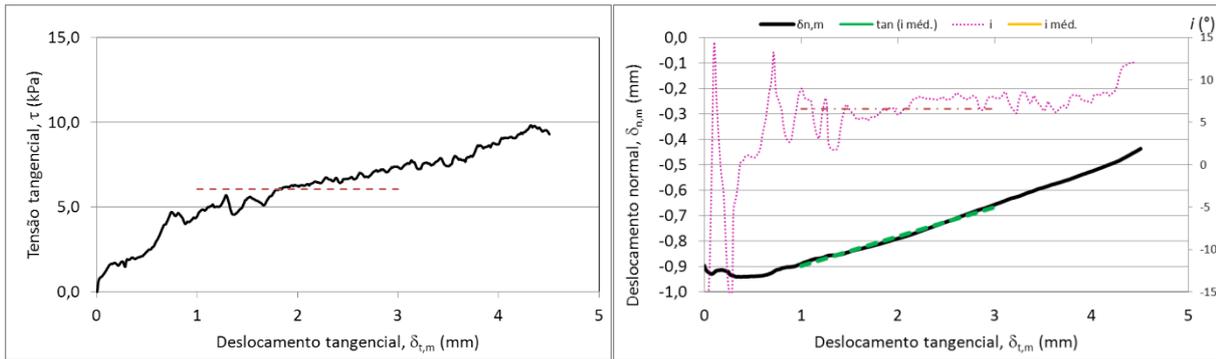


Fig. 121A – Gráficos do provete 142

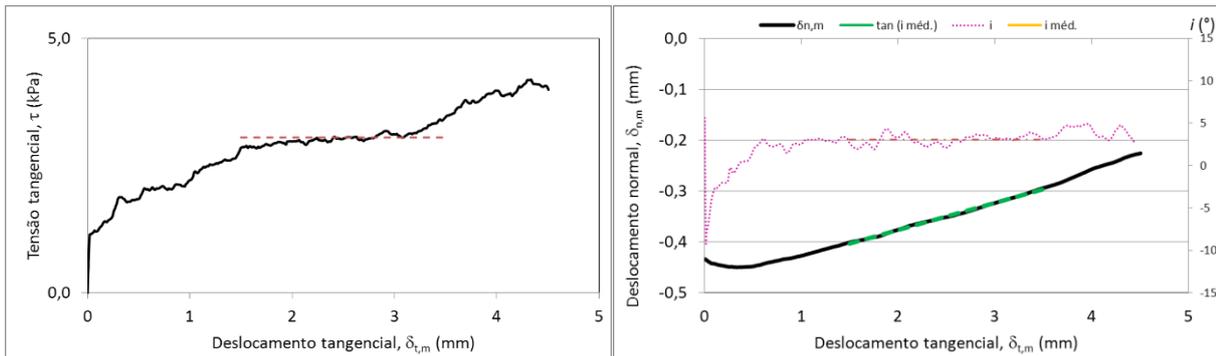


Fig. 122A – Gráficos do provete 143

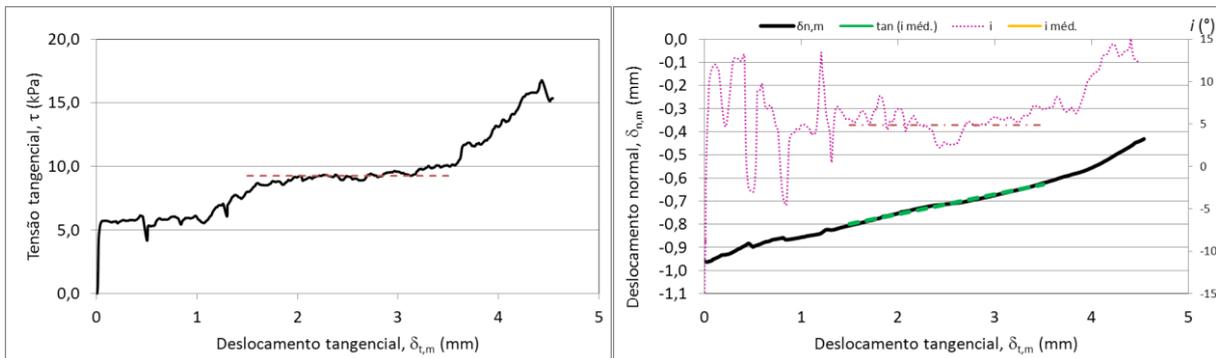


Fig. 123A – Gráficos do provete 249

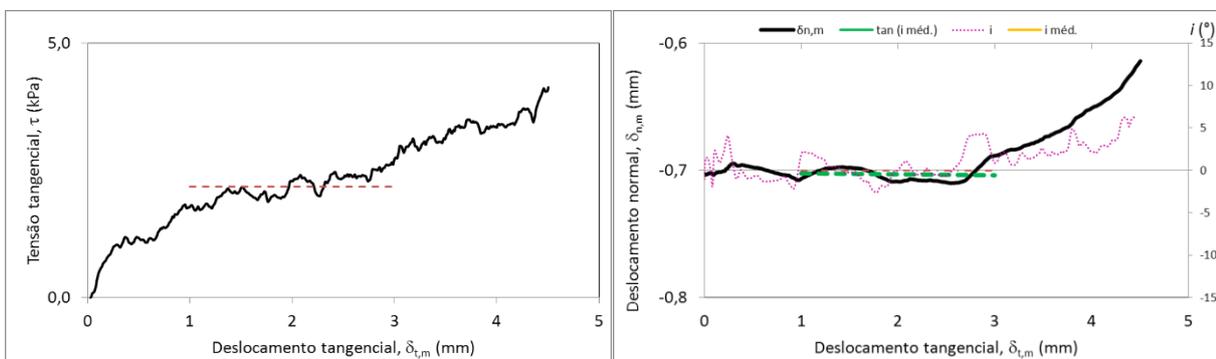


Fig. 124A – Gráficos do provete 253

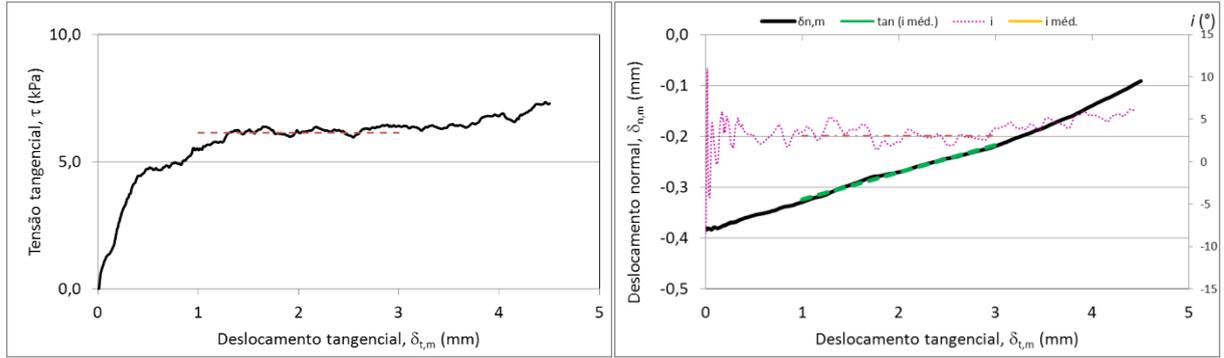


Fig. 125A – Gráficos do provete 254

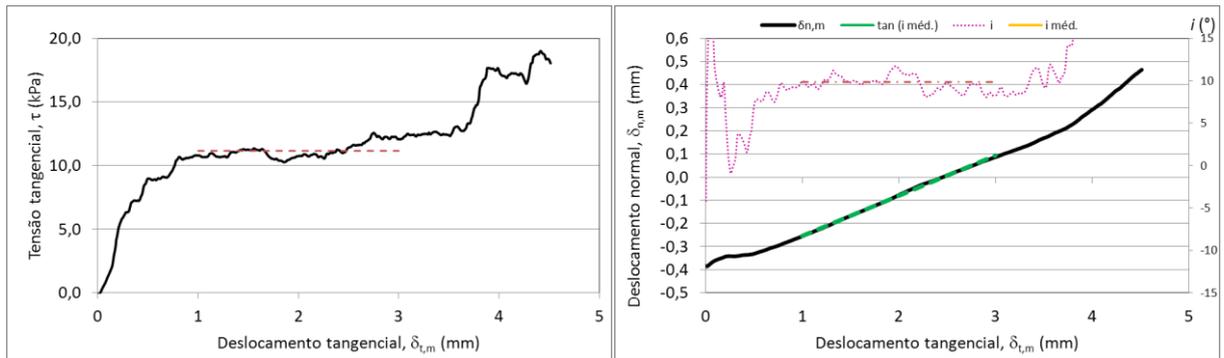


Fig. 126A – Gráficos do provete 255

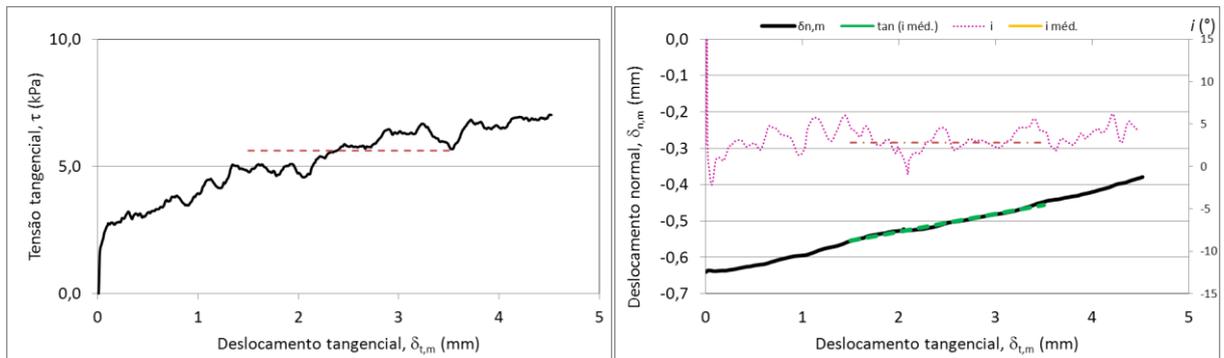


Fig. 127A – Gráficos do provete 255

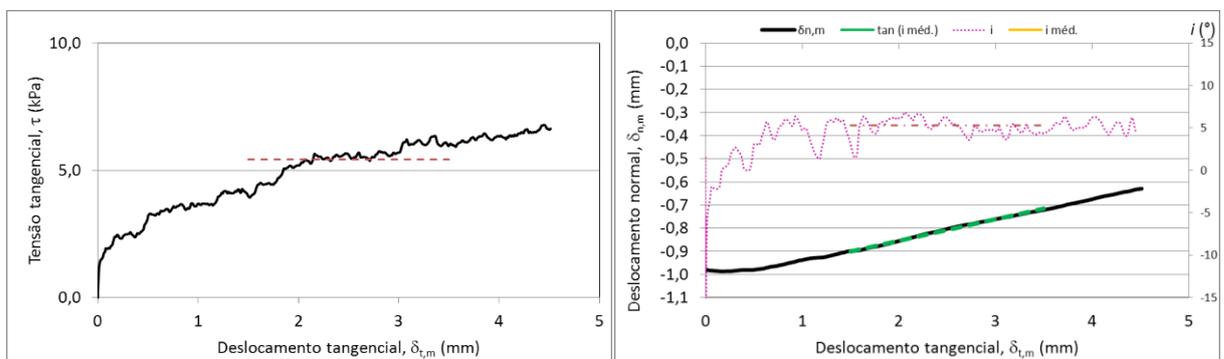


Fig. 128A – Gráficos do provete 301

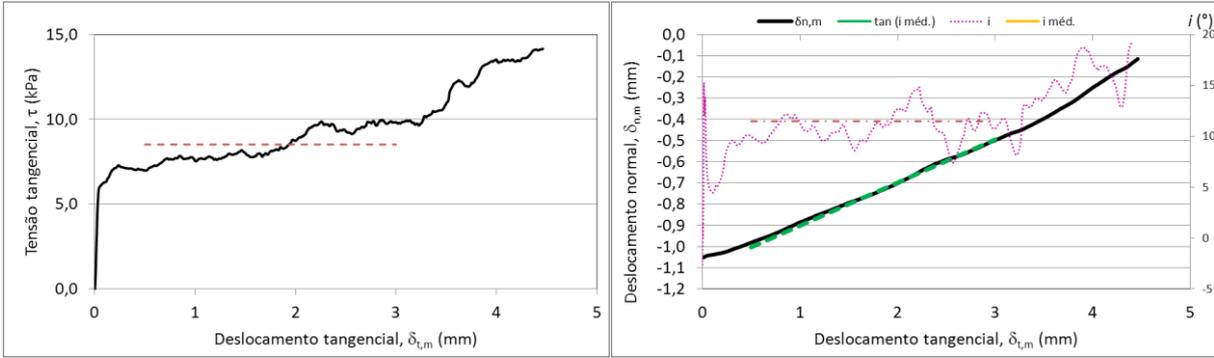


Fig. 129A – Gráficos do provete 302

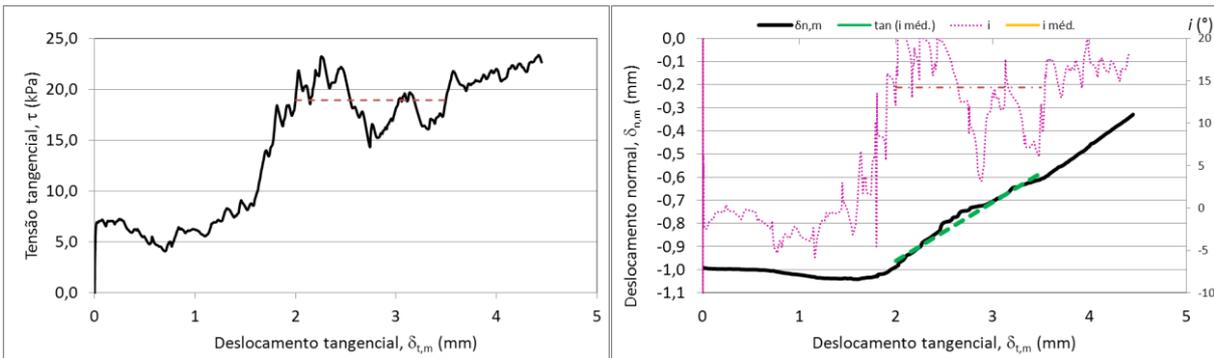


Fig. 130A – Gráficos do provete 303

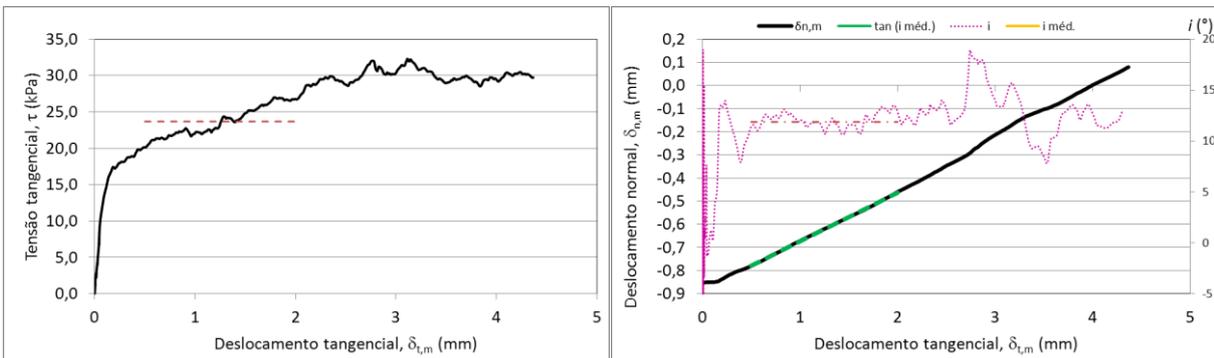


Fig. 131A – Gráficos do provete 304

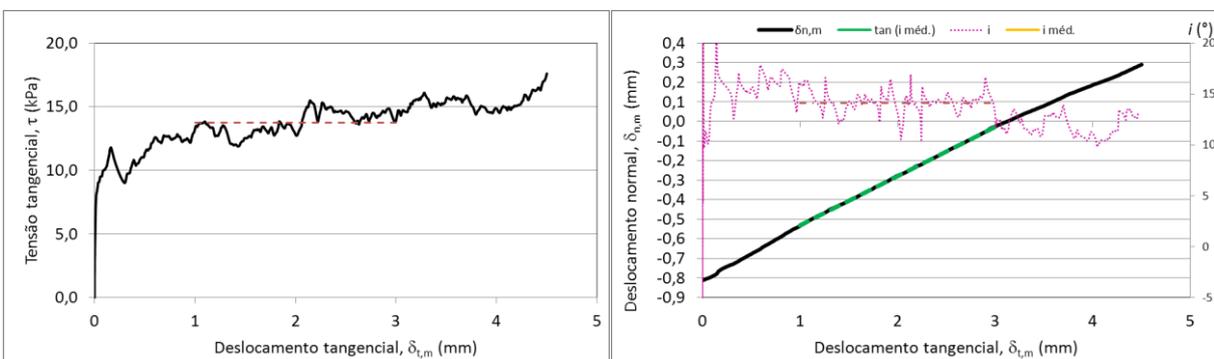


Fig. 132A – Gráficos do provete 306

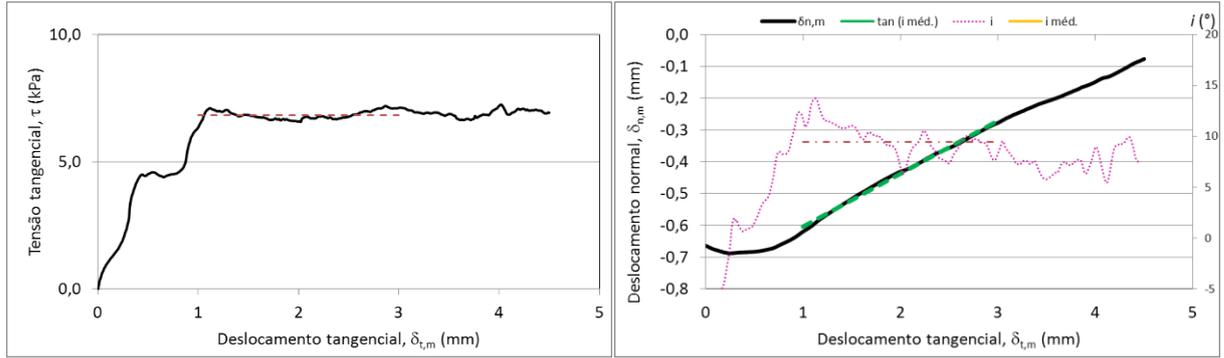


Fig. 133A – Gráficos do provete 307

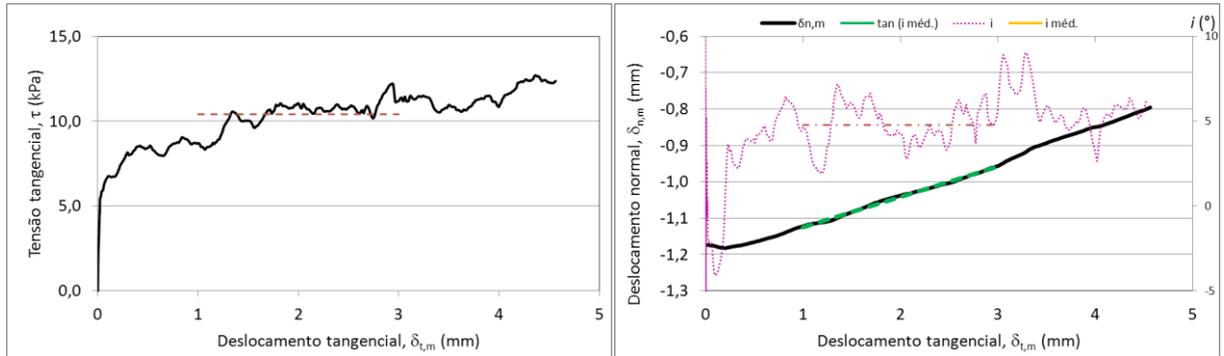


Fig. 134A – Gráficos do provete 308

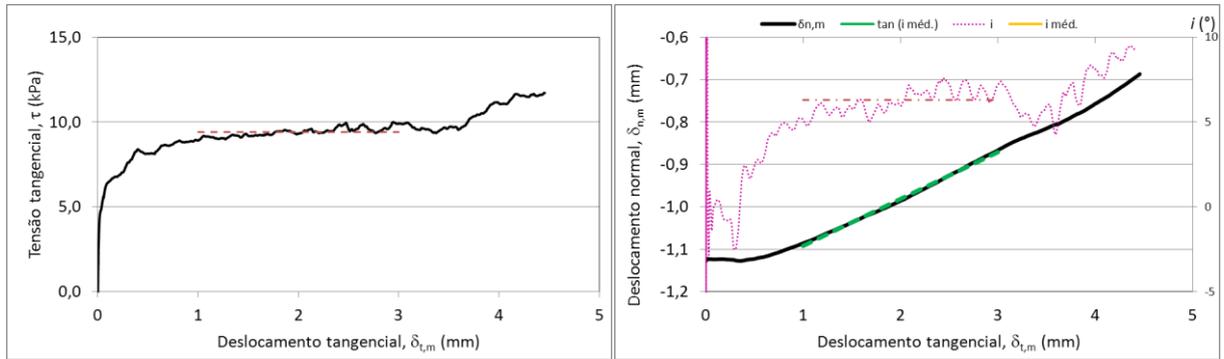


Fig. 135A – Gráficos do provete 309

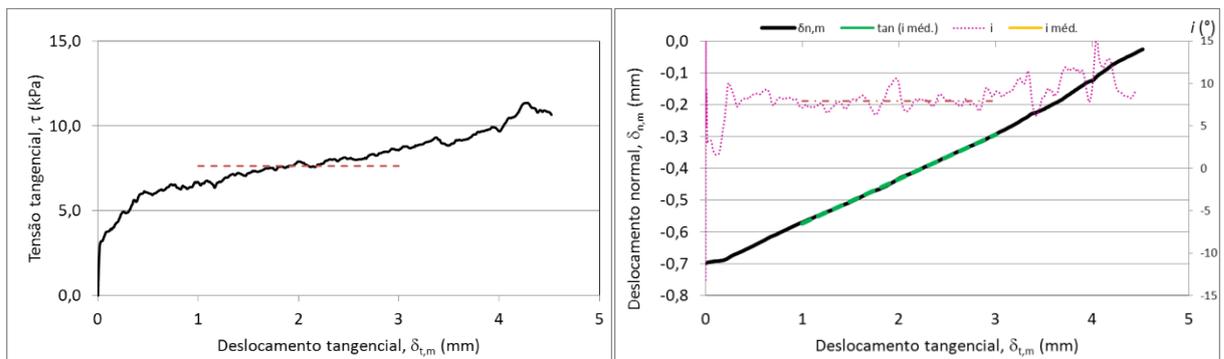


Fig. 136A – Gráficos do provete 335

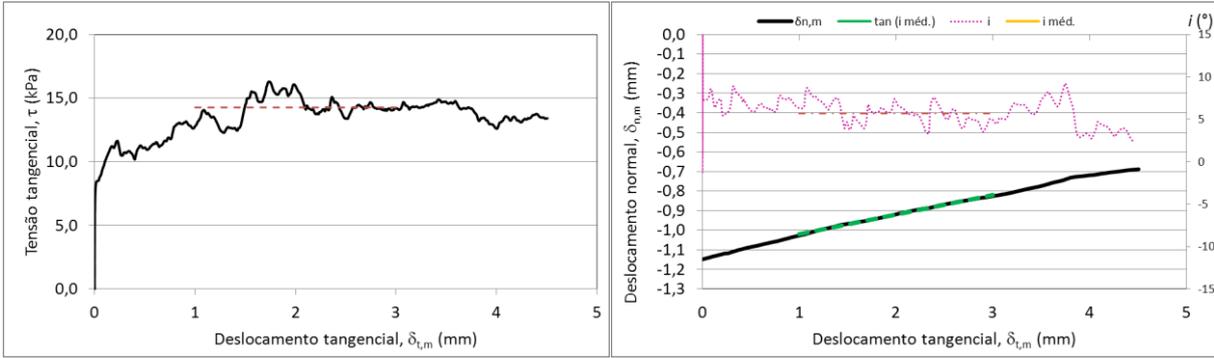


Fig. 137A – Gráficos do provete 336

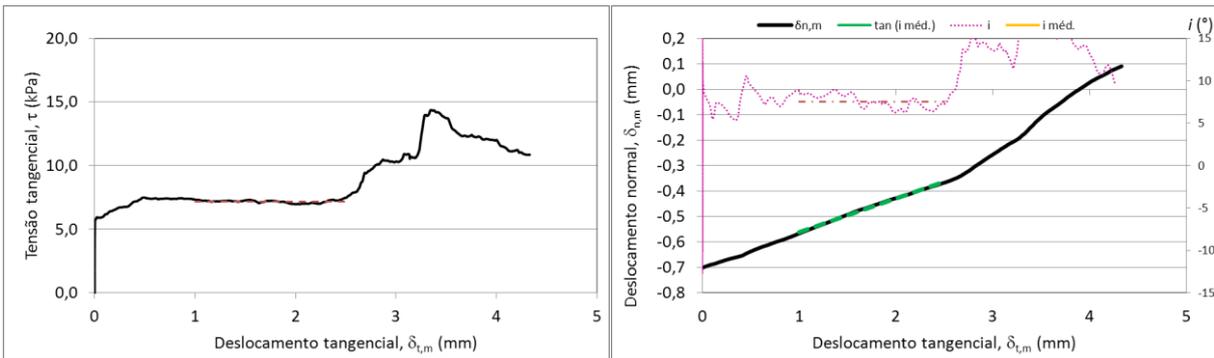


Fig. 138A – Gráficos do provete 389

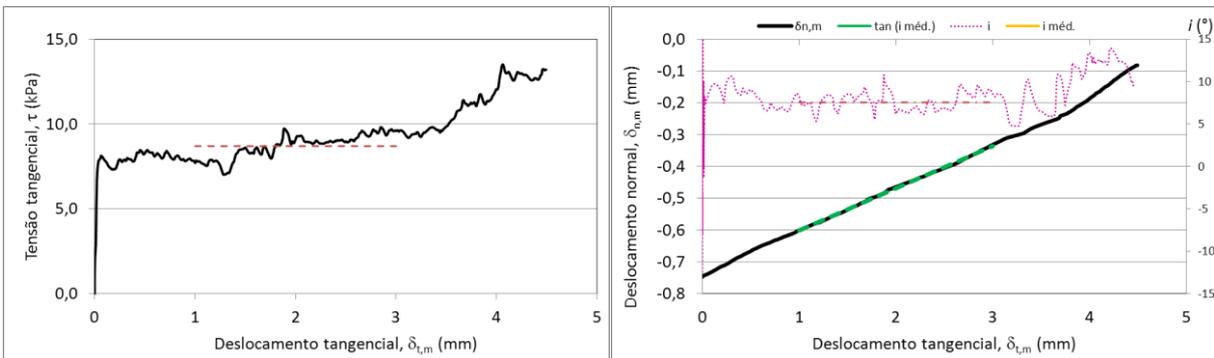


Fig. 139A – Gráficos do provete 390

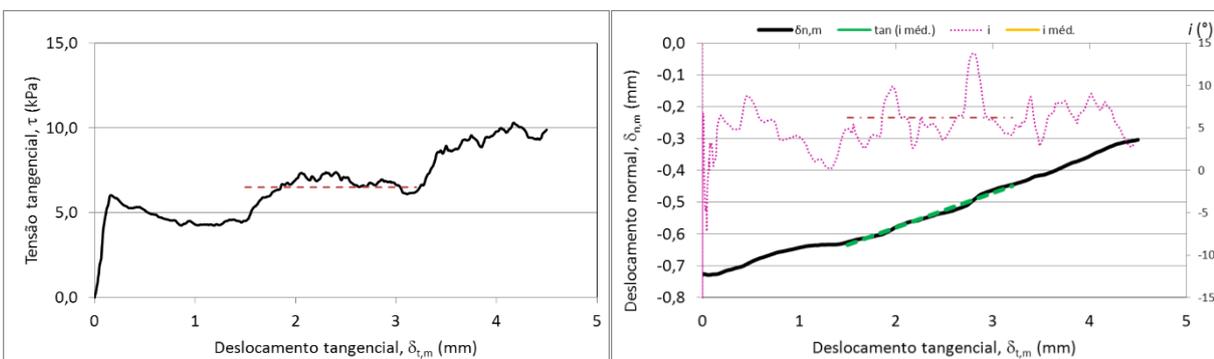


Fig. 140A – Gráficos do provete 391

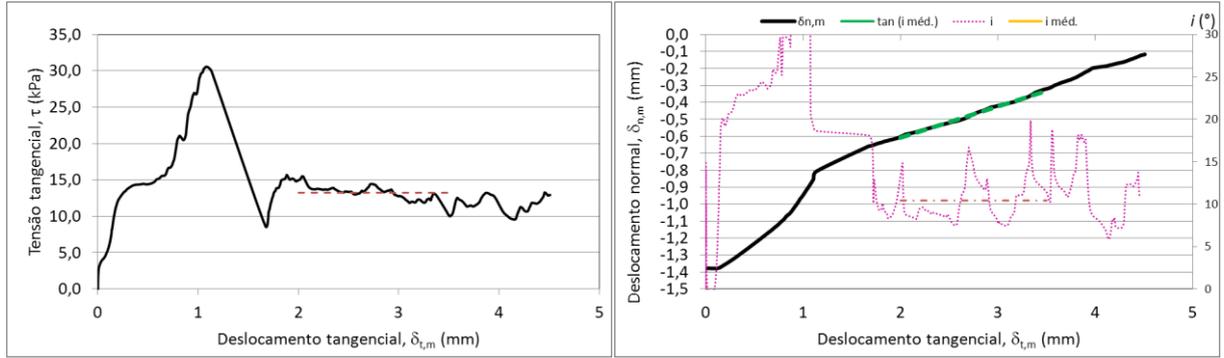


Fig. 141A – Gráficos do provete 392

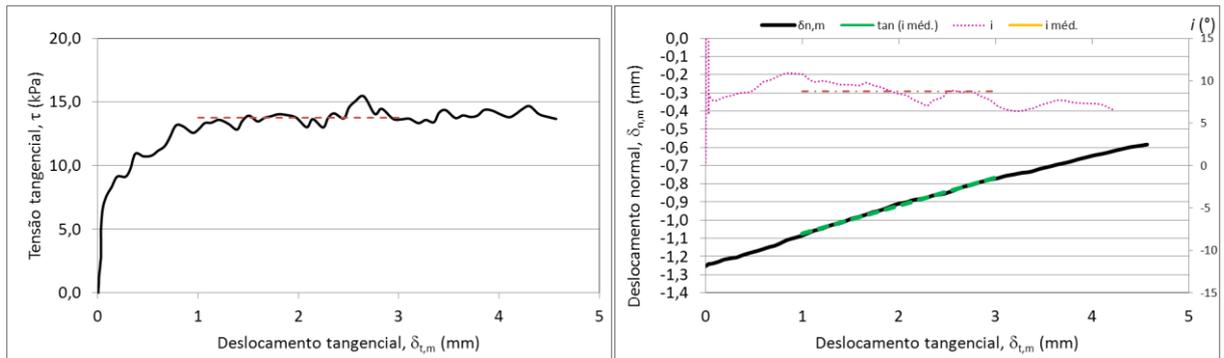


Fig. 142A – Gráficos do provete 393

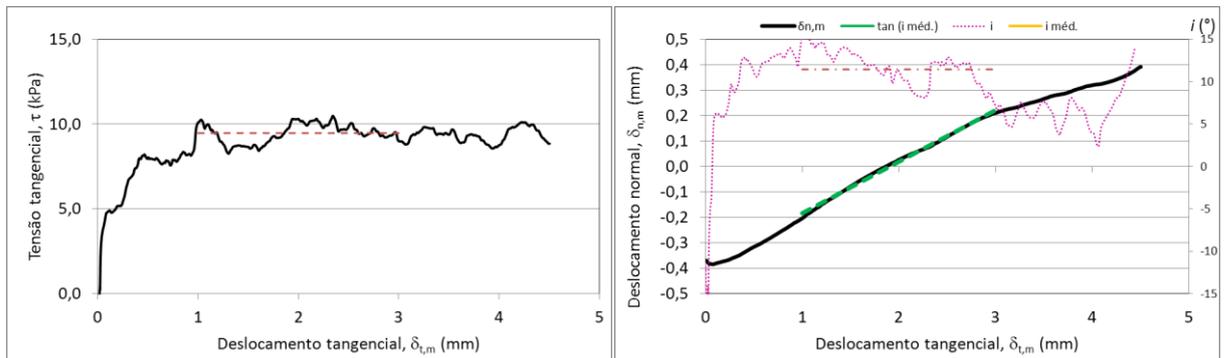


Fig. 143A – Gráficos do provete 394A

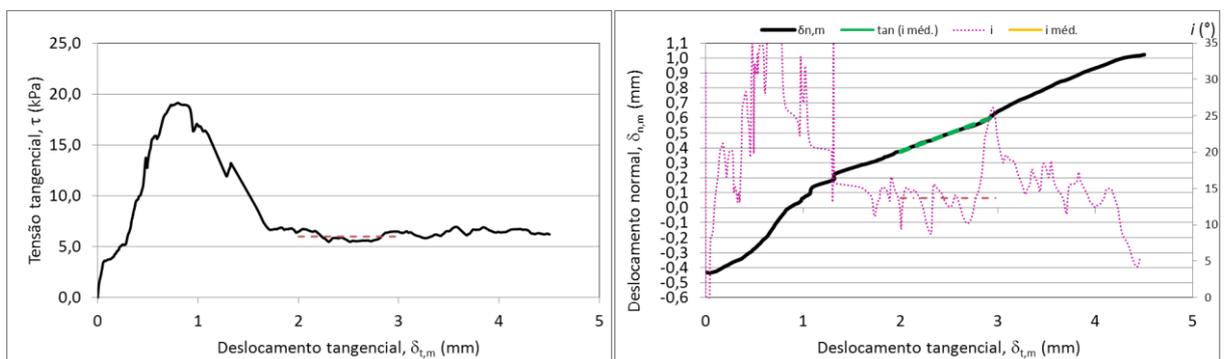


Fig. 144A – Gráficos do provete 394B

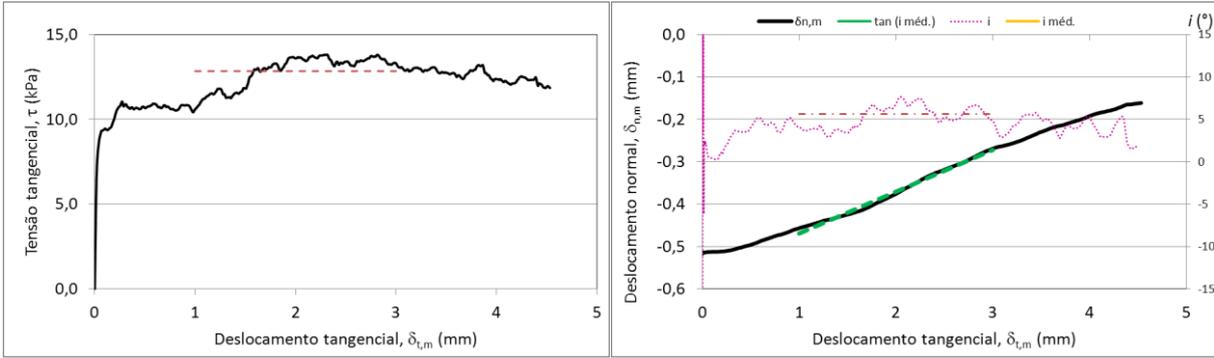


Fig. 145A – Gráficos do provete 395

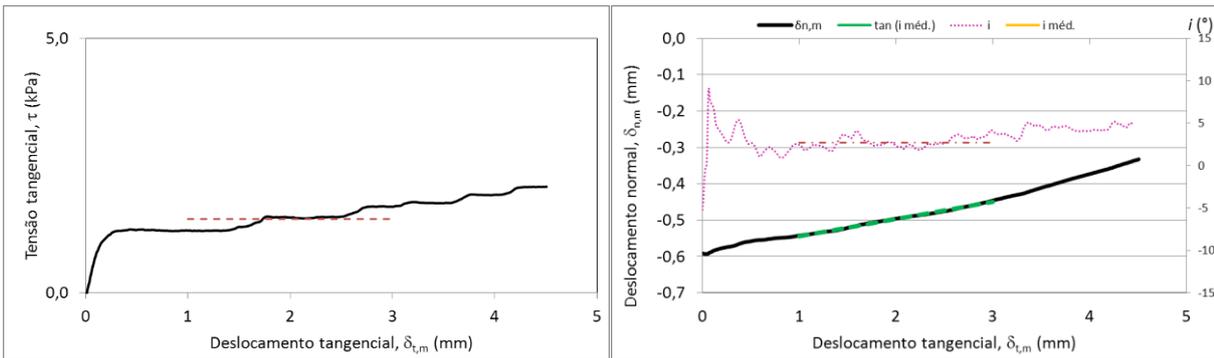


Fig. 146A – Gráficos do provete 573

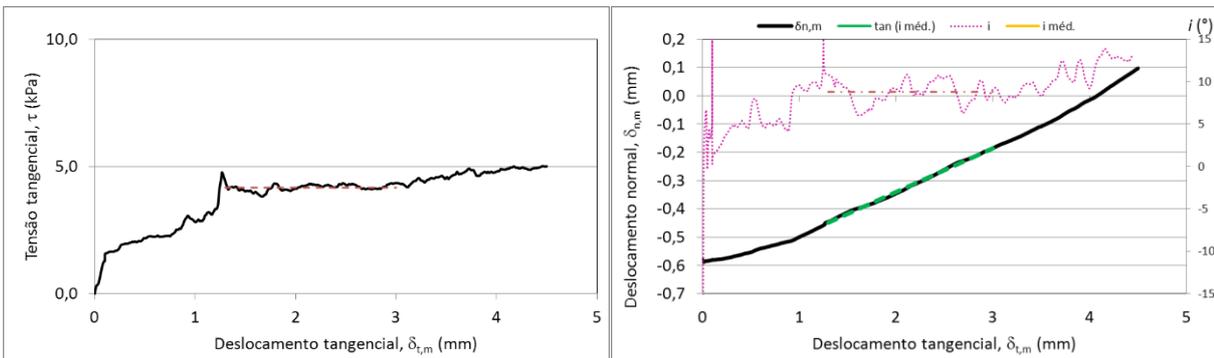


Fig. 147A – Gráficos do provete 574

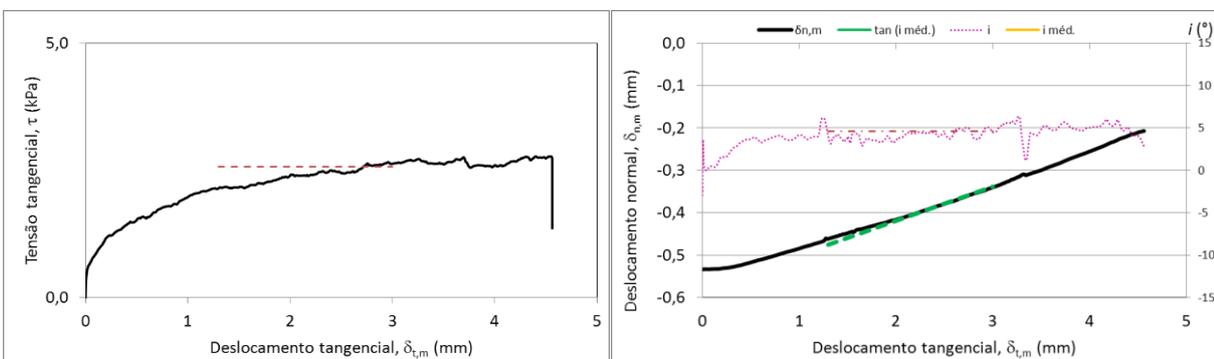


Fig. 148A – Gráficos do provete 575

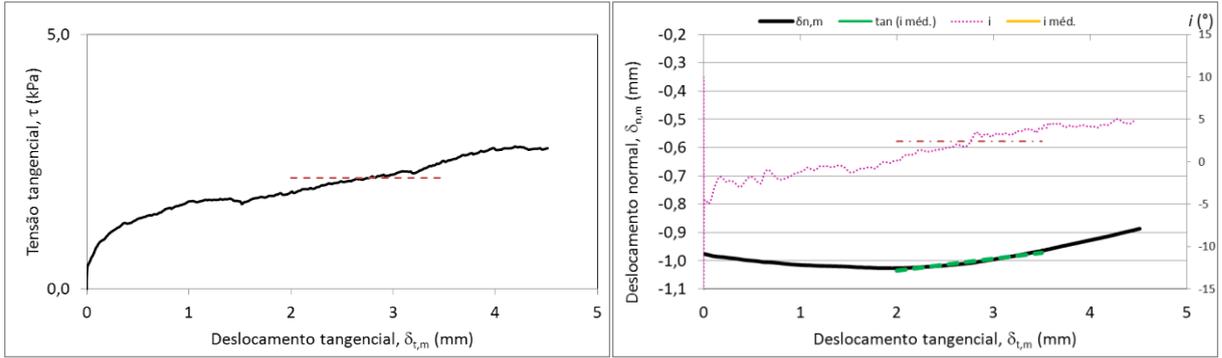


Fig. 149A – Gráficos do provete 576

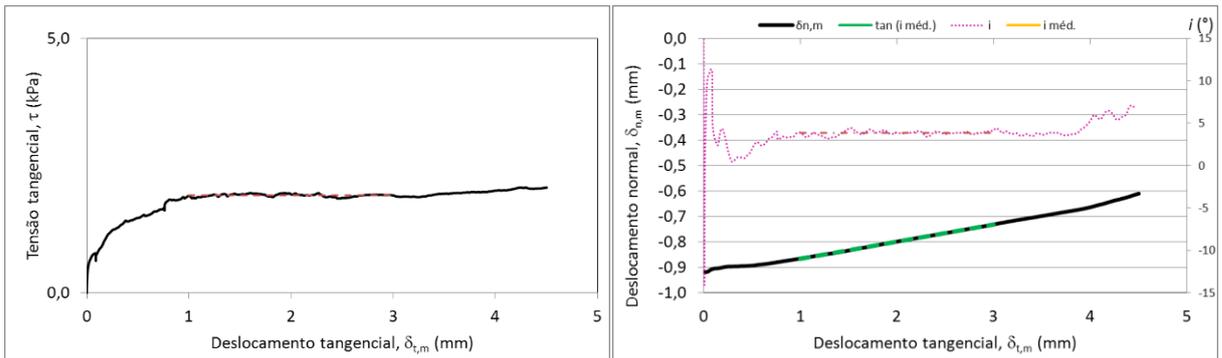


Fig. 150A – Gráficos do provete 577

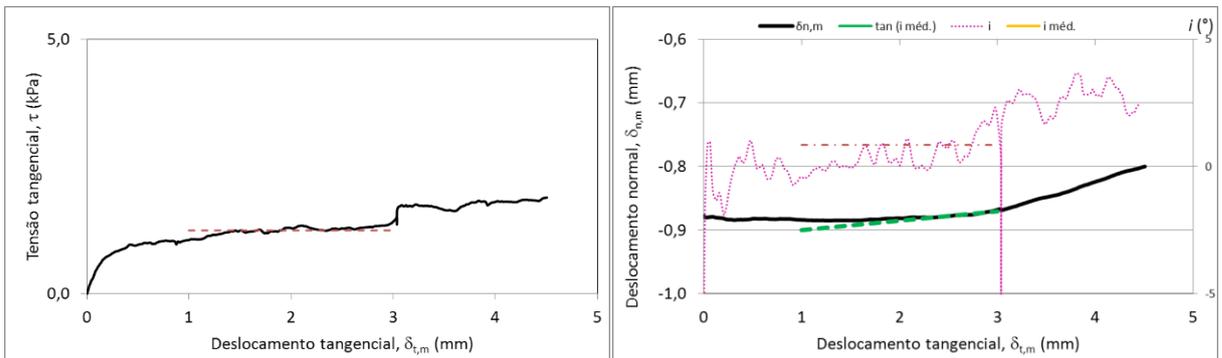


Fig. 151A – Gráficos do provete 578

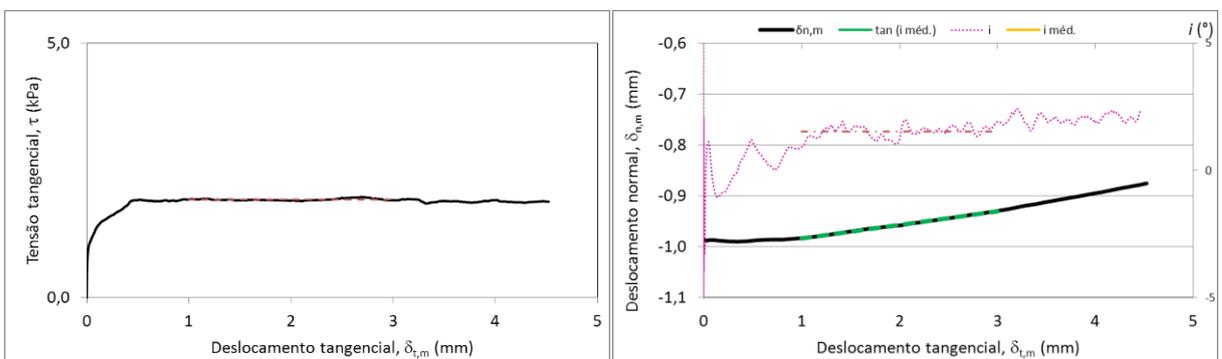


Fig. 152A – Gráficos do provete 579

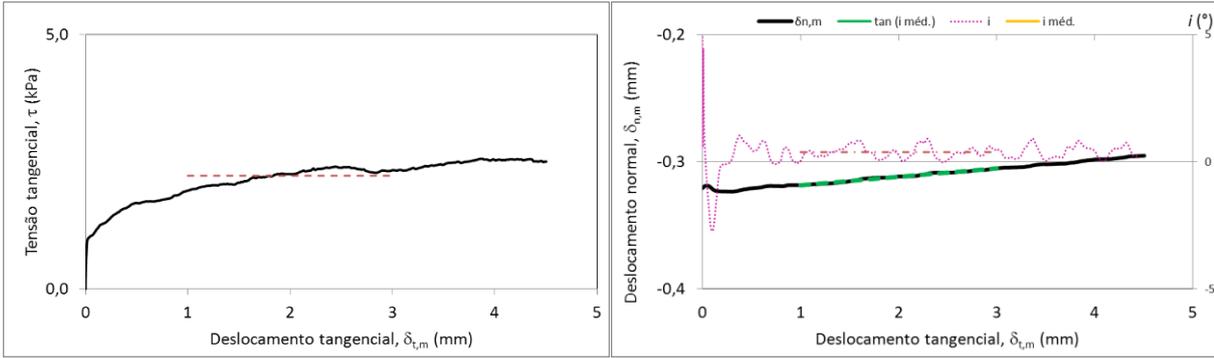


Fig. 153A – Gráficos do provete 580

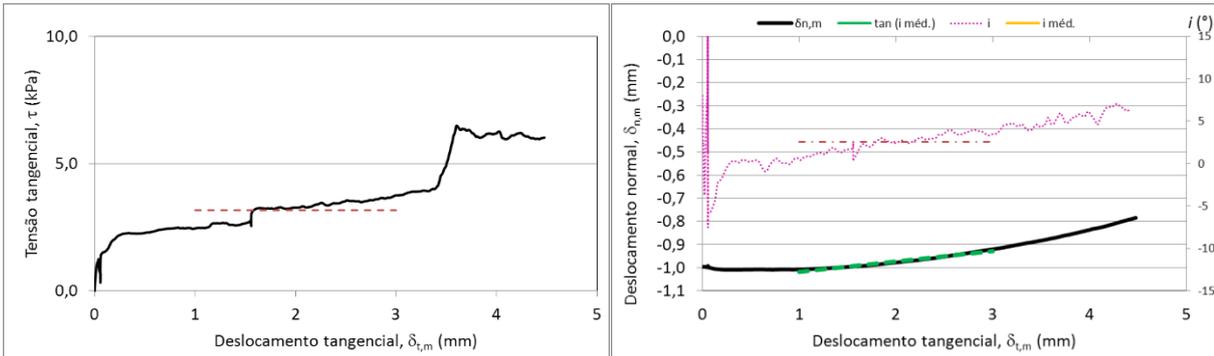


Fig. 154A – Gráficos do provete 581

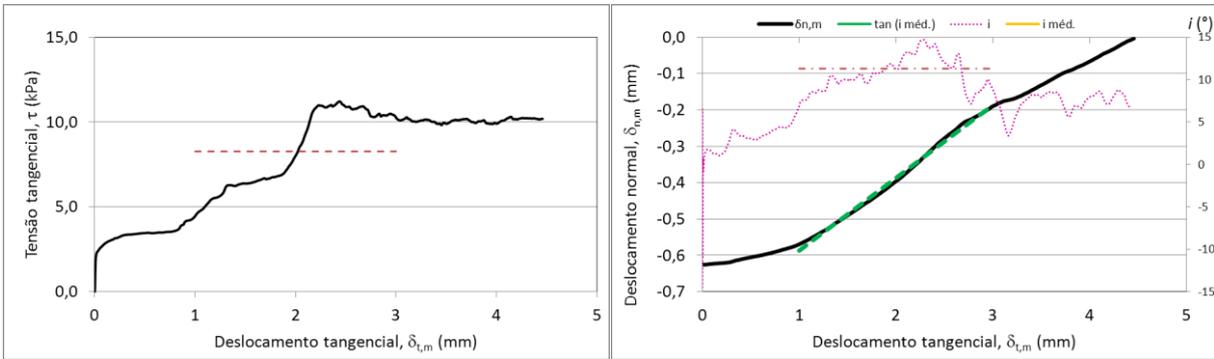


Fig. 155A – Gráficos do provete 582

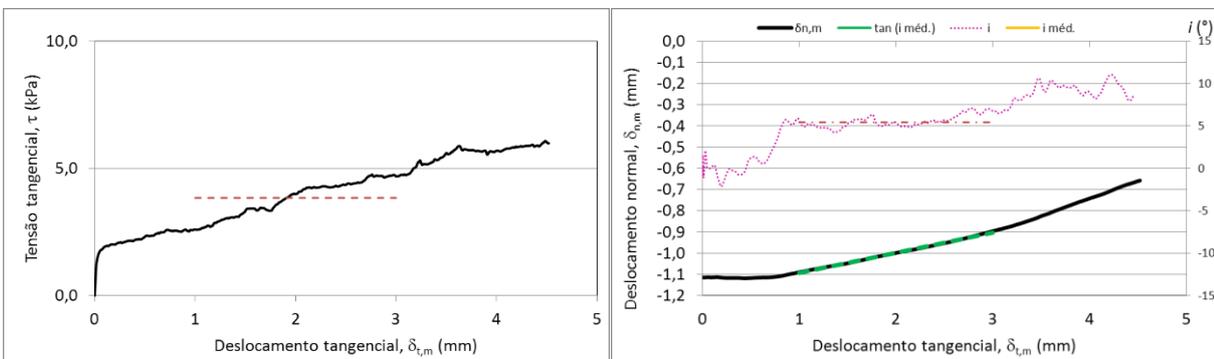


Fig. 156A – Gráficos do provete 583

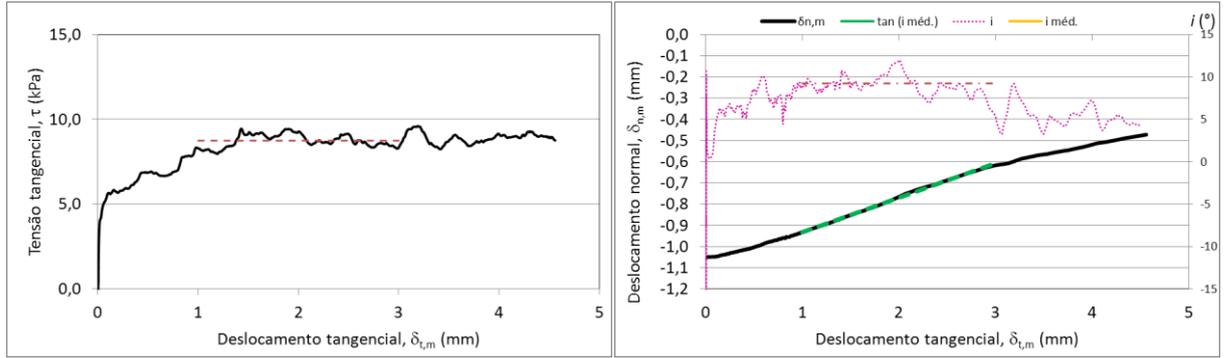


Fig. 157A – Gráficos do provete 584

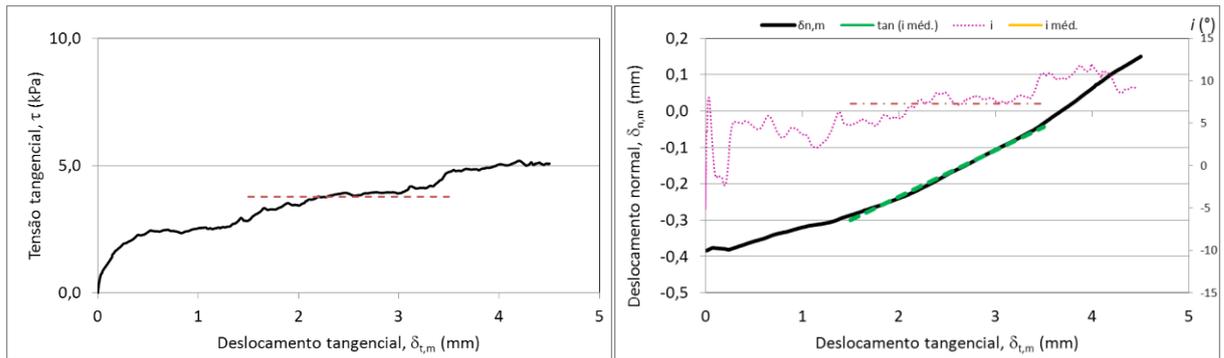


Fig. 158A – Gráficos do provete 585

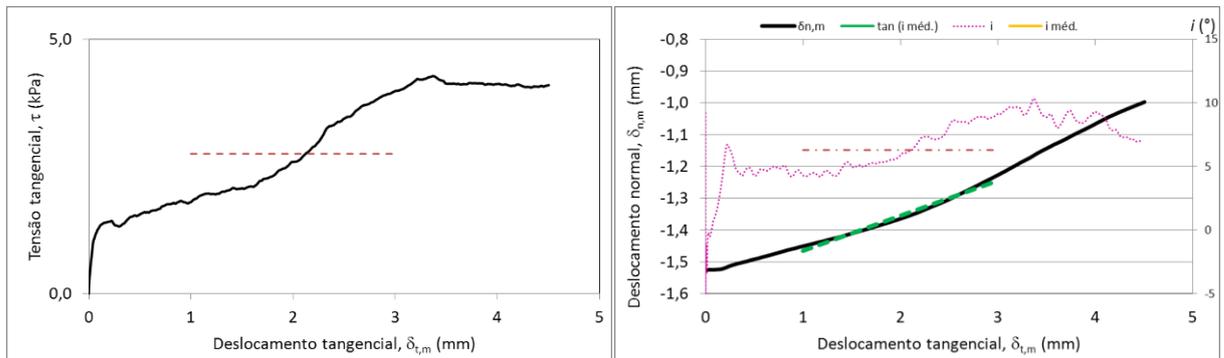


Fig. 159A – Gráficos do provete 586

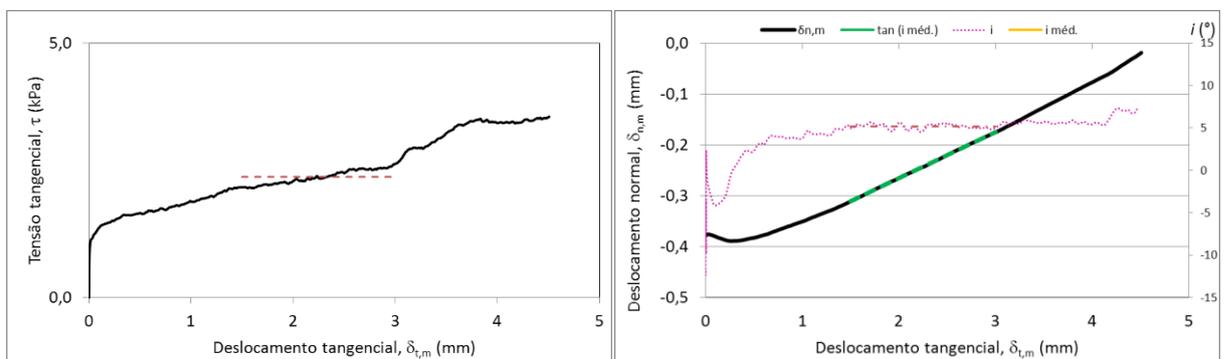


Fig. 160A – Gráficos do provete 587

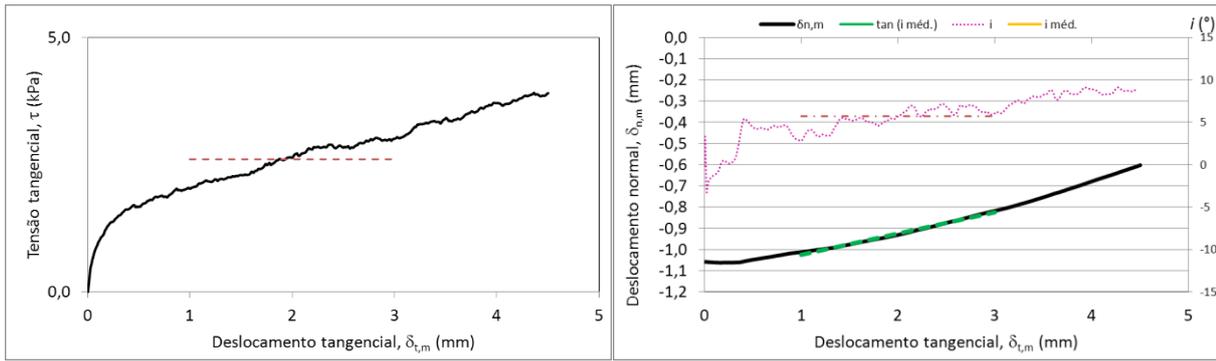


Fig. 161A – Gráficos do provete 588

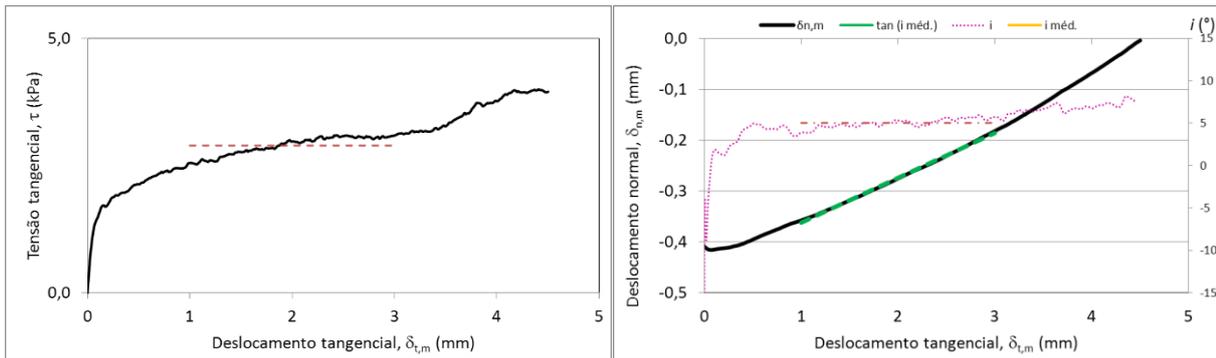


Fig. 162A – Gráficos do provete 589

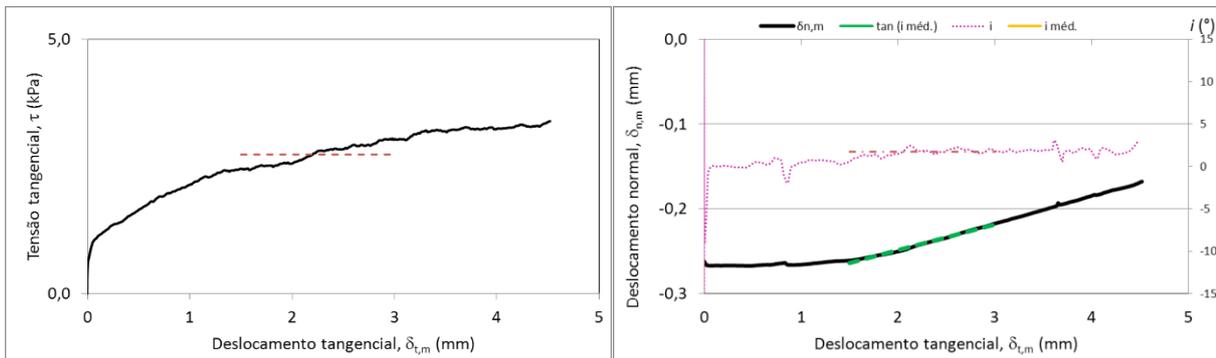


Fig. 163A – Gráficos do provete 590

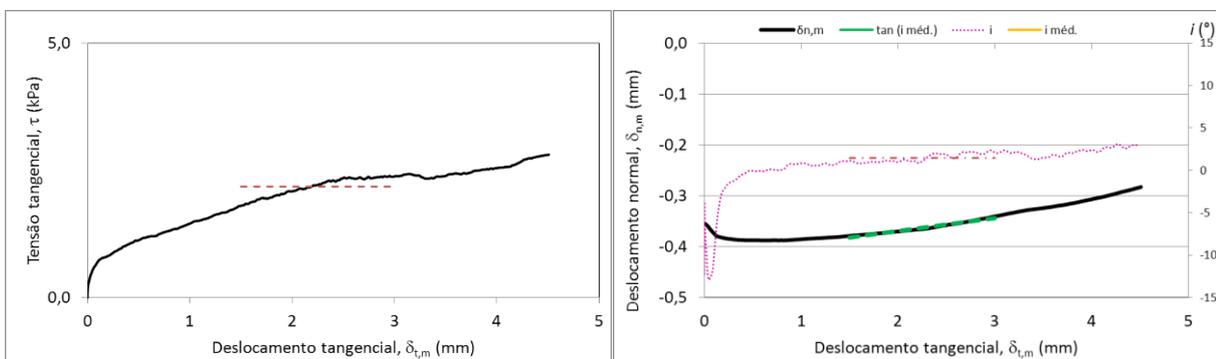


Fig. 164A – Gráficos do provete 591

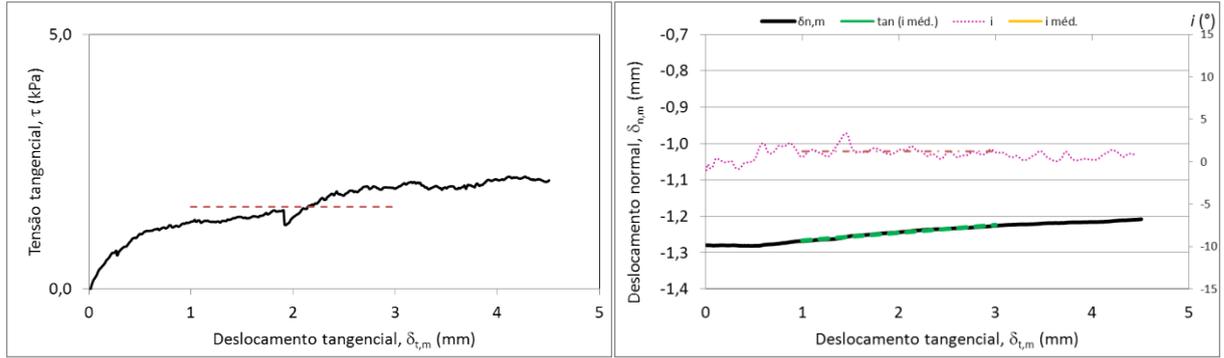


Fig. 165A – Gráficos do provete 592

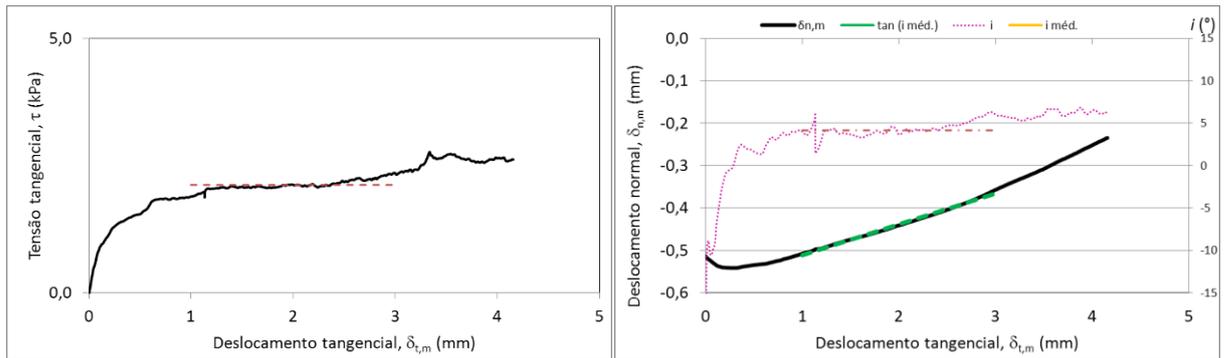


Fig. 166A – Gráficos do provete 593

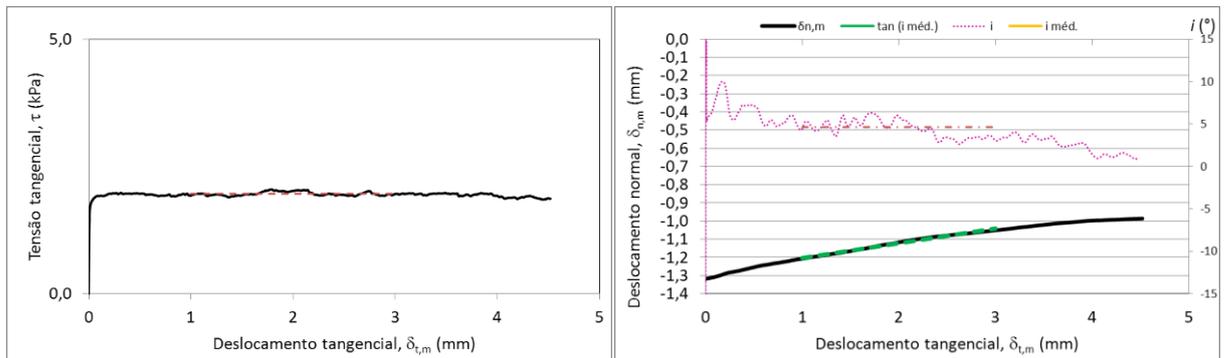


Fig. 167A – Gráficos do provete 594

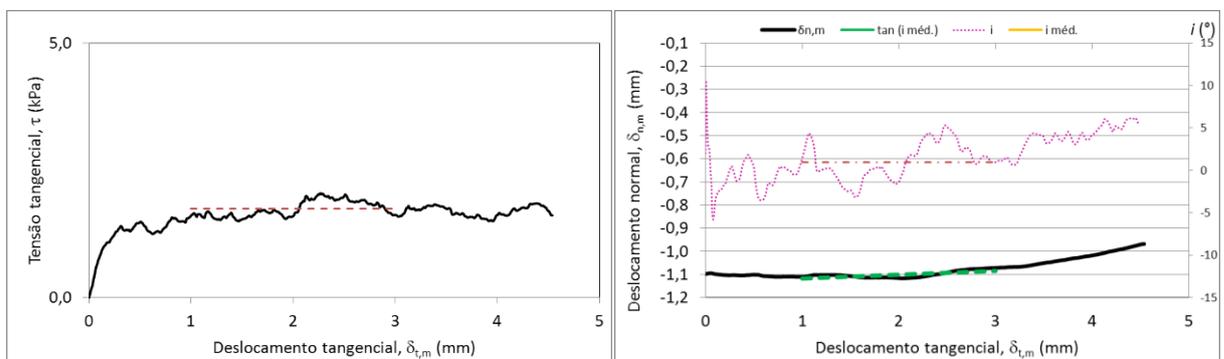


Fig. 168A – Gráficos do provete A

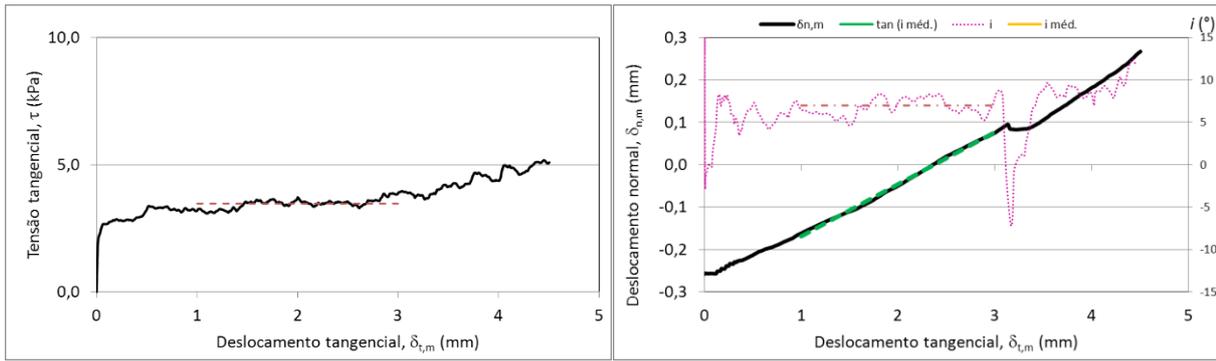


Fig. 169A – Gráficos do provete B

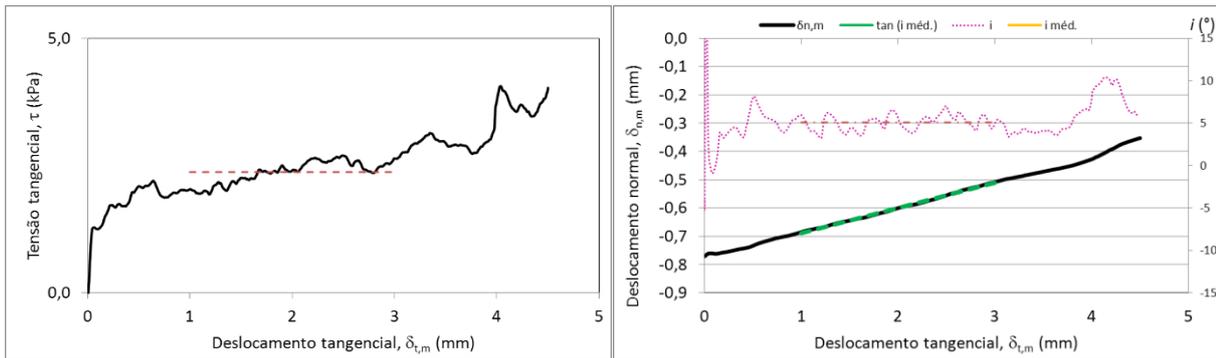


Fig. 170A – Gráficos do provete C

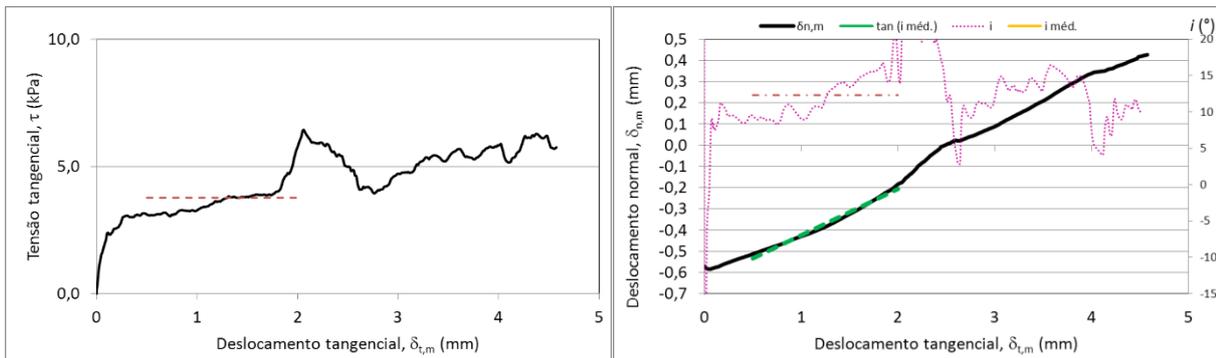


Fig. 171A – Gráficos do provete D

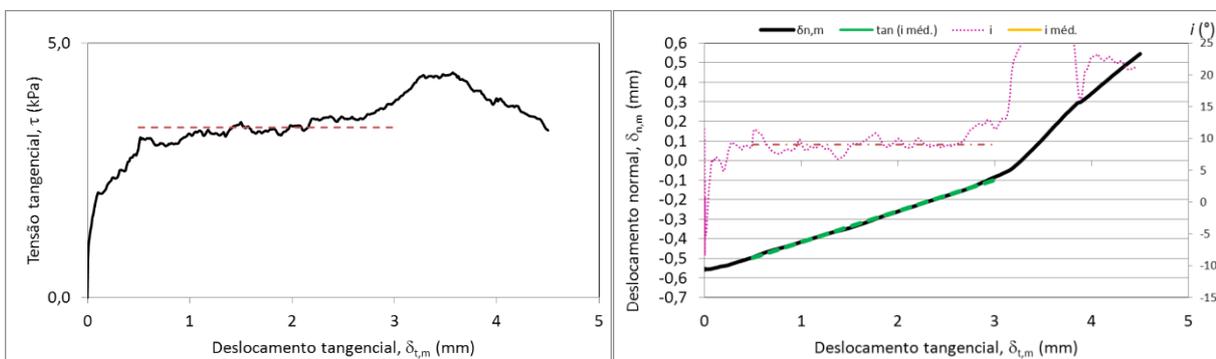


Fig. 172A – Gráficos do provete E

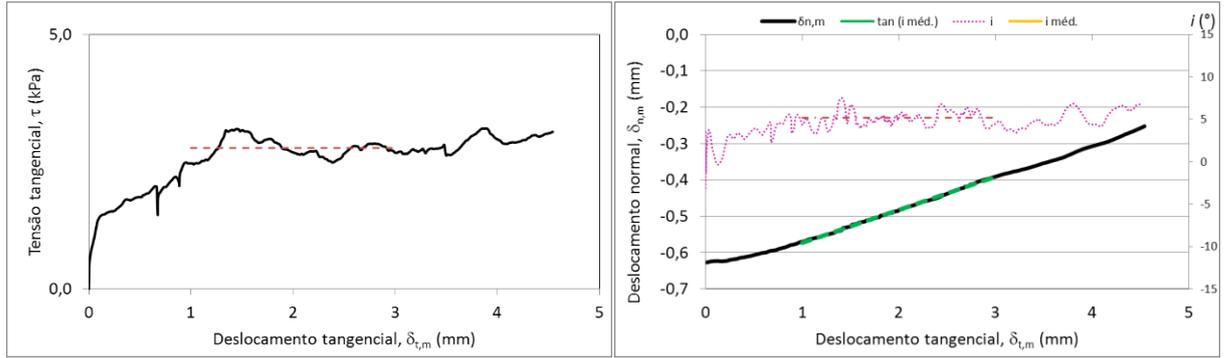


Fig. 173A – Gráficos do provete F

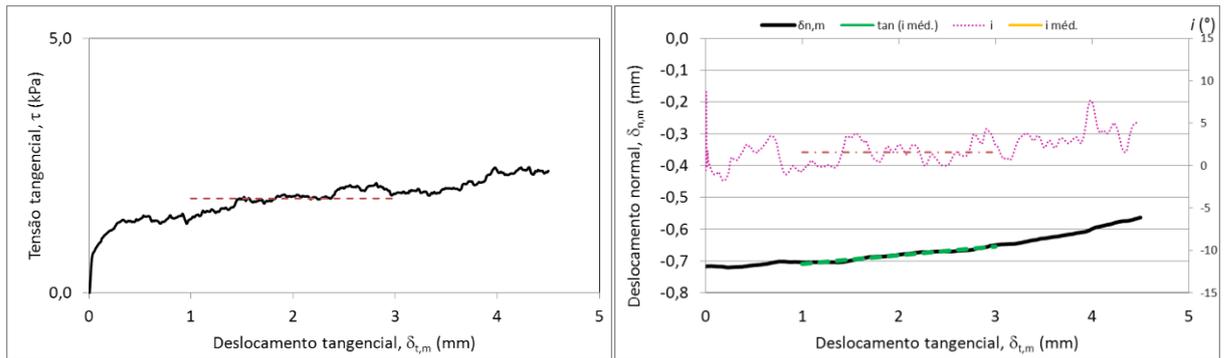


Fig. 174A – Gráficos do provete G

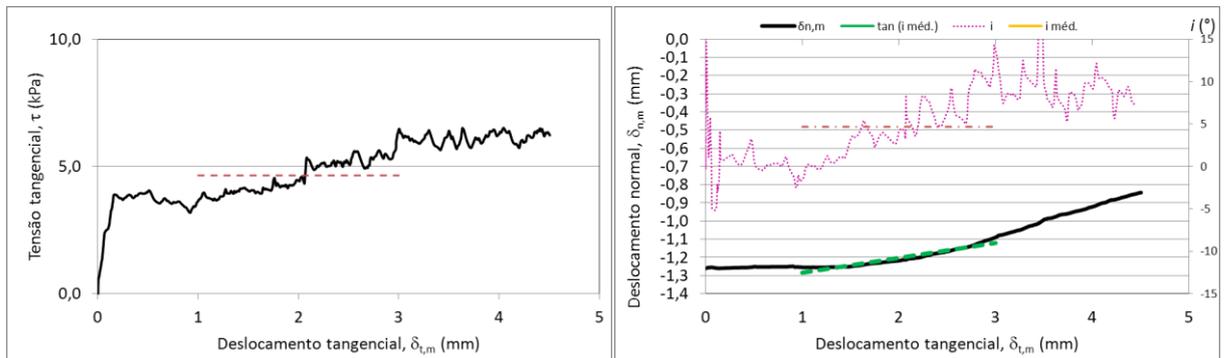


Fig. 175A – Gráficos do provete H

ANEXO B

Parâmetros estatísticos básicos dos ensaios

Tabela 14B – Parâmetros estatísticos básicos referentes ao ensaio *pull*

Proвете	Mínimo (kPa)	Média (kPa)	Máximo (kPa)	Mediana (kPa)	DP	CV (%)
127	30,96	34,91	42,19	34,81	3,15	9,03%
130	33,59	36,51	39,52	36,49	2,24	6,14%
131	31,50	33,16	35,83	32,93	1,27	3,82%
132	37,29	39,55	44,18	39,21	2,16	5,45%
133	33,72	36,49	43,48	36,31	2,64	7,24%
134	36,89	41,31	53,65	39,40	4,76	11,53%
135	34,00	38,56	42,08	39,07	2,14	5,56%
136	40,89	44,79	47,90	45,58	2,53	5,65%
137	33,29	34,61	36,27	35,02	1,15	3,32%
140	40,01	44,35	48,99	45,06	3,78	8,52%
141	33,17	36,19	39,36	36,33	1,81	5,00%
142	38,00	42,22	52,51	40,41	4,22	10,00%
143	36,31	39,32	45,41	38,99	2,59	6,59%
249	47,02	49,52	54,18	49,06	1,98	4,00%
253	36,75	38,85	41,32	38,41	1,45	3,72%
254	39,35	42,13	55,47	40,73	4,72	11,21%
255	47,63	50,56	53,24	50,93	1,54	3,04%
256	26,66	28,30	29,74	28,48	1,13	3,99%
301	35,51	40,08	46,41	40,49	2,96	7,38%
302	40,70	48,27	57,95	48,16	4,38	9,07%
303	45,61	48,07	57,74	46,98	3,39	7,04%
304	49,63	52,55	54,58	52,63	1,52	2,90%
305	70,30	72,56	75,17	72,32	1,58	2,18%
306	50,43	54,25	59,27	53,87	2,66	4,89%
307	39,42	41,95	45,81	42,14	1,89	4,51%
308	31,00	36,62	42,22	35,78	4,08	11,13%
309	38,34	41,71	47,66	39,81	3,48	8,34%
335	37,75	38,64	40,79	38,36	0,91	2,37%
336	32,27	34,18	37,52	34,17	1,76	5,16%

389	40,90	43,65	49,14	42,95	2,45	5,62%
390	40,98	43,80	47,43	43,86	1,78	4,06%
391	32,64	34,10	35,71	34,02	1,00	2,93%
392	78,09	86,46	102,68	83,52	7,38	8,54%
393	37,65	41,48	44,74	41,38	1,97	4,75%
394 A	37,66	40,32	45,22	39,45	2,47	6,12%
394 B	84,81	99,86	122,95	97,81	12,00	12,01%
395	28,85	31,31	35,72	30,59	2,21	7,07%
573	28,48	29,91	32,60	29,57	1,27	4,26%
574	39,18	43,91	49,32	44,09	3,46	7,88%
575	26,13	27,27	29,46	27,10	0,91	3,33%
576	31,79	32,36	33,35	32,21	0,52	1,60%
577	22,25	22,96	23,94	22,95	0,47	2,04%
578	19,29	20,82	25,98	20,22	1,85	8,88%
579	21,18	22,39	23,20	22,57	0,56	2,52%
580	19,95	21,12	22,53	20,94	0,91	4,29%
581	30,93	32,97	37,22	32,14	1,98	6,00%
582	32,32	35,31	40,79	34,44	2,67	7,55%
583	28,81	29,82	31,18	29,57	0,86	2,89%
584	39,71	44,70	50,23	45,21	3,09	6,92%
585	33,86	36,22	40,98	35,84	2,19	6,04%
586	30,53	32,02	34,76	31,94	1,15	3,59%
587	31,81	32,31	32,71	32,25	0,29	0,90%
588	31,52	32,63	34,19	32,75	0,74	2,28%
589	33,94	34,57	35,31	34,57	0,51	1,49%
590	22,86	23,83	25,23	24,04	0,77	3,24%
591	22,83	24,43	25,12	24,49	0,59	2,40%
592	27,22	28,94	30,69	29,25	1,07	3,69%
593	25,70	26,81	29,72	26,49	1,13	4,23%
594	23,05	24,02	25,79	23,88	0,85	3,52%
A	35,12	37,93	42,22	38,04	2,08	5,49%
B	40,81	46,92	59,47	45,90	5,26	11,22%
C	33,11	35,68	38,83	35,48	1,56	4,36%
D	45,92	48,46	50,22	48,67	1,38	2,85%
E	33,77	36,62	43,49	34,89	3,17	8,67%
F	34,13	35,34	36,36	35,37	0,77	2,17%
G	38,58	41,56	45,22	41,98	1,63	3,93%
H	40,30	41,71	48,67	40,86	2,51	6,01%

Tabela 15B - Parâmetros estatísticos básicos referentes ao ensaio *tilt* nas superfícies naturais das diaclases

Provete	Mínimo (°)	Média (°)	Máximo (°)	Mediana (°)	DP	CV (%)
127	37,5	38,2	39,0	38,0	0,40	1,06%
130	39,5	41,5	43,0	42,0	1,04	2,49%
131	39,0	41,0	42,5	41,0	0,99	2,40%
132	39,0	40,5	41,0	40,5	0,61	1,51%
133	42,0	43,6	45,0	43,5	0,94	2,17%
134	34,0	35,8	38,0	35,5	1,21	3,38%
135	34,5	35,3	36,0	35,5	0,56	1,59%
136	45,0	46,5	48,0	47,0	0,97	2,10%
137	36,5	38,7	40,5	39,0	1,42	3,67%
140	37,0	38,0	39,0	38,0	0,61	1,60%
141	41,0	43,1	45,0	43,5	1,26	2,93%
142	40,0	40,6	41,5	40,5	0,44	1,08%
143	36,0	39,0	40,5	39,0	1,15	2,95%
249	33,0	34,9	37,0	35,0	1,21	3,46%
253	31,5	32,8	34,0	32,5	0,82	2,49%
254	28,0	29,6	31,0	29,5	1,02	3,45%
255	39,0	40,8	43,0	41,0	1,13	2,76%
256	32,0	34,2	36,0	34,0	1,37	3,99%
301	38,0	41,0	42,5	41,5	1,32	3,23%
302	43,0	43,8	44,5	44,0	0,52	1,18%
303	37,5	39,0	41,5	38,5	1,11	2,83%
304	35,5	36,4	38,0	36,0	0,70	1,92%
305	24,0	24,7	25,5	25,0	0,47	1,89%
306	43,0	46,9	49,0	48,5	2,69	5,75%
307	42,5	44,7	46,5	45,0	1,08	2,42%
308	34,0	35,0	36,5	35,0	0,85	2,43%
309	38,0	38,7	39,0	38,5	0,34	0,87%
335	32,0	33,0	33,5	33,0	0,50	1,52%
336	30,5	31,1	31,5	31,0	0,32	1,04%
389	42,0	42,5	43,5	42,5	0,50	1,18%
390	38,0	39,8	42,5	40,0	1,33	3,34%
391	36,0	38,8	40,0	39,0	1,35	3,48%
392	40,0	42,7	45,5	42,5	1,27	2,98%
393	19,5	20,4	21,0	20,5	0,50	2,48%
394 A	32,5	35,8	38,0	36,0	1,68	4,69%
394 B	35,0	46,9	49,5	48,0	4,04	8,62%
395	38,0	38,8	40,0	38,5	0,79	2,03%
573	32,0	33,4	35,0	33,5	0,86	2,58%
574	41,0	41,7	43,5	41,5	0,75	1,81%
575	34,0	34,7	35,0	35,0	0,46	1,33%

576	30,0	30,9	31,5	31,0	0,50	1,63%
577	32,0	33,2	34,0	33,5	0,56	1,69%
578	30,5	31,3	32,0	31,5	0,41	1,31%
579	30,0	31,5	33,0	31,5	0,77	2,46%
580	30,0	31,0	32,0	31,0	0,65	2,10%
581	40,0	40,8	41,5	40,5	0,60	1,48%
582	37,0	38,0	39,0	38,0	0,57	1,50%
583	39,0	39,5	40,0	39,5	0,39	0,98%
584	38,0	38,9	39,5	39,0	0,39	1,01%
585	38,0	38,7	39,5	38,5	0,41	1,06%
586	41,0	42,5	44,0	42,5	0,76	1,78%
587	31,5	35,1	36,0	35,5	1,25	3,55%
588	36,0	37,1	38,0	37,0	0,70	1,89%
589	36,0	36,7	37,5	36,5	0,40	1,10%
590	32,0	33,0	35,0	33,0	0,91	2,74%
591	32,0	33,0	34,0	33,0	0,65	1,97%
592	36,5	37,2	38,0	37,0	0,40	1,09%
593	33,5	33,9	35,0	34,0	0,45	1,34%
594	32,0	32,6	33,0	32,5	0,38	1,15%
A	34,5	38,5	44,5	39,5	3,12	8,11%
B	40,0	42,7	46,0	42,5	1,79	4,20%
C	33,0	37,6	40,0	38,0	2,06	5,48%
D	35,0	35,8	36,5	36,0	0,56	1,56%
E	36,5	37,8	40,0	37,5	1,03	2,73%
F	41,0	41,3	41,5	41,5	0,26	0,63%
G	39,0	40,6	42,0	41,0	0,94	2,33%
H	38,5	40,8	44,0	40,0	1,90	4,66%

Tabela 16B - Parâmetros estatísticos básicos referentes ao ensaio *tilt* das superfícies serradas

Provete	Mínimo (°)	Média (°)	Máximo (°)	Mediana (°)	DP	CV (%)
127	27,0	31,5	33,5	32,0	1,99	6,31%
130	28,5	30,8	32,0	31,0	1,46	4,73%
131	29,0	30,2	31,5	30,0	0,81	2,70%
132	29,5	32,0	34,0	32,0	1,43	4,47%
133	29,0	30,0	32,0	29,5	1,01	3,37%
134	24,5	26,5	28,5	26,5	1,23	4,66%
135	29,0	30,8	32,5	31,0	1,08	3,50%
136	25,5	26,5	28,0	26,5	0,65	2,46%
137	25,0	26,8	30,0	26,5	1,49	5,56%
140	30,0	32,5	34,0	33,0	1,43	4,41%
141	26,5	28,0	29,0	28,0	0,76	2,70%
142	29,5	32,4	34,5	33,0	1,94	5,99%

143	22,0	26,3	29,0	26,5	2,17	8,25%
249	25,0	28,9	30,5	29,5	1,53	5,32%
253	31,0	32,9	34,0	33,0	0,87	2,64%
254	26,0	29,0	30,5	29,0	1,30	4,50%
255	30,0	32,2	34,0	32,0	1,74	5,39%
256	25,5	28,7	30,5	29,0	1,66	5,79%
301	29,0	29,5	30,5	29,5	0,50	1,69%
302	24,5	26,1	28,0	26,5	1,12	4,29%
303	28,5	30,1	31,5	30,0	0,83	2,76%
304	28,5	29,8	31,5	29,5	0,98	3,30%
305	27,5	30,1	31,5	30,0	1,19	3,93%
306	20,5	22,4	23,0	22,5	0,74	3,33%
307	23,5	24,1	25,0	24,0	0,49	2,04%
308	32,0	34,8	37,5	35,0	1,60	4,61%
309	25,5	26,1	27,0	26,0	0,49	1,88%
335	20,0	22,3	23,5	22,5	1,01	4,51%
336	27,5	28,5	30,0	28,5	0,76	2,65%
389	18,5	19,9	23,0	19,5	1,32	6,63%
390	25,5	26,3	27,5	26,0	0,64	2,44%
391	27,5	29,2	40,0	28,0	3,60	12,32%
392	28,0	30,6	32,0	31,0	1,12	3,66%
393	29,0	31,7	34,0	32,0	1,85	5,83%
394 A	30,5	32,3	33,5	32,0	0,90	2,79%
394 B	30,0	31,2	32,5	31,5	0,68	2,19%
395	29,5	30,8	31,5	31,0	0,72	2,34%
573	25,5	26,1	27,0	26,0	0,38	1,44%
574	21,5	22,5	23,5	22,0	0,79	3,51%
575	27,0	27,8	29,0	28,0	0,65	2,33%
576	29,5	30,0	30,5	30,0	0,27	0,90%
577	25,5	26,7	28,0	26,5	0,98	3,68%
578	27,0	27,6	28,5	27,5	0,49	1,78%
579	25,5	26,4	28,0	26,0	0,89	3,37%
580	27,0	27,8	29,5	27,5	0,75	2,70%
581	25,5	26,3	27,5	26,0	0,52	1,97%
582	25,5	27,9	31,0	27,5	1,73	6,20%
583	25,0	26,9	28,0	27,0	1,02	3,79%
584	23,5	24,3	25,5	24,0	0,65	2,66%
585	27,0	27,8	29,0	28,0	0,60	2,17%
586	26,0	29,6	36,5	29,5	3,28	11,10%
587	24,0	25,4	26,0	25,5	0,63	2,46%
588	22,0	23,0	24,0	23,0	0,79	3,44%
589	25,5	26,6	29,0	26,5	0,94	3,55%
590	25,0	26,0	27,0	26,0	0,77	2,98%

591	29,0	29,6	30,5	29,5	0,49	1,66%
592	24,5	26,3	30,0	25,5	1,81	6,88%
593	24,5	25,7	27,0	25,5	0,87	3,40%
594	23,5	28,0	32,0	27,5	2,36	8,42%
A	30,0	30,6	31,5	30,5	0,45	1,48%
B	30,5	32,5	35,0	32,0	1,60	4,91%
C	32,5	33,6	34,5	34,0	0,70	2,09%
D	26,5	28,7	31,0	28,0	1,72	6,00%
E	26,5	28,8	31,5	28,0	1,51	5,23%
F	30,0	31,2	32,5	31,5	0,79	2,52%
G	21,0	23,6	25,5	24,0	1,77	7,51%
H	24,5	25,8	28,5	25,0	1,49	5,76%

ANEXO C

Gráficos do modelo de Barton

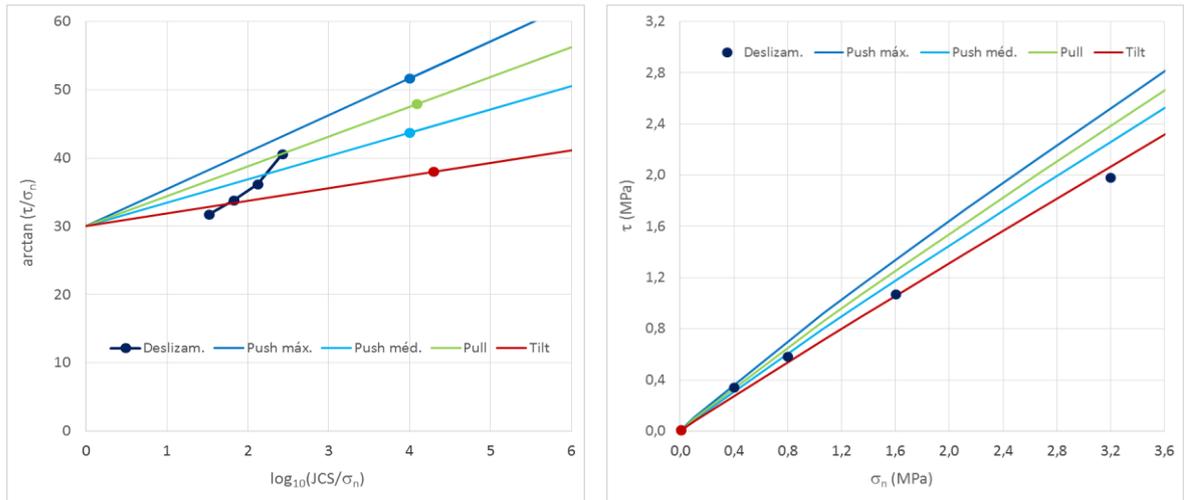


Fig. 1C – Gráficos do provete 127

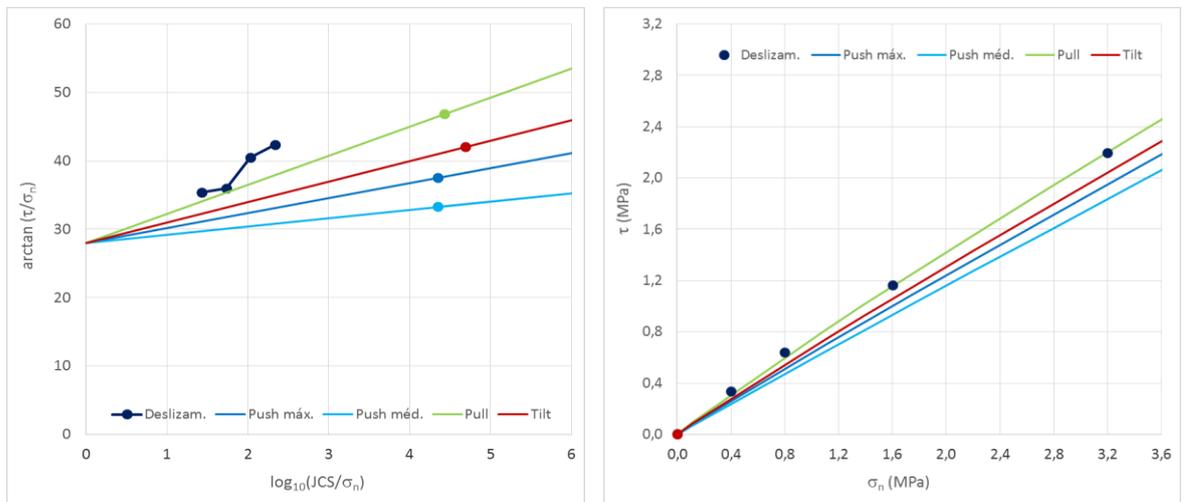


Fig. 2C – Gráficos do provete 130

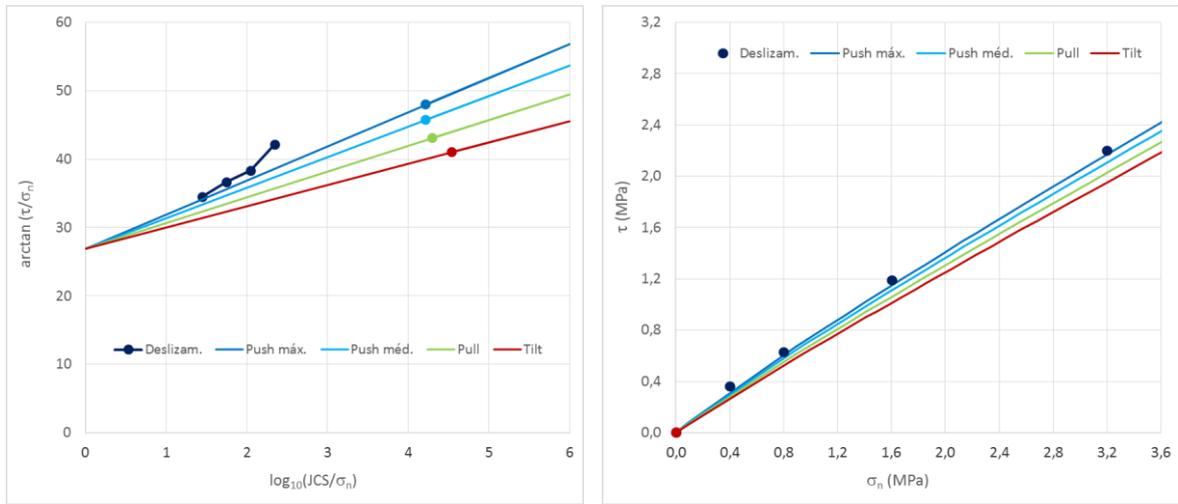


Fig. 3C – Gráficos do provete 131

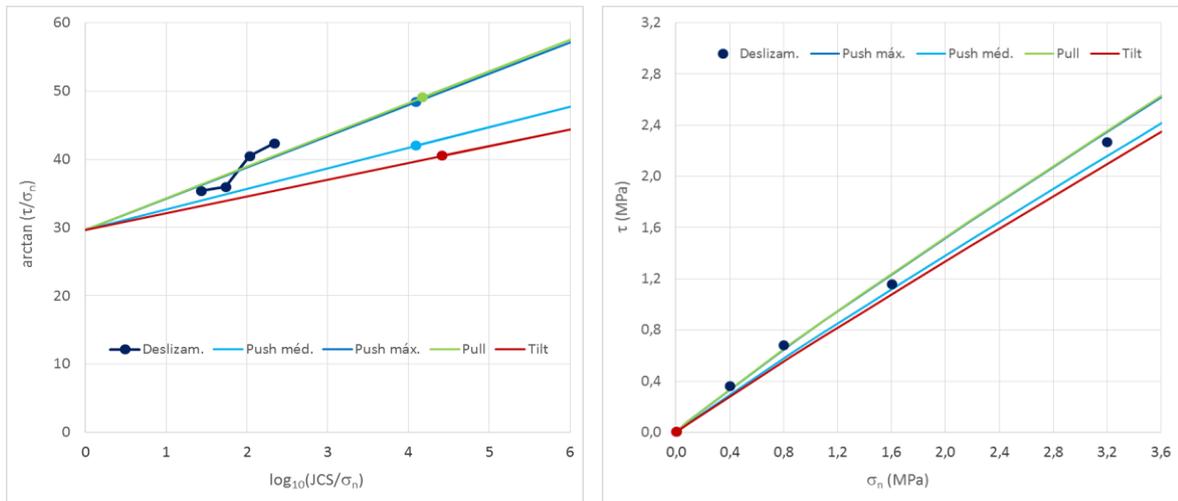


Fig. 4C – Gráficos do provete 132

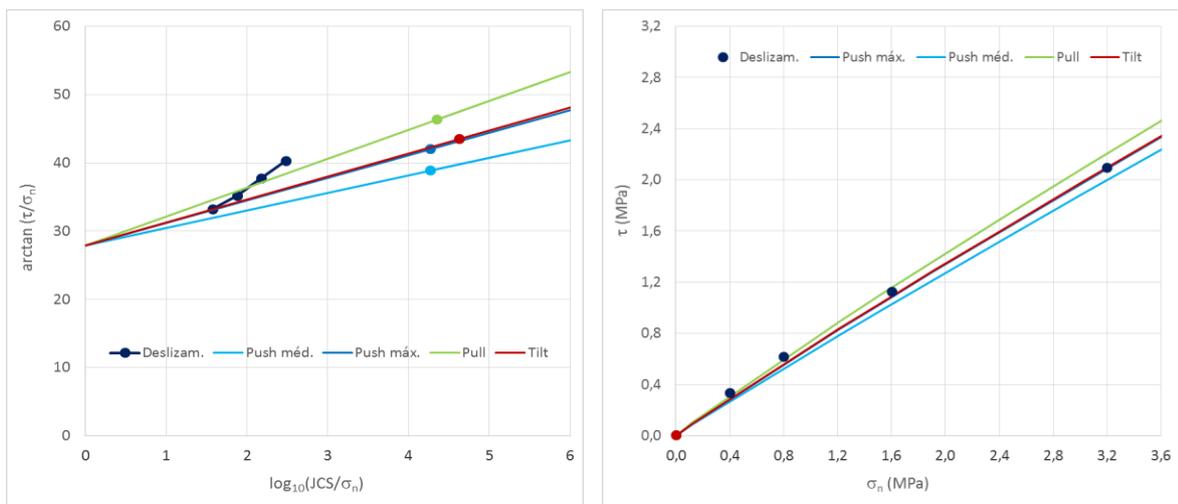


Fig. 5C – Gráficos do provete 133

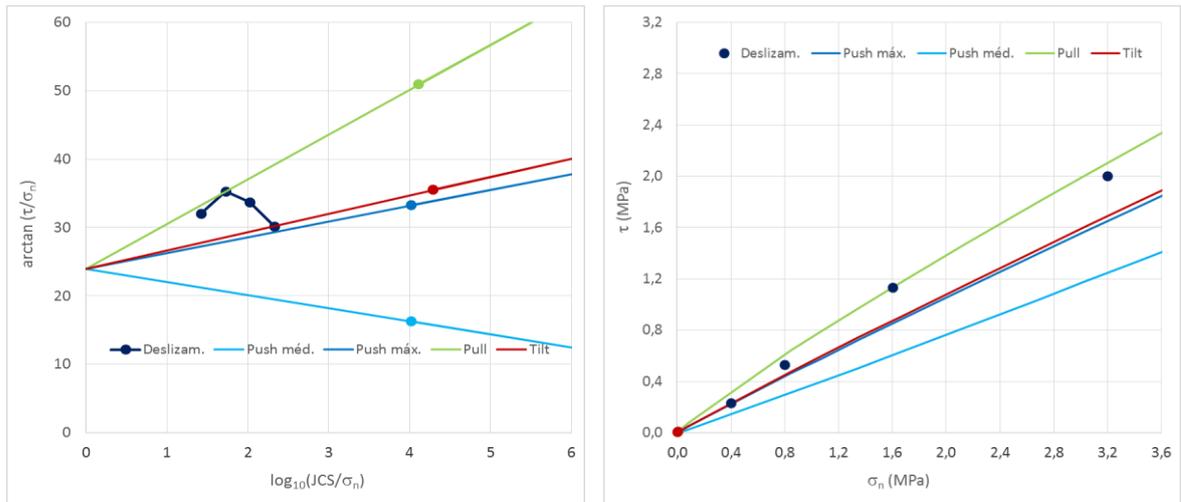


Fig. 6C – Gráficos do provete 134

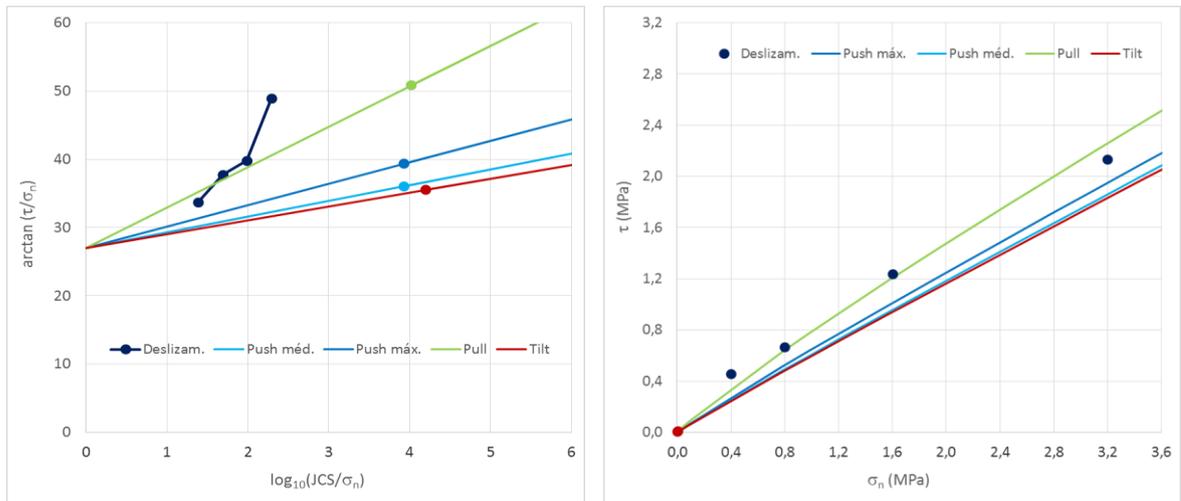


Fig. 7C – Gráficos do provete 135

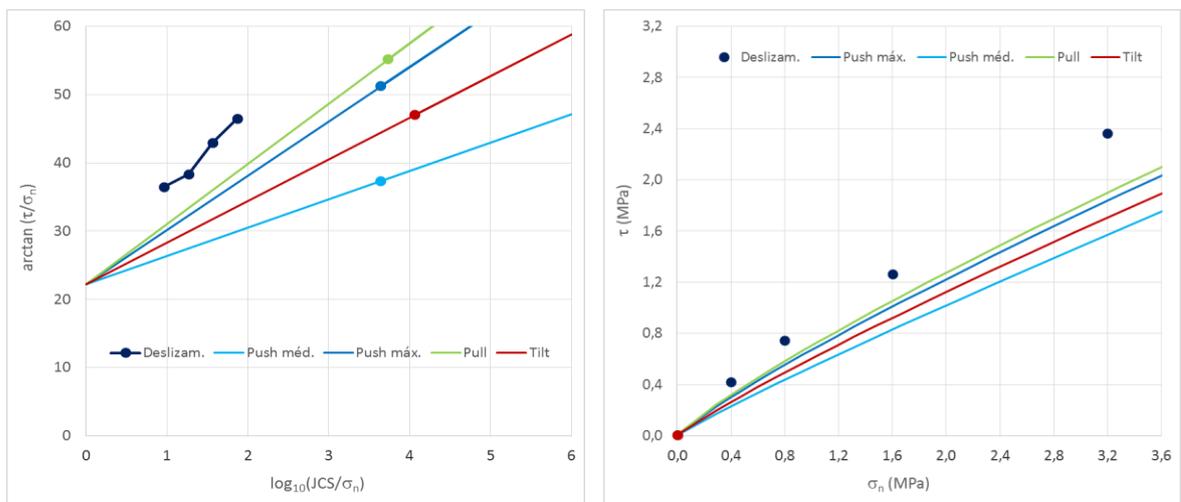


Fig. 8C – Gráficos do provete 136

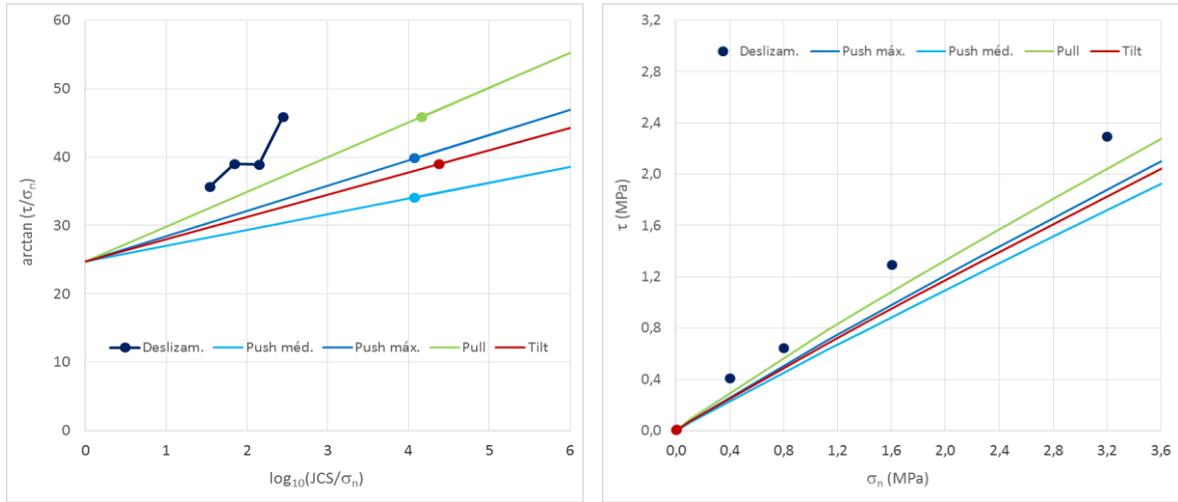


Fig. 9C – Gráficos do provete 137

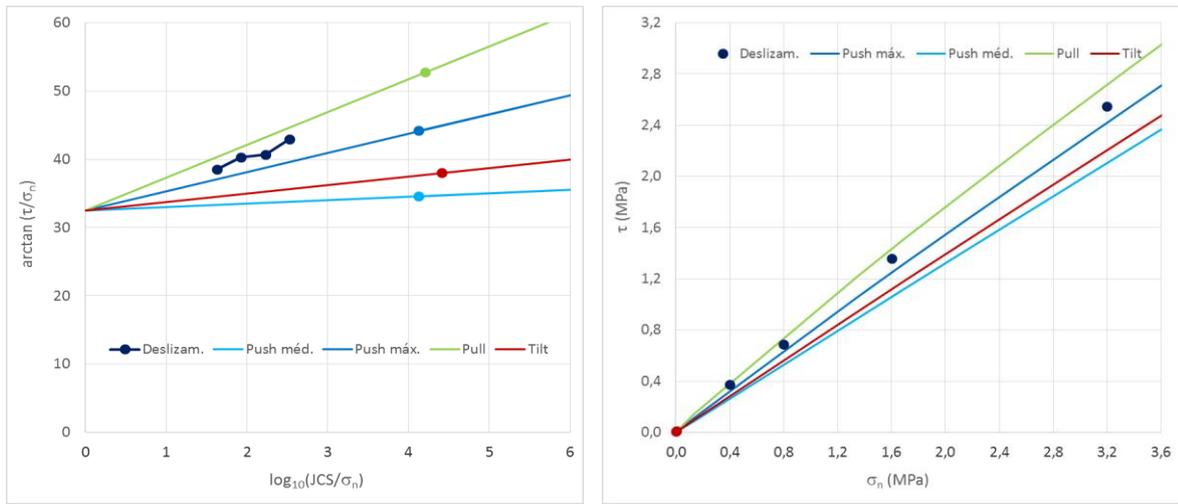


Fig. 10C – Gráficos do provete 140

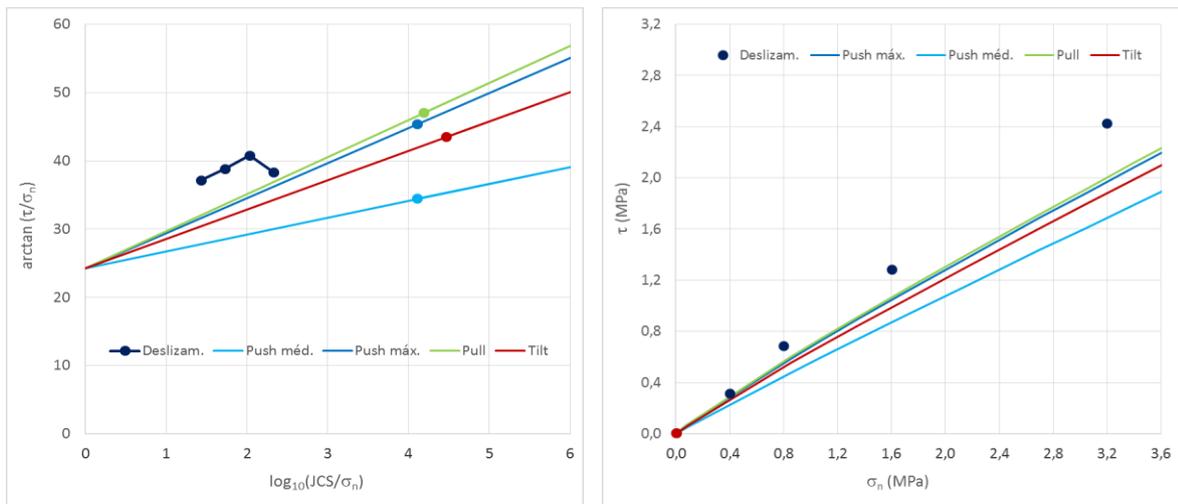
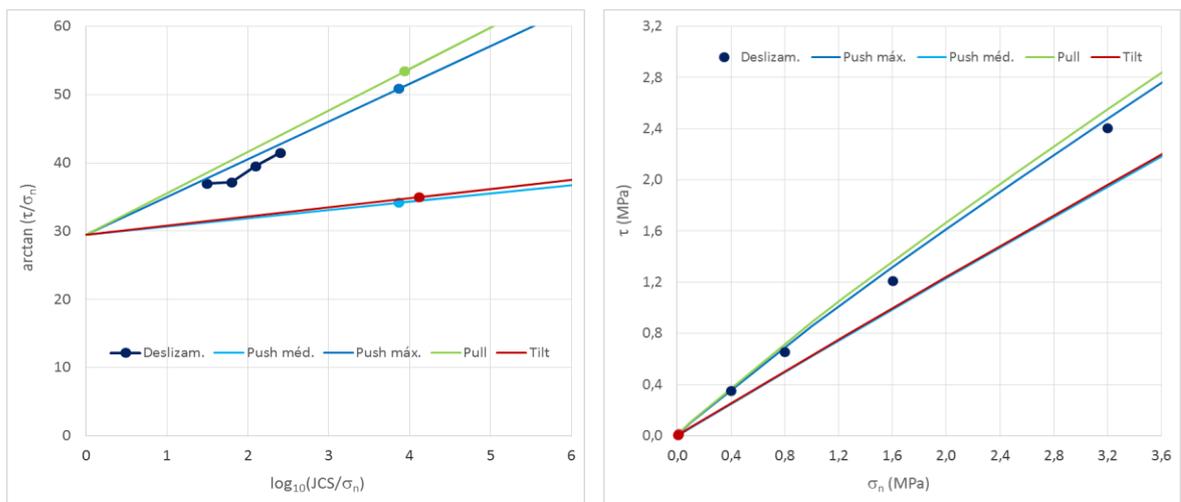
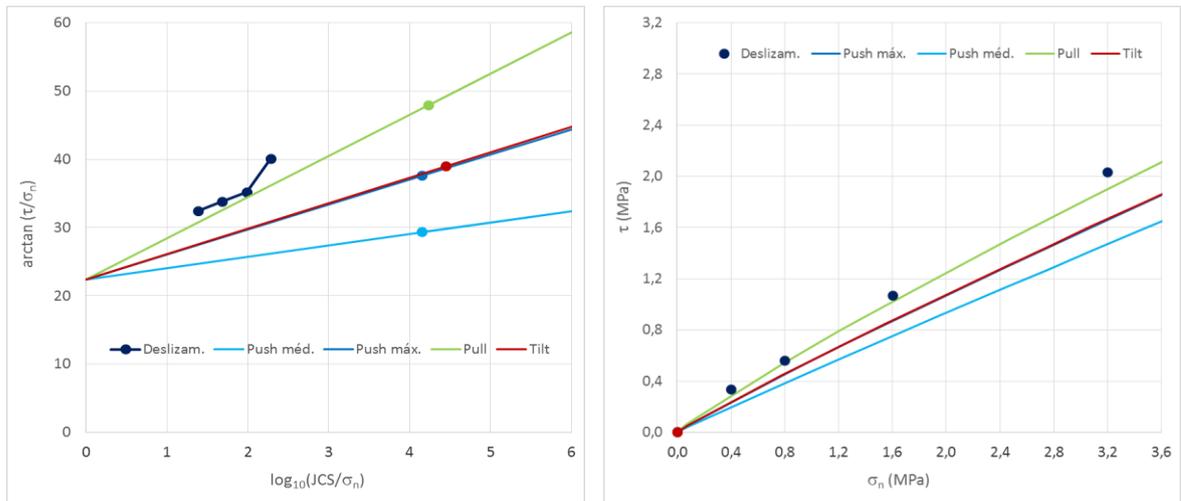
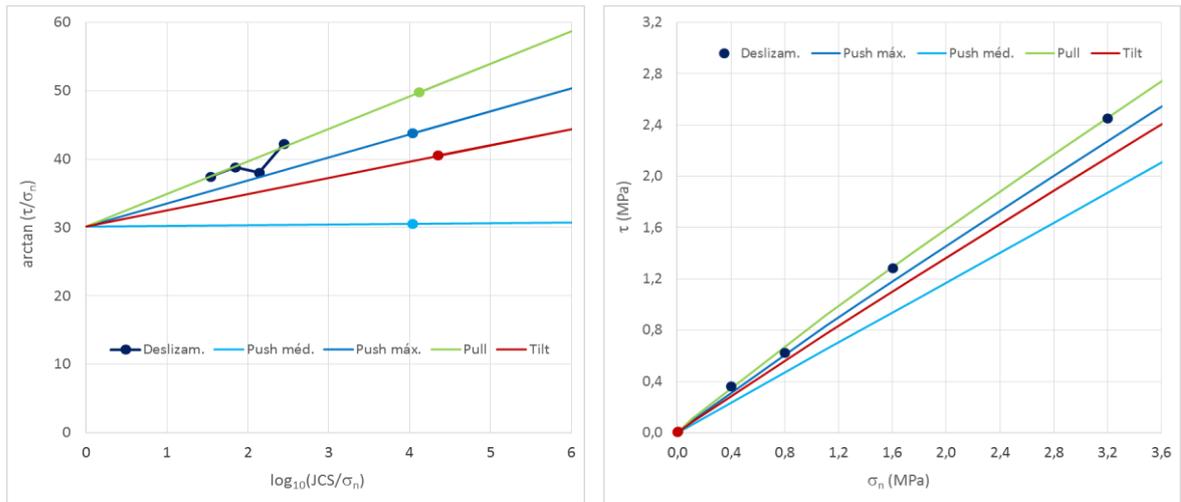


Fig. 11C – Gráficos do provete 141



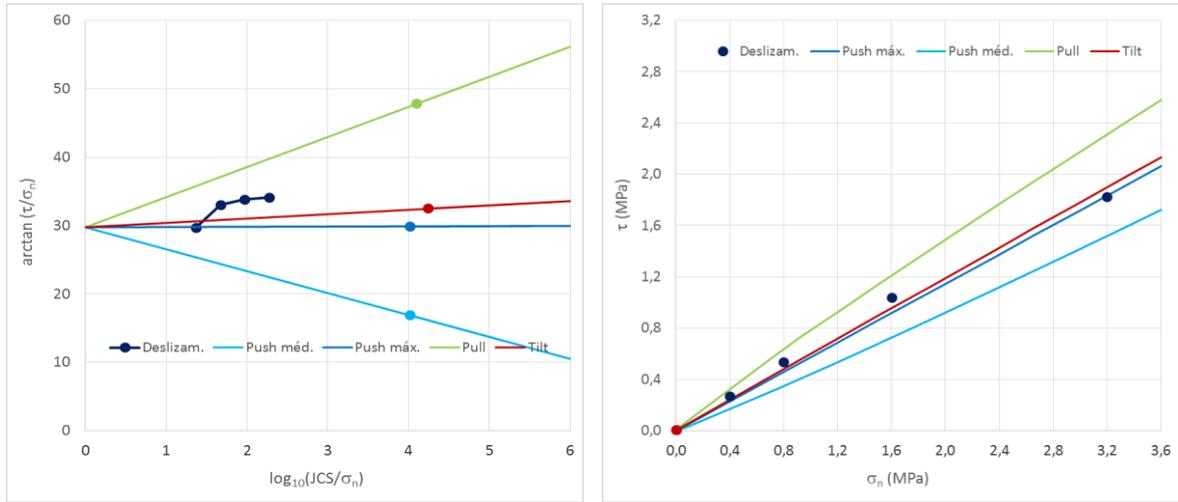


Fig. 15C – Gráficos do provete 253

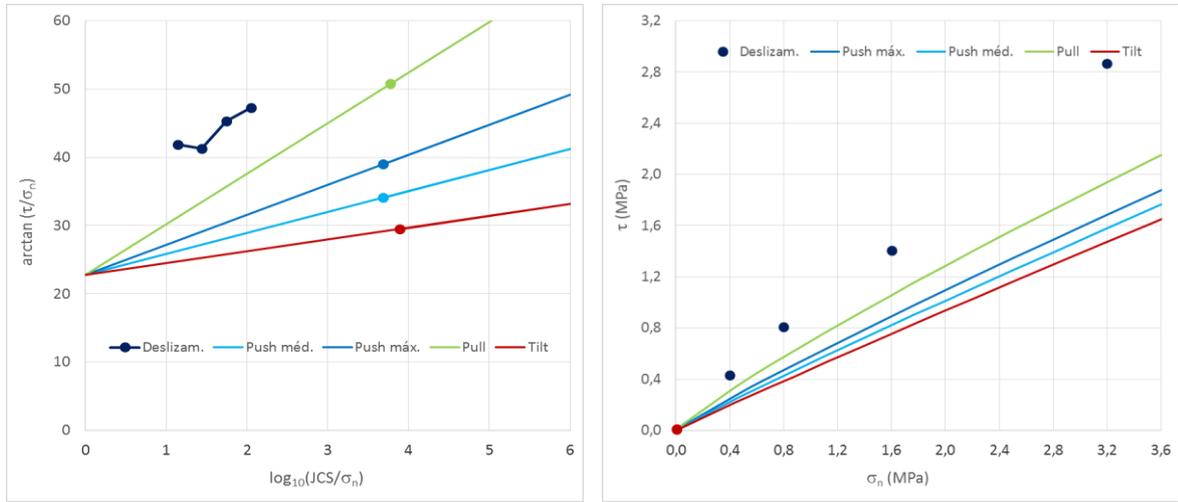


Fig. 16C – Gráficos do provete 254

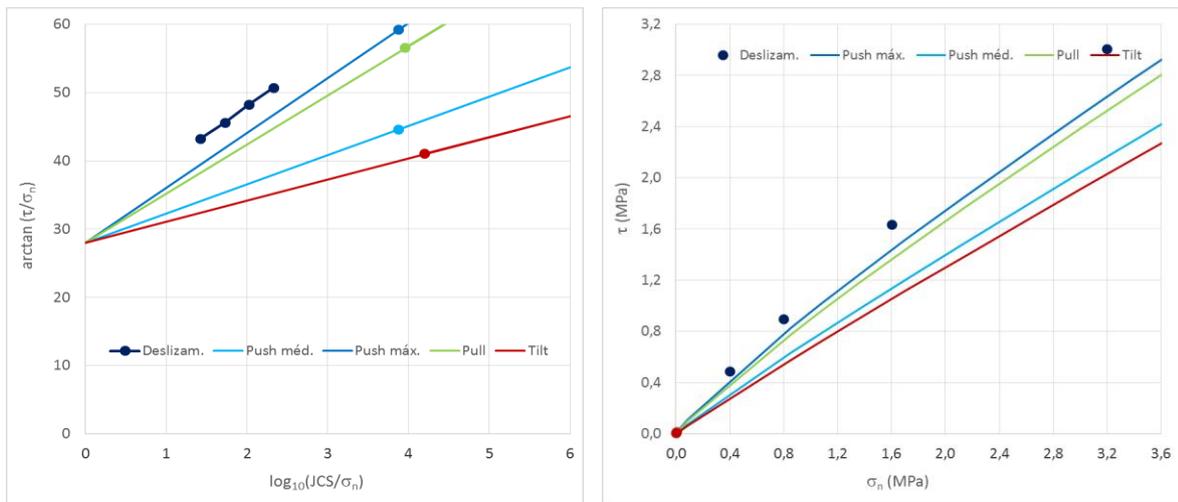


Fig. 17C – Gráficos do provete 255

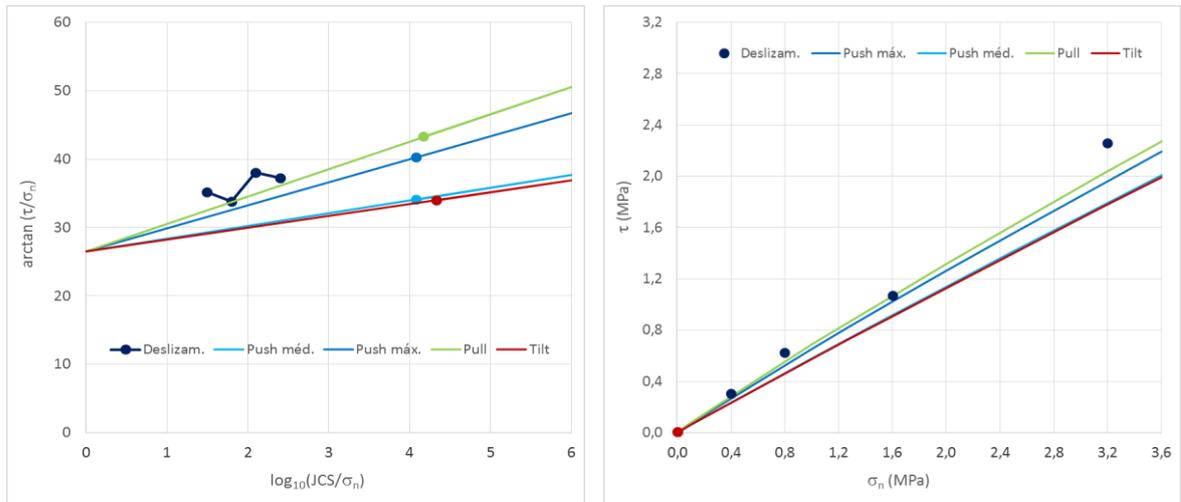


Fig. 18C – Gráficos do provete 256

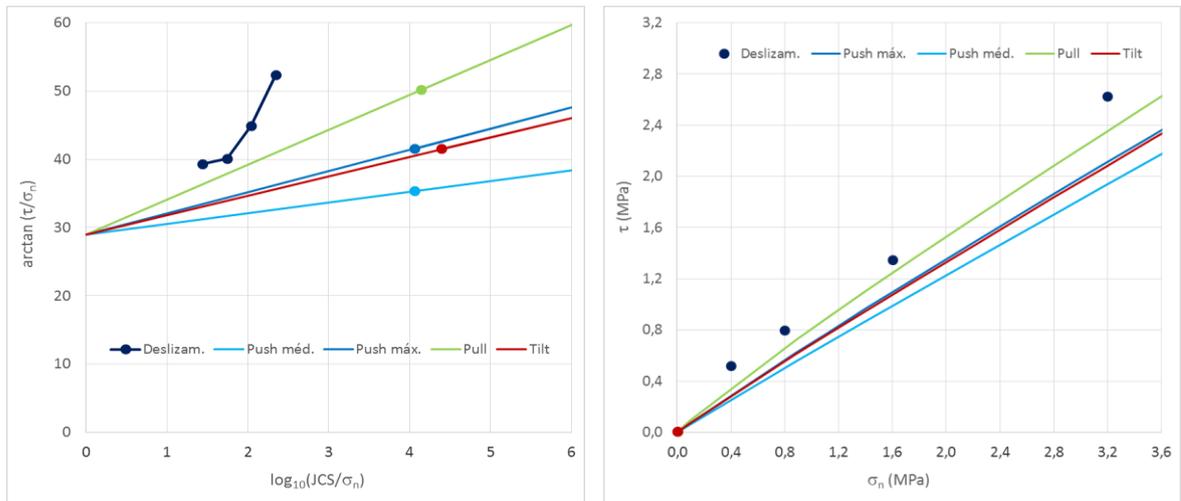


Fig. 19C – Gráficos do provete 301

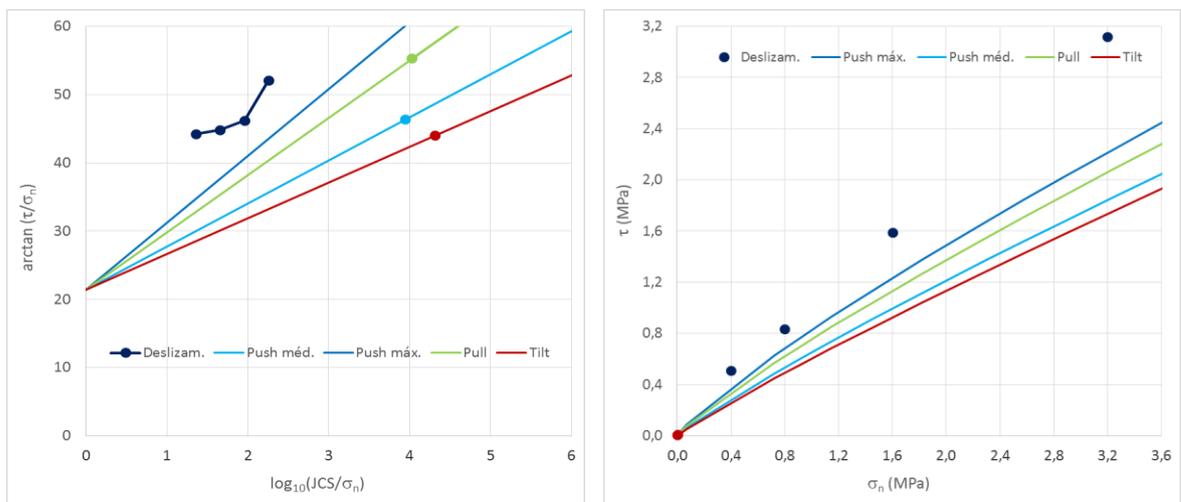


Fig. 20C – Gráficos do provete 302

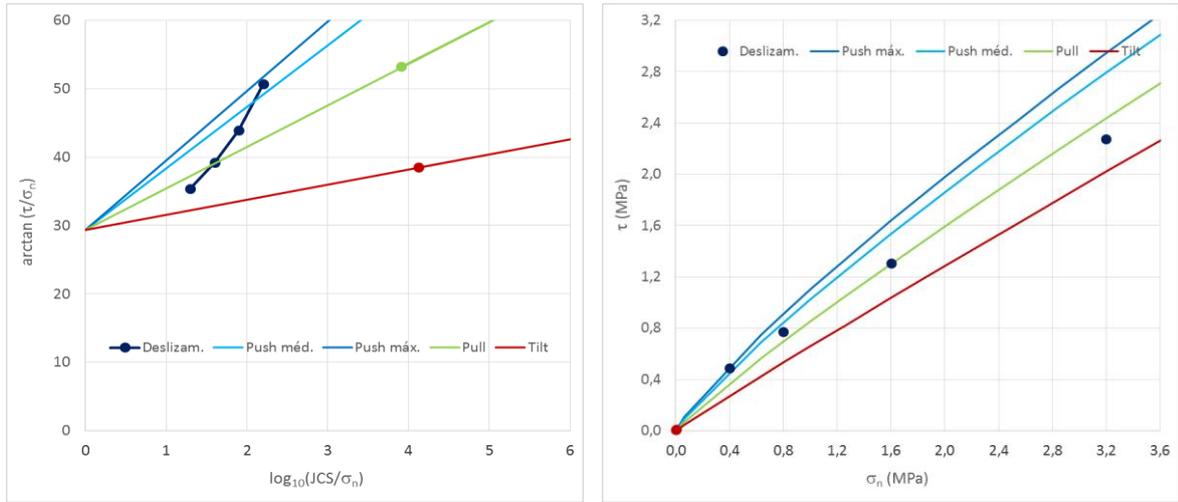


Fig. 21C – Gráficos do provete 303

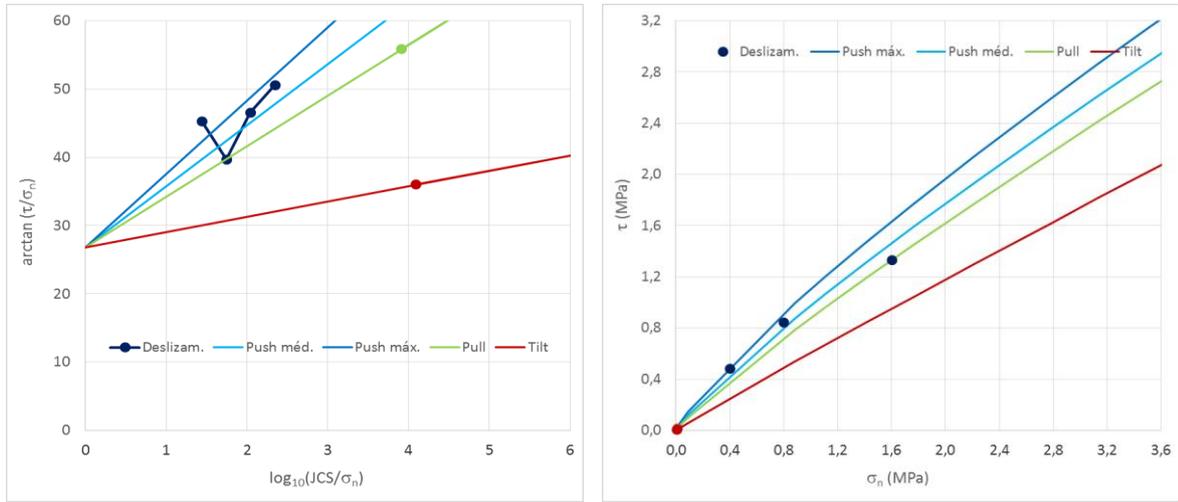


Fig. 22C – Gráficos do provete 304

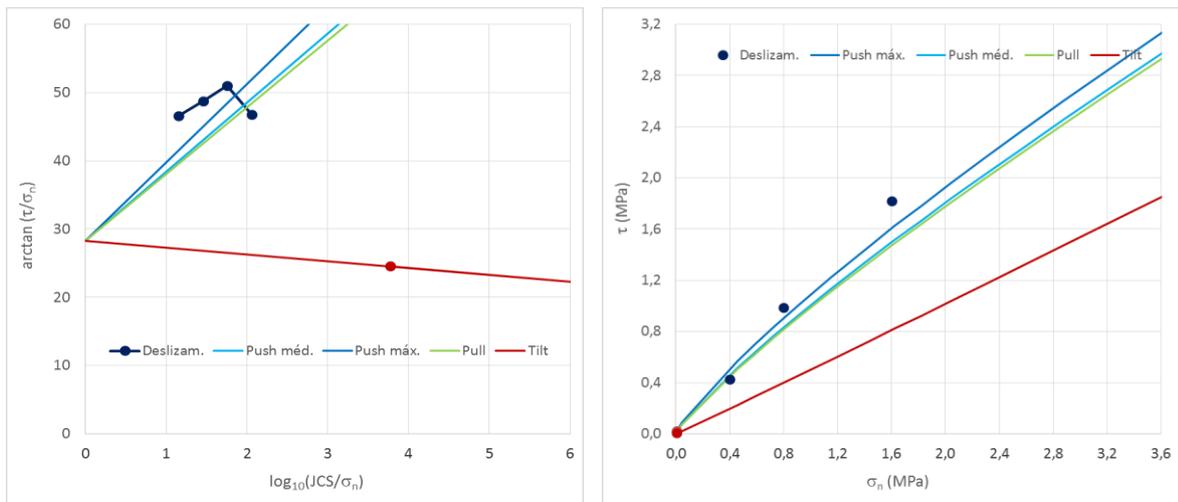
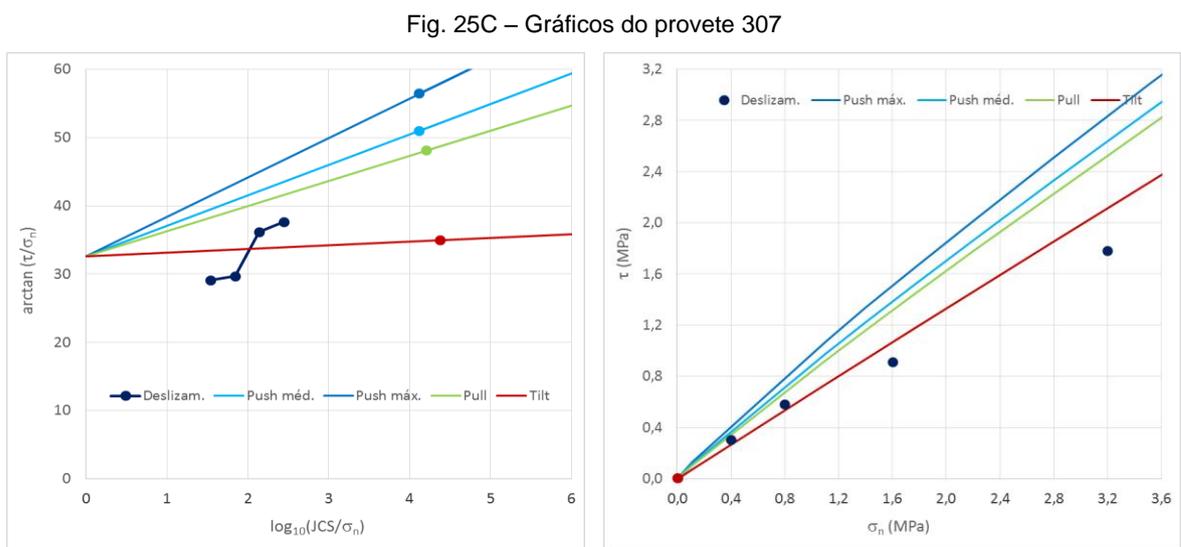
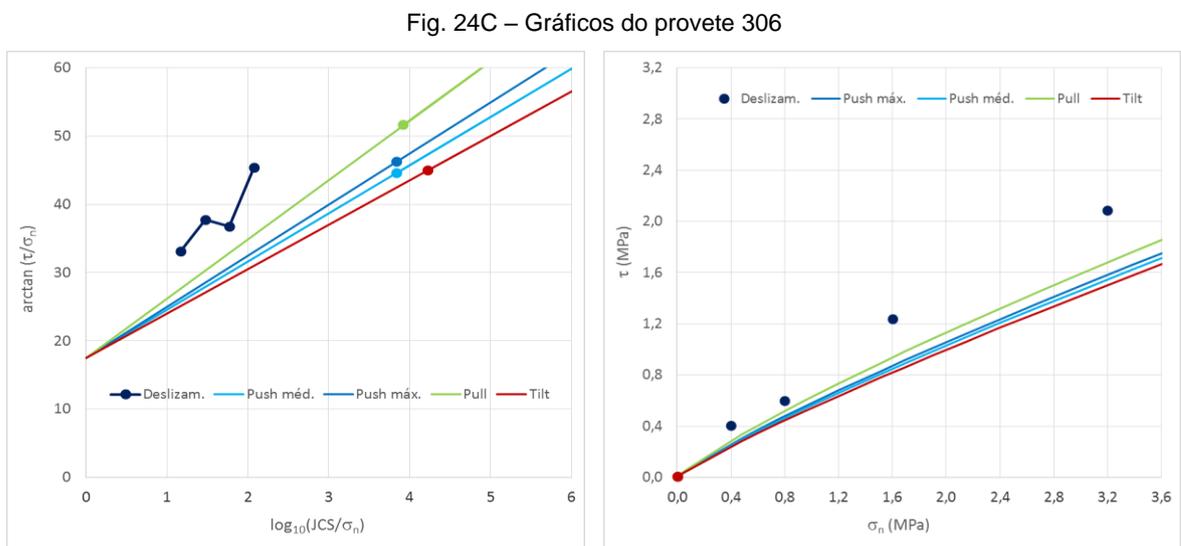
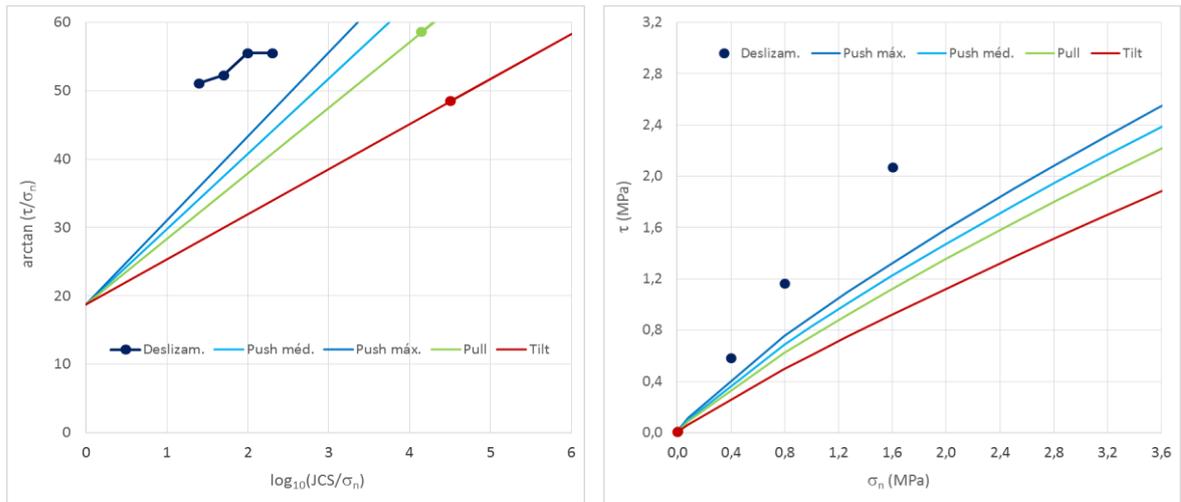


Fig. 23C – Gráficos do provete 305



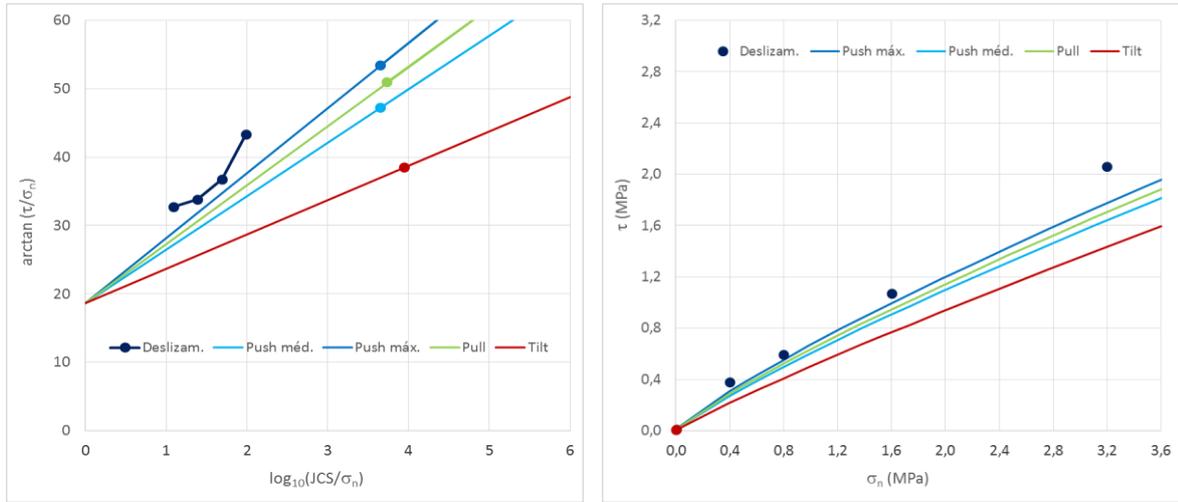


Fig. 27C – Gráficos do provete 309

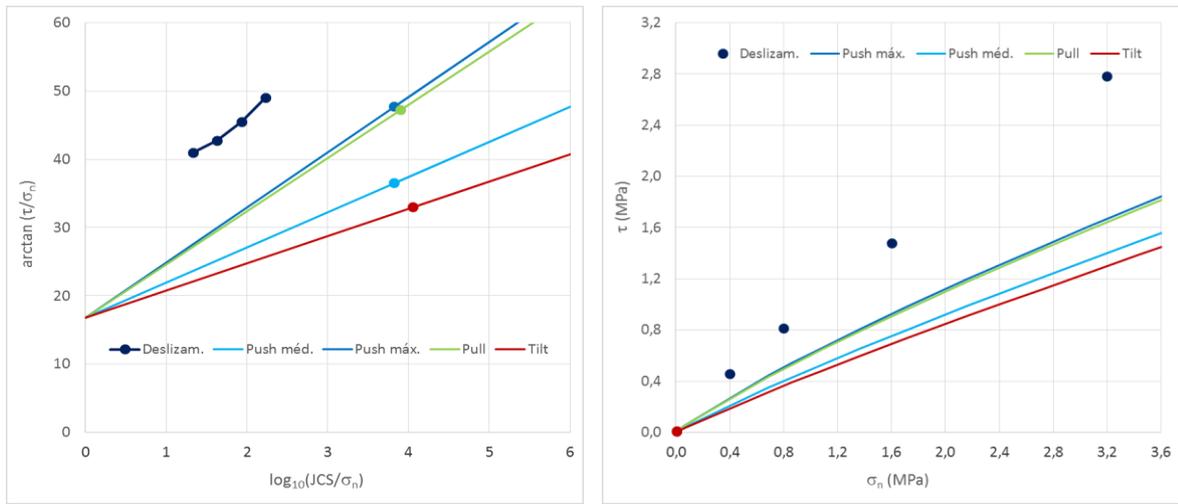


Fig. 28C – Gráficos do provete 335

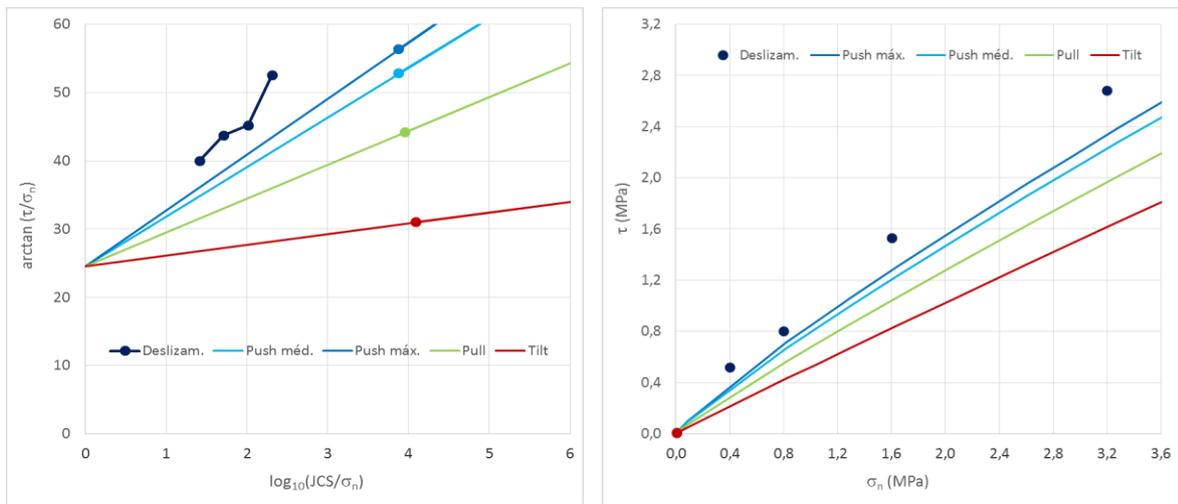


Fig. 29C – Gráficos do provete 336

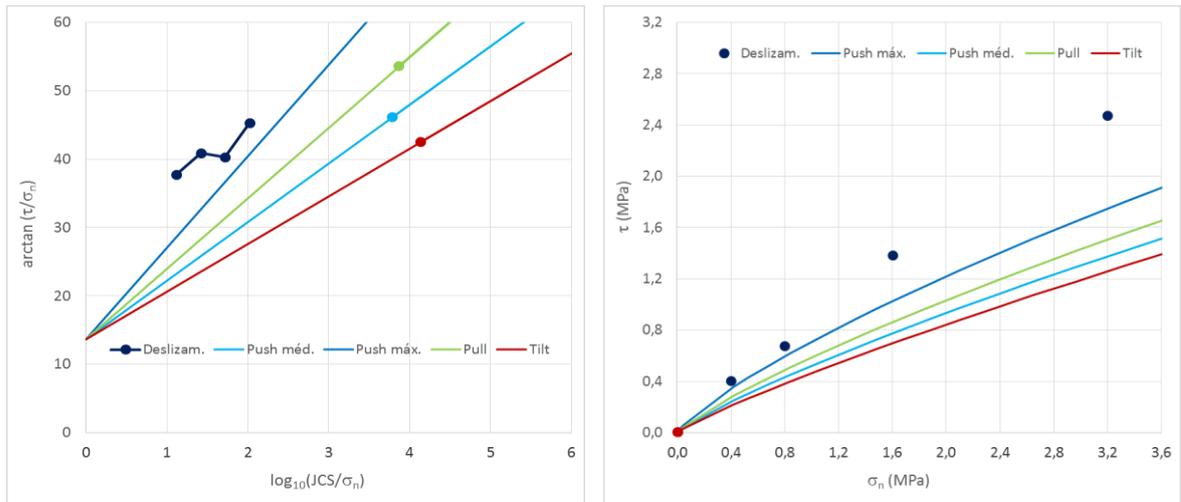


Fig. 30C – Gráficos do provete 389

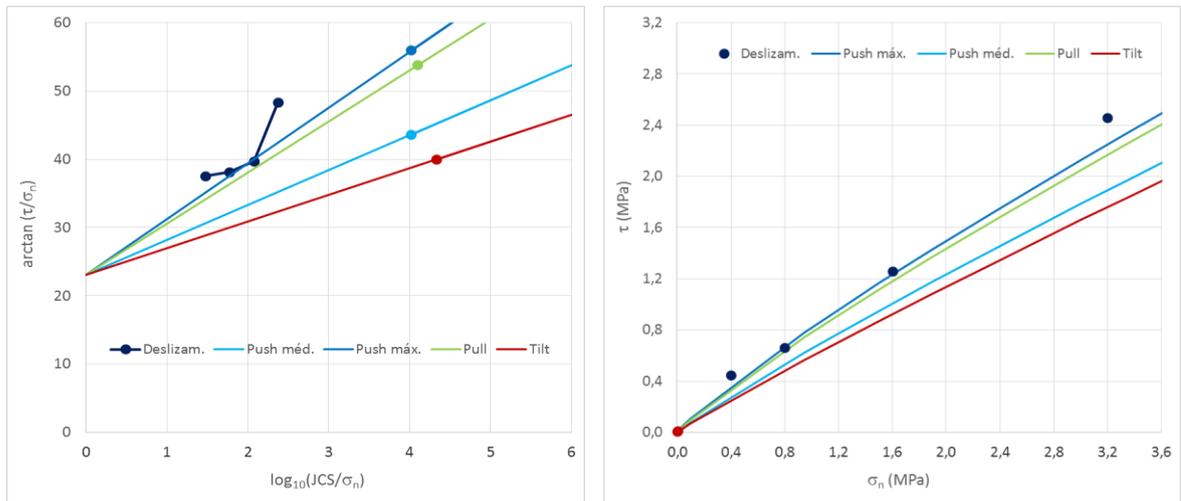


Fig. 31C – Gráficos do provete 390

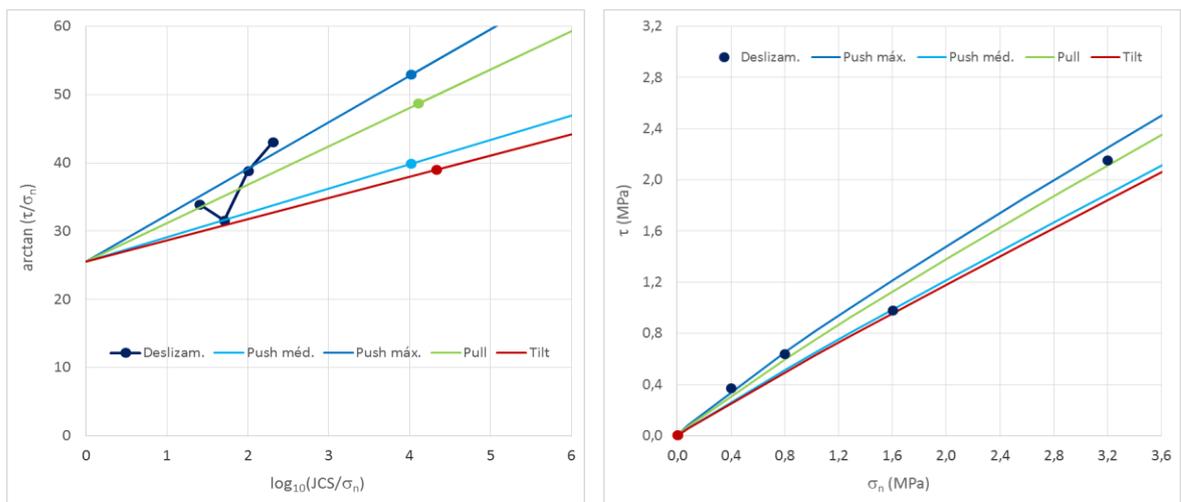


Fig. 32C – Gráficos do provete 391

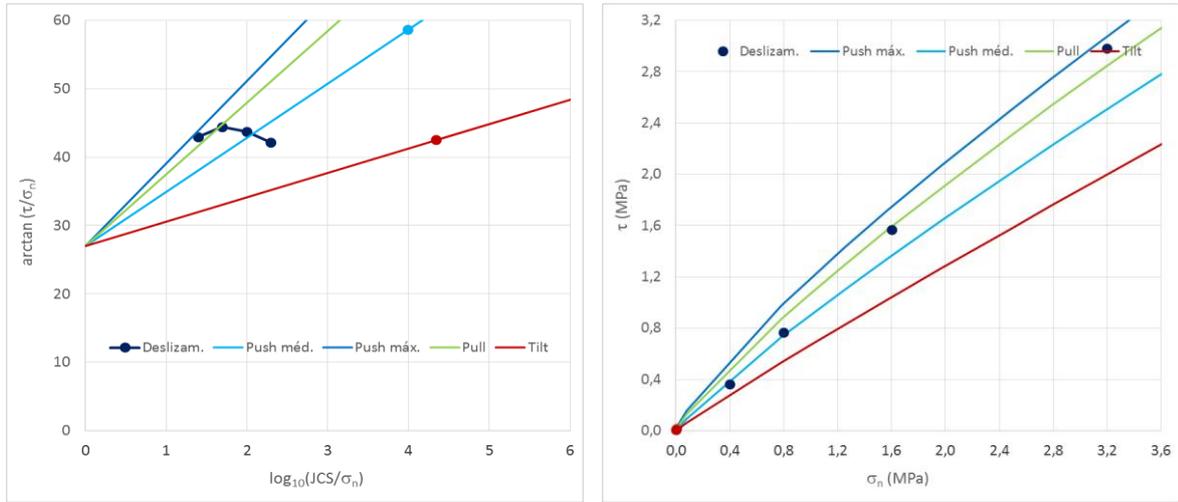


Fig. 33C – Gráficos do provete 392

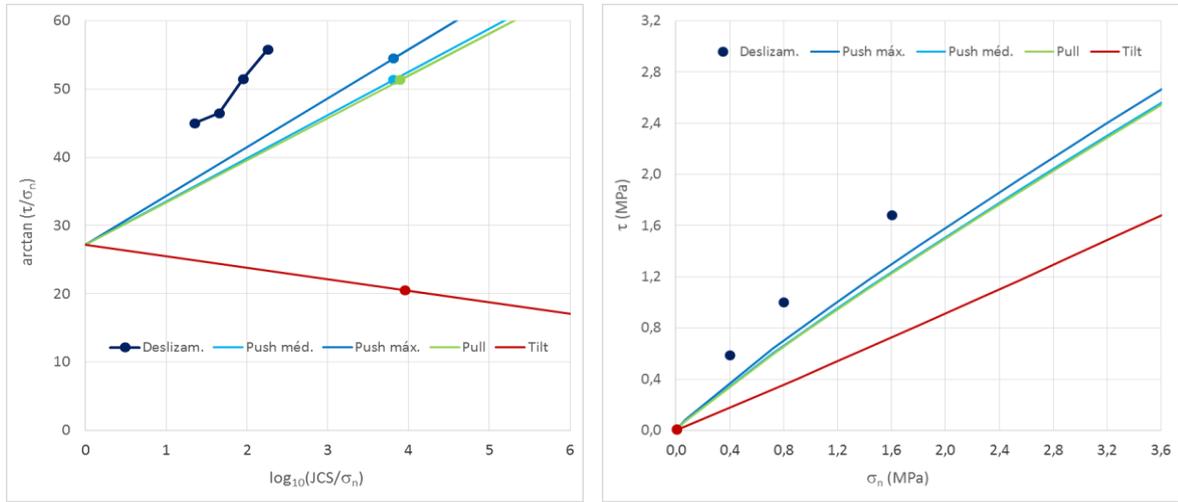


Fig. 34C – Gráficos do provete 393

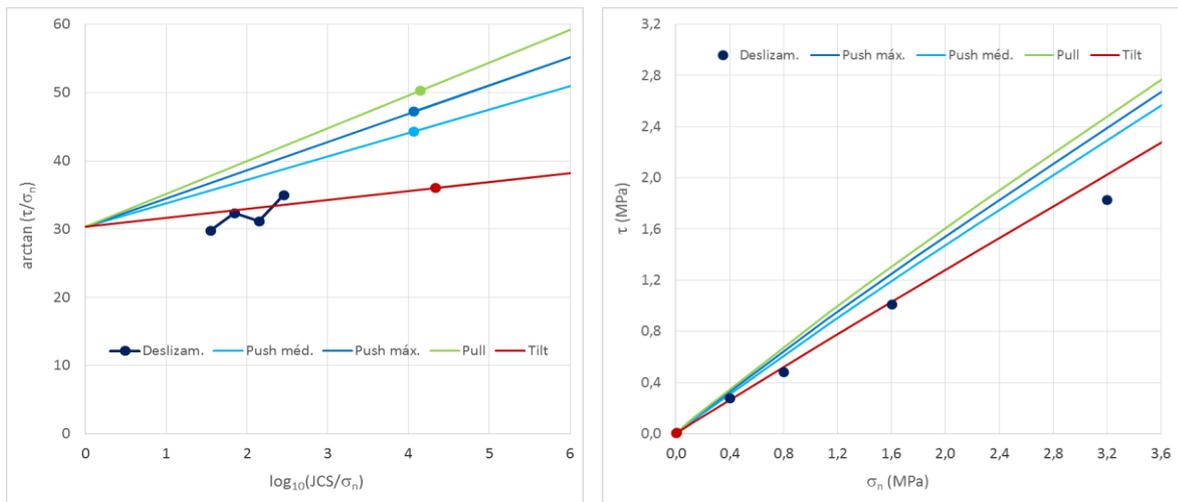


Fig. 35C – Gráficos do provete 394 A

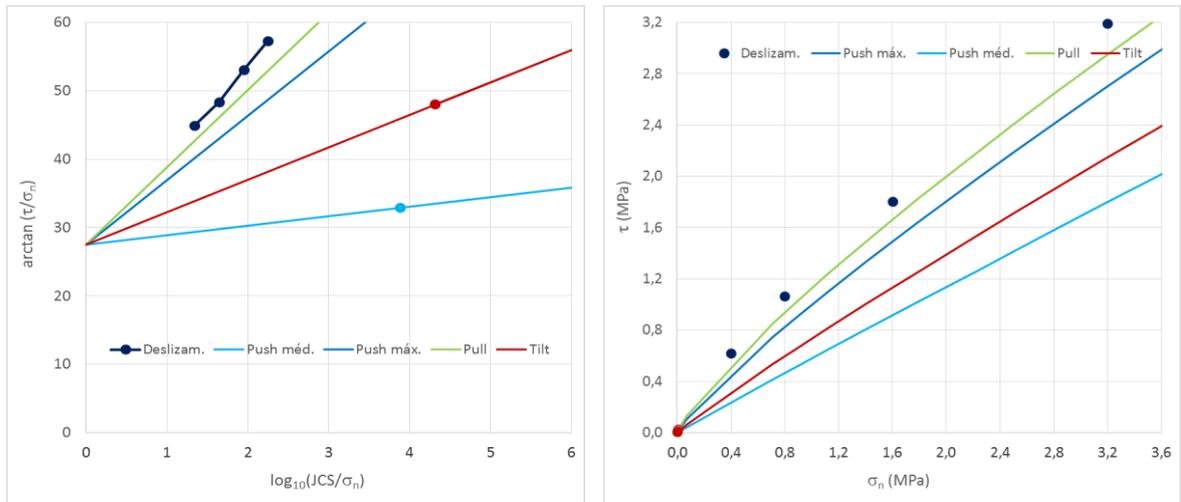


Fig. 36C – Gráficos do provete 394 B

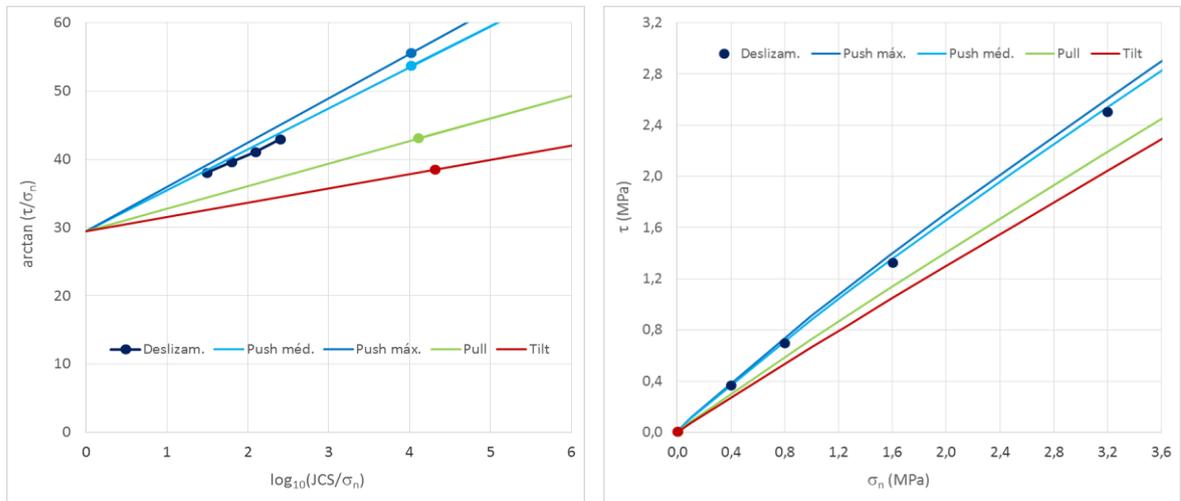


Fig. 37C – Gráficos do provete 395

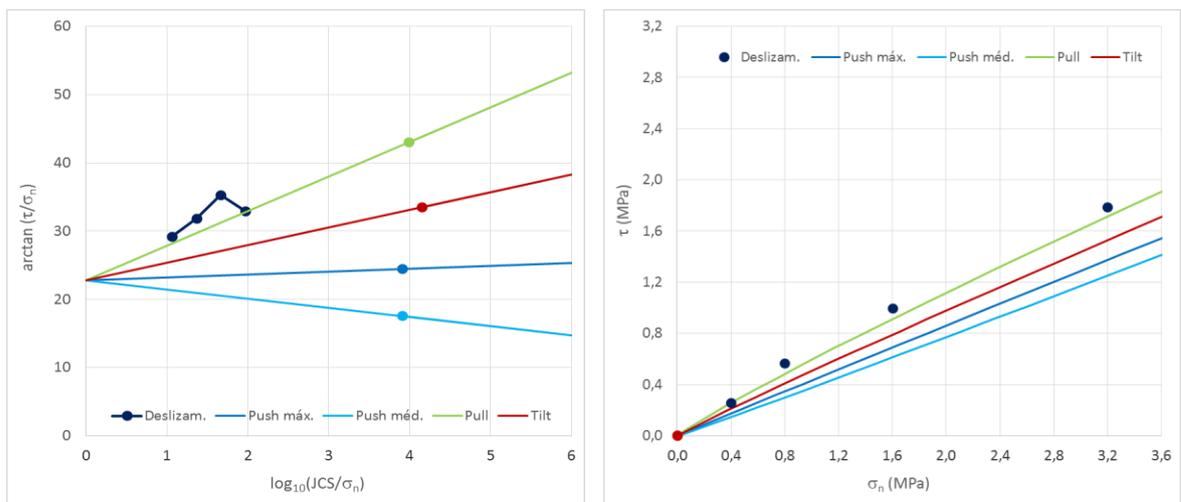


Fig. 38C – Gráficos do provete 573

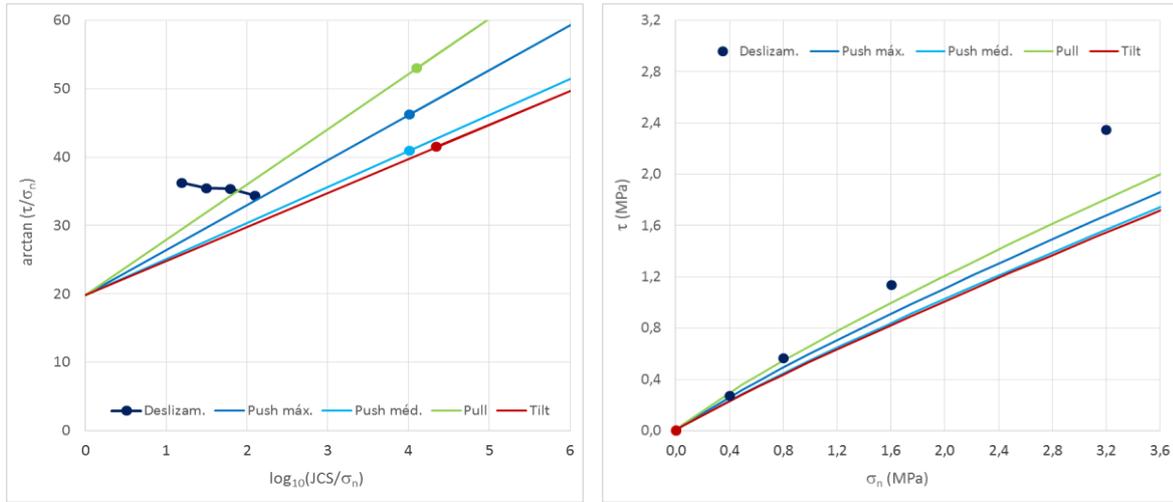


Fig. 39C – Gráficos do provete 574

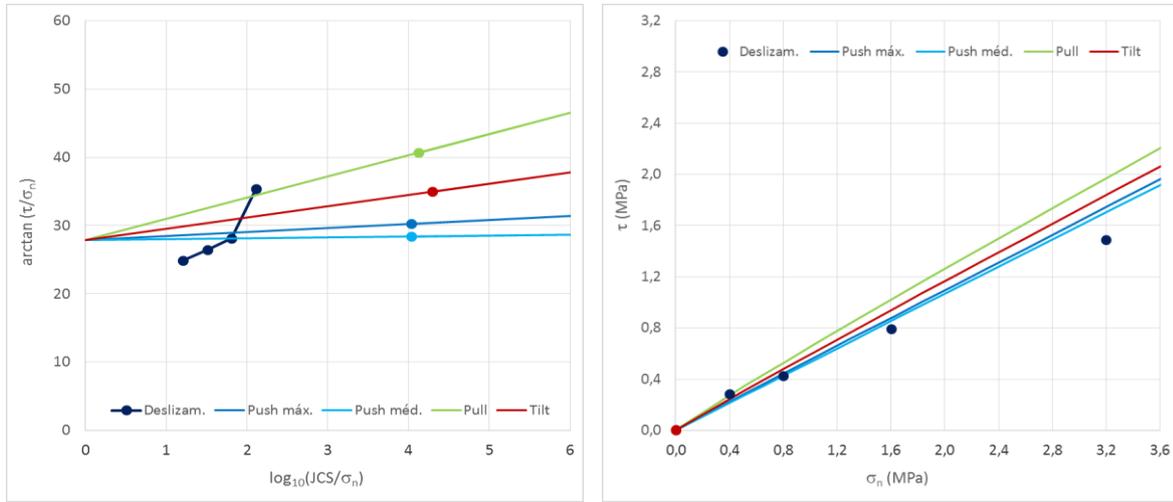


Fig. 40C – Gráficos do provete 575

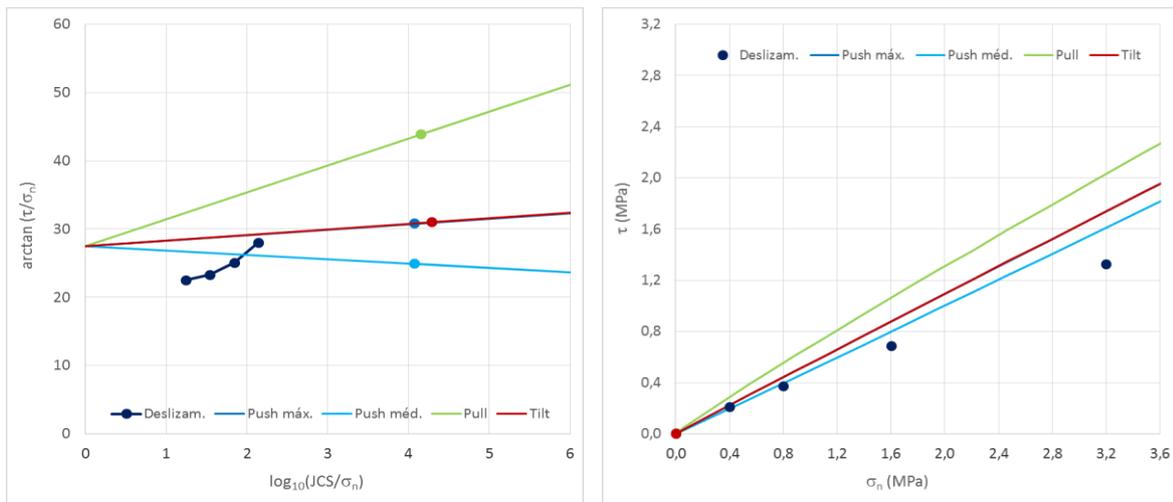


Fig. 41C – Gráficos do provete 576

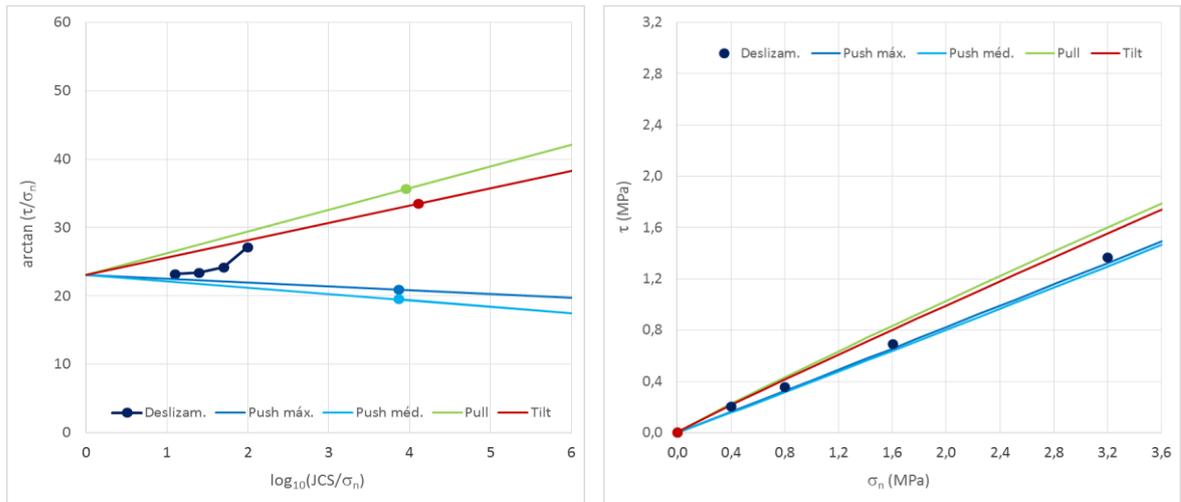


Fig. 42C – Gráficos do provete 577

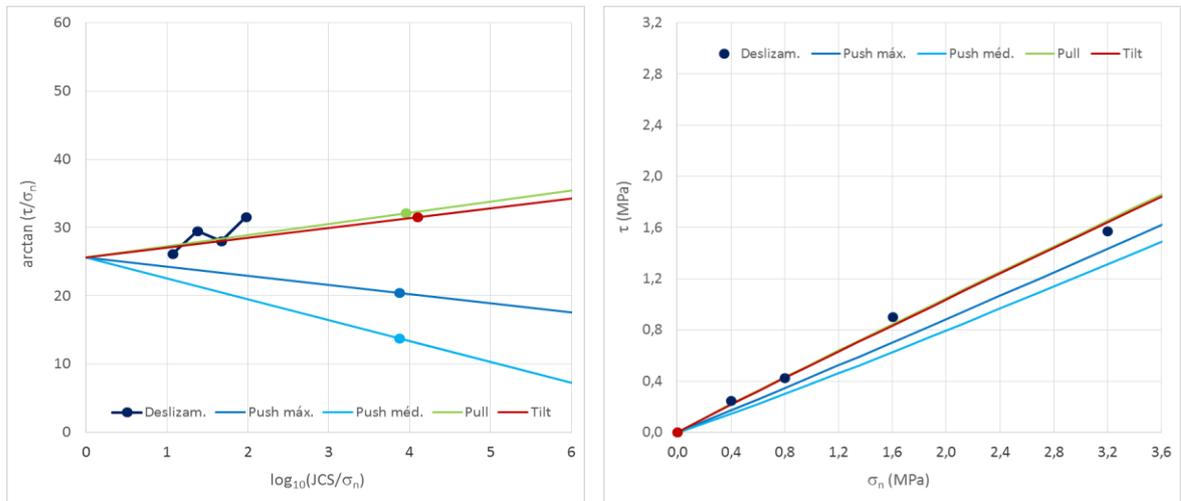


Fig. 43C – Gráficos do provete 578

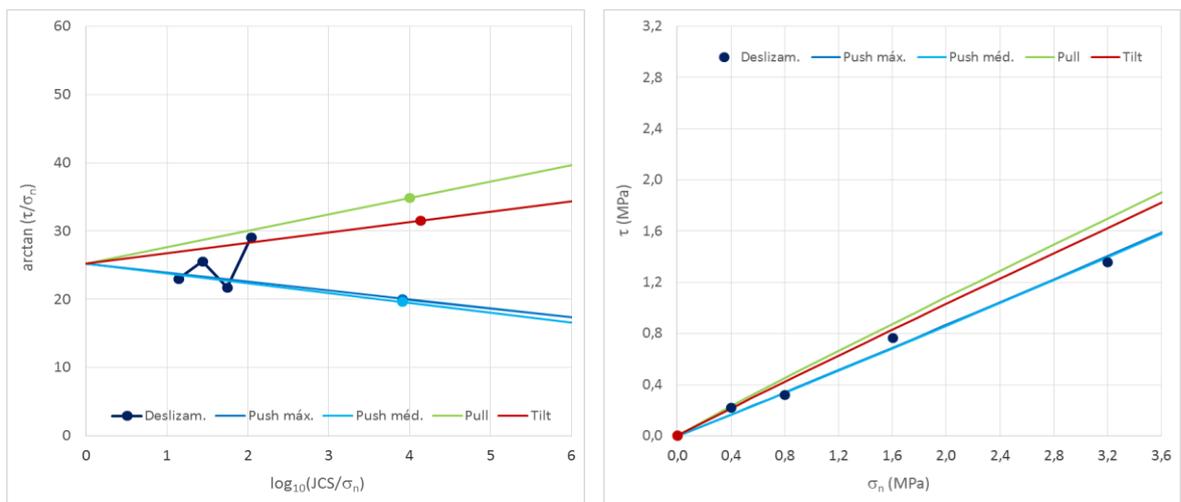


Fig. 44C – Gráficos do provete 579

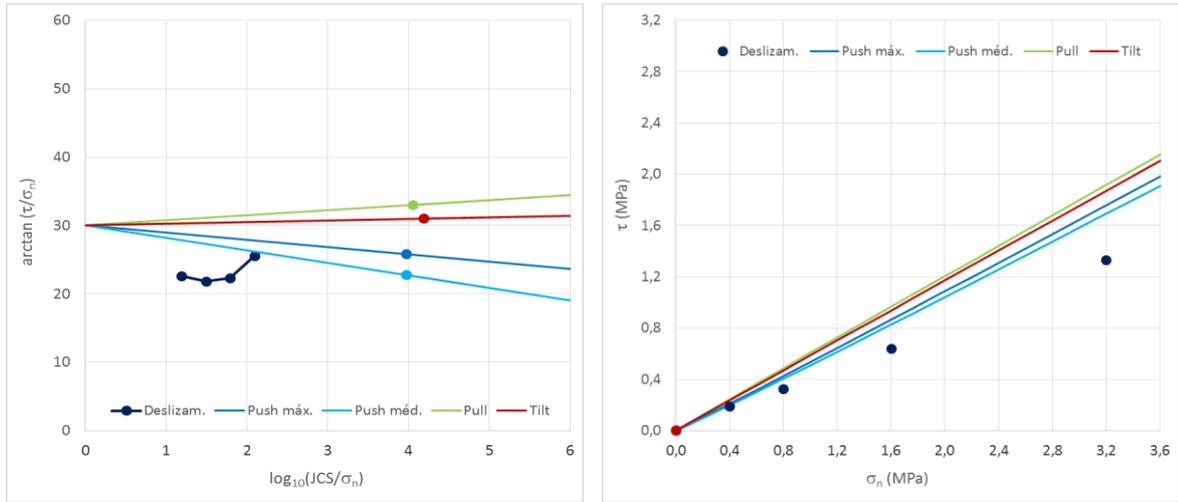


Fig. 45C – Gráficos do provete 580

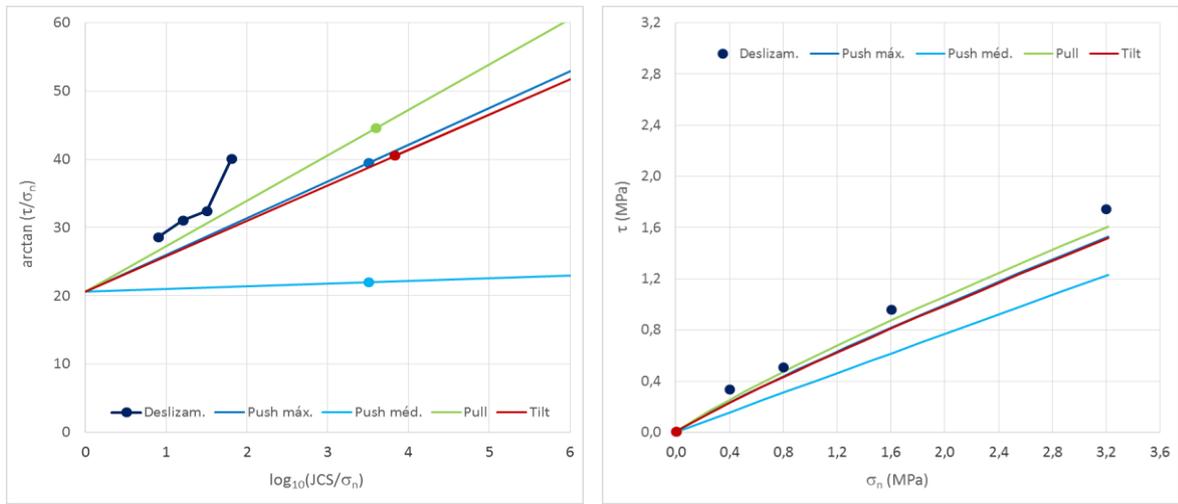


Fig. 46C – Gráficos do provete 581

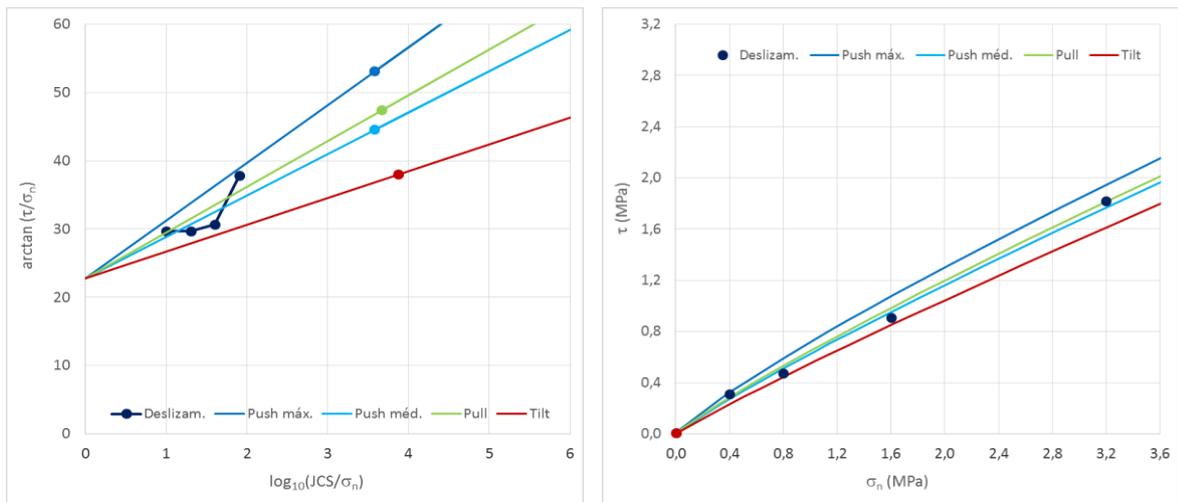
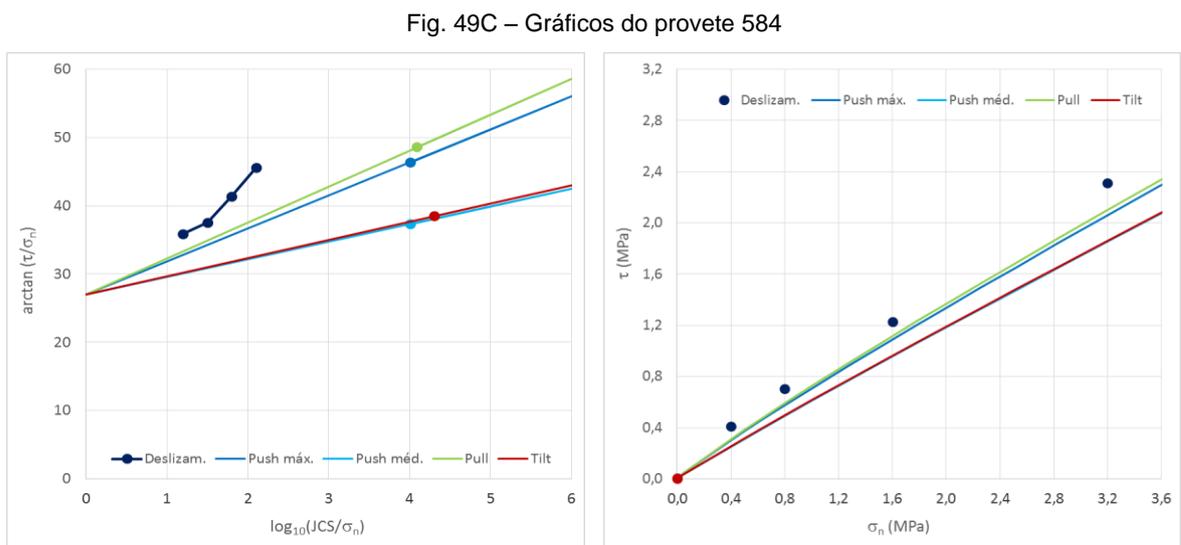
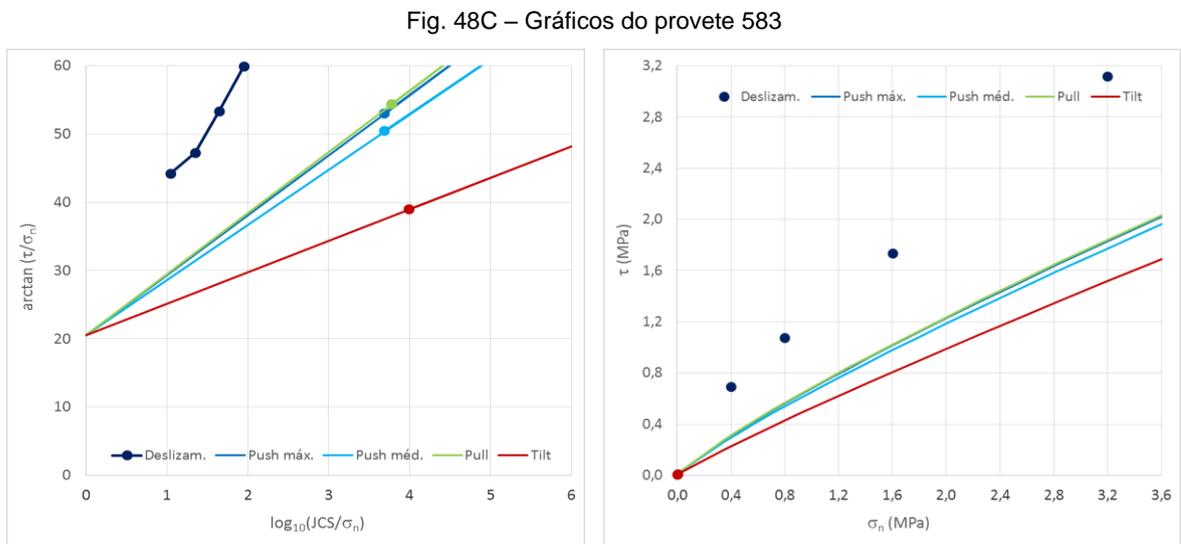
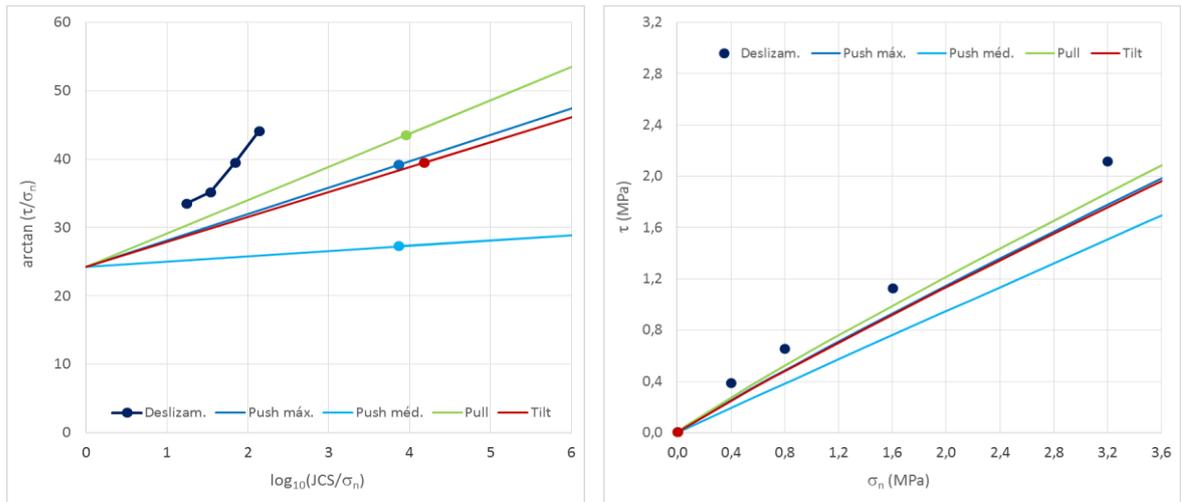


Fig. 47C – Gráficos do provete 582



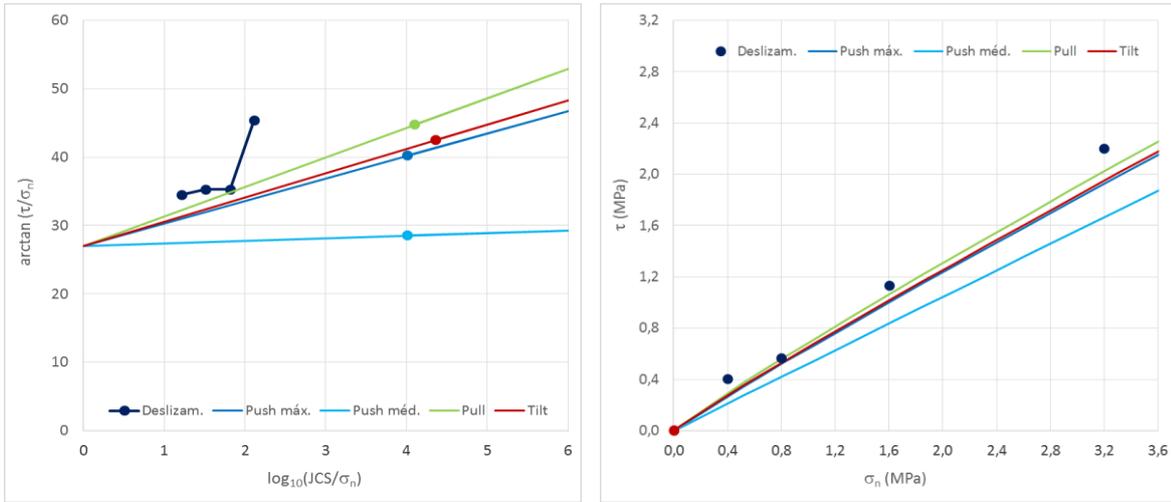


Fig. 51C – Gráficos do provete 586

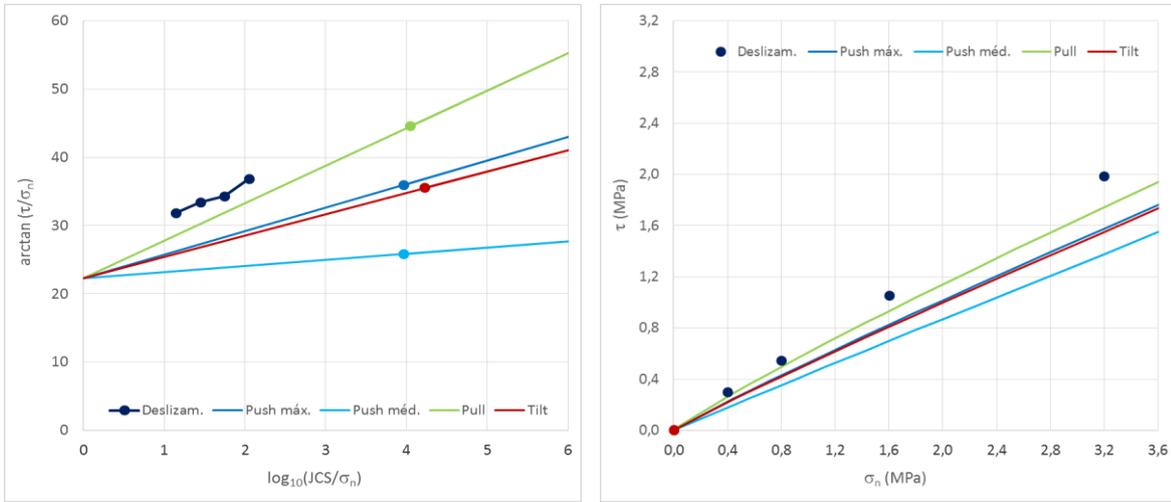


Fig. 52C – Gráficos do provete 587

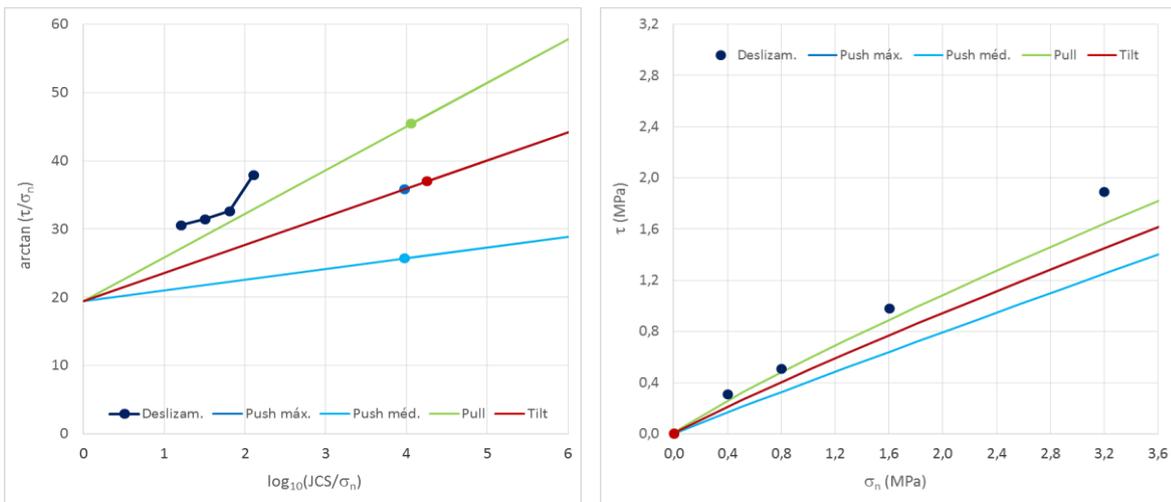


Fig. 53C – Gráficos do provete 588

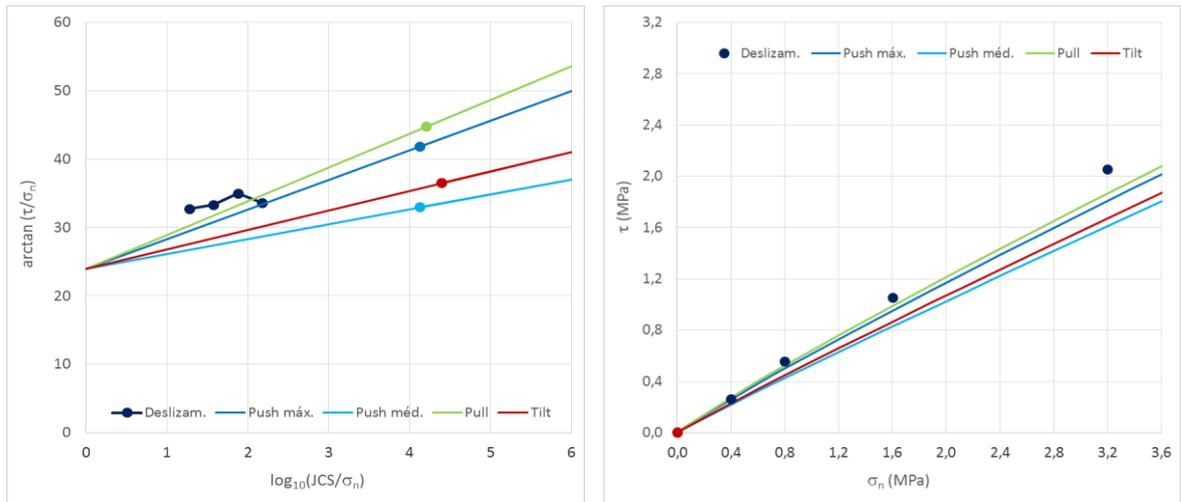


Fig. 54C – Gráficos do provete 589

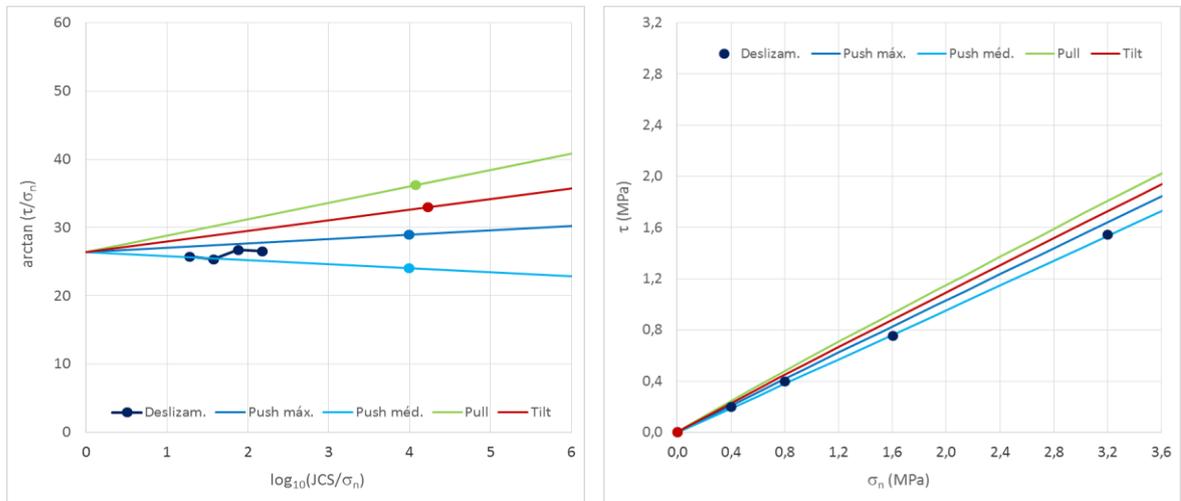


Fig. 55C – Gráficos do provete 590

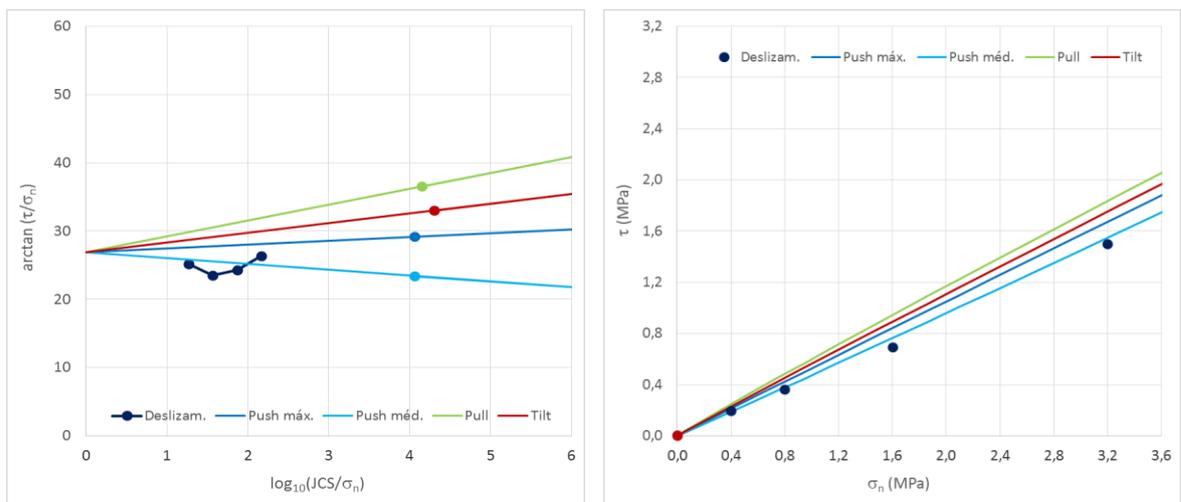


Fig. 56C – Gráficos do provete 591

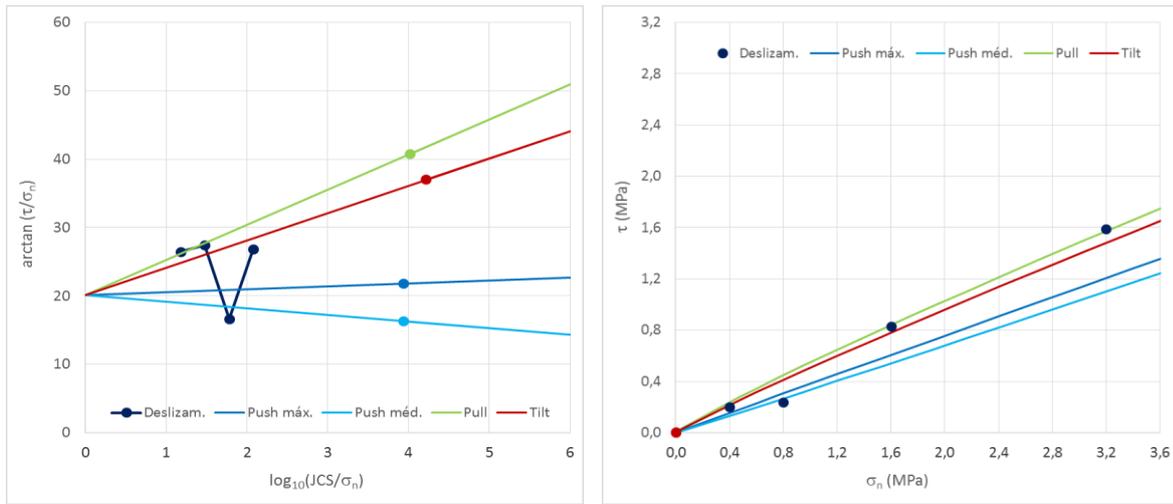


Fig. 57C – Gráficos do provete 592

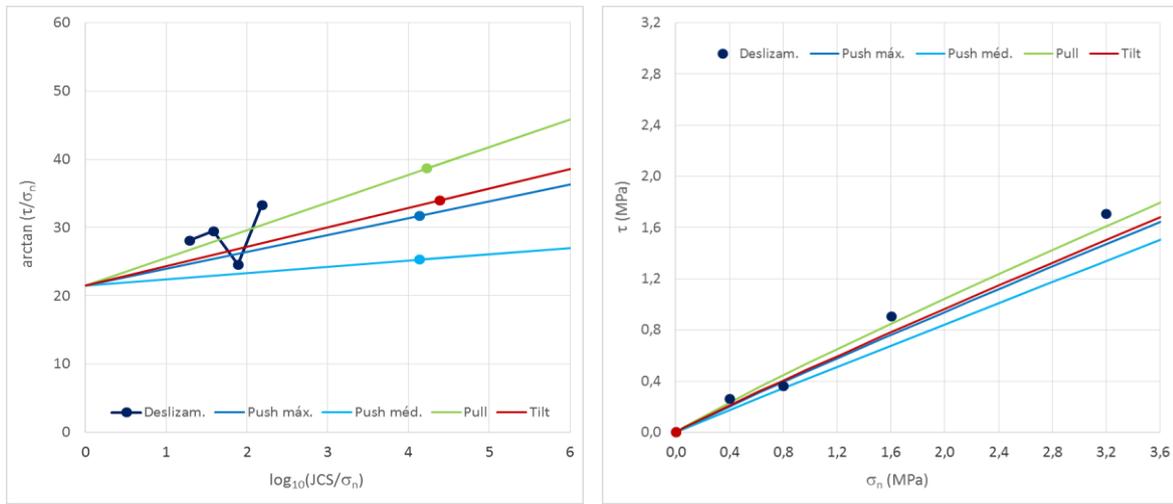


Fig. 58C – Gráficos do provete 593

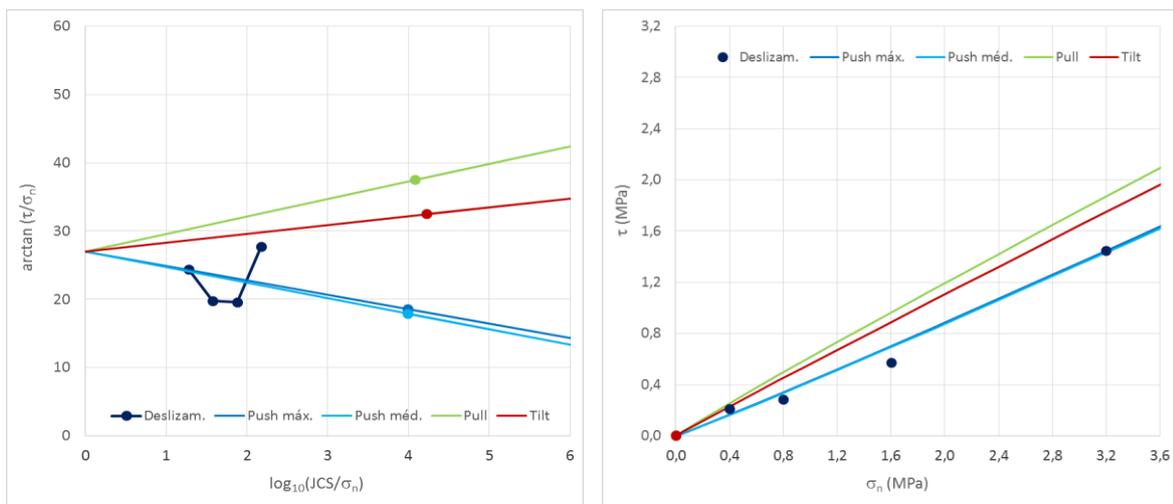


Fig. 59C – Gráficos do provete 594

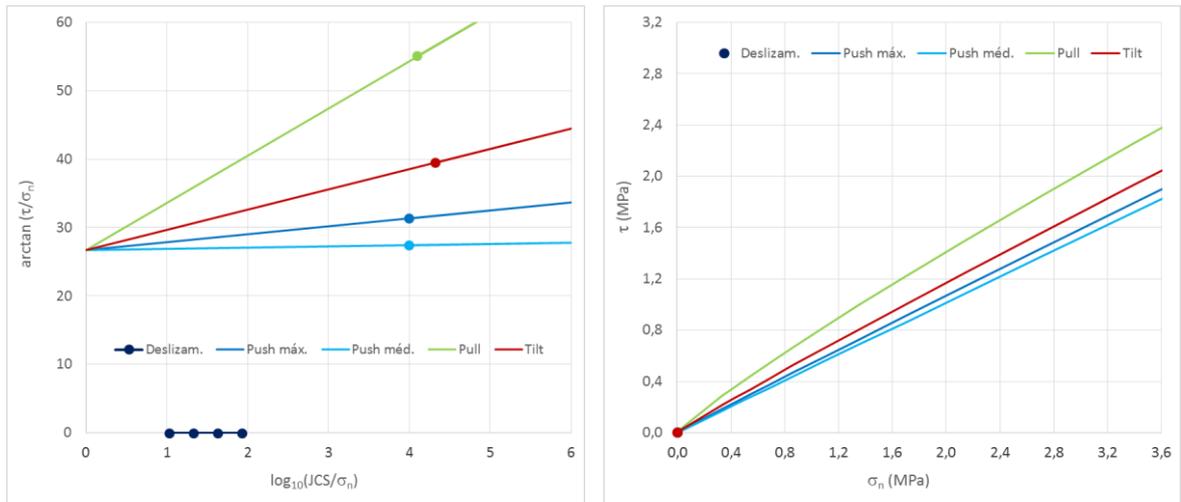


Fig. 60C – Gráficos do provete A

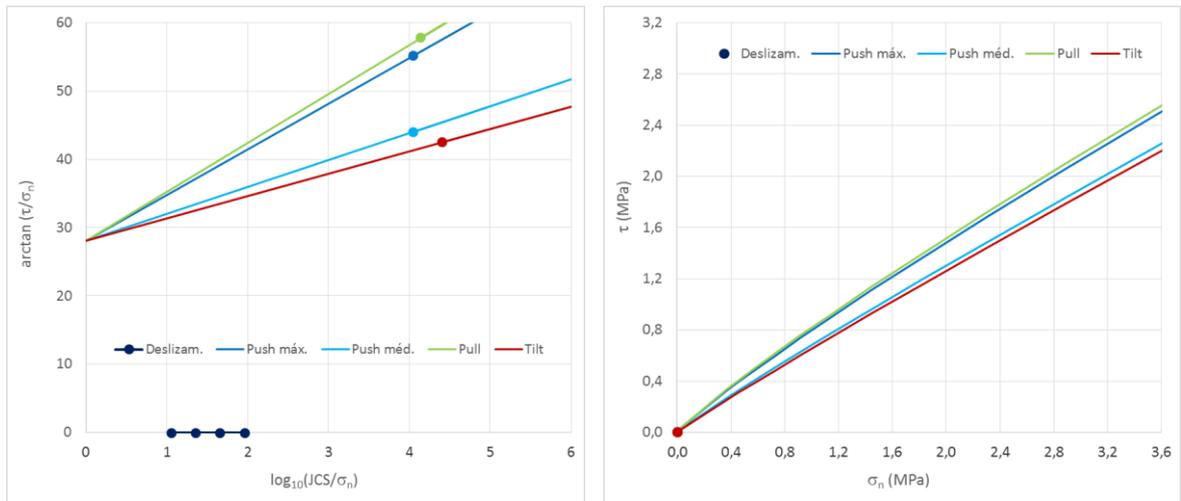


Fig. 61C – Gráficos do provete B

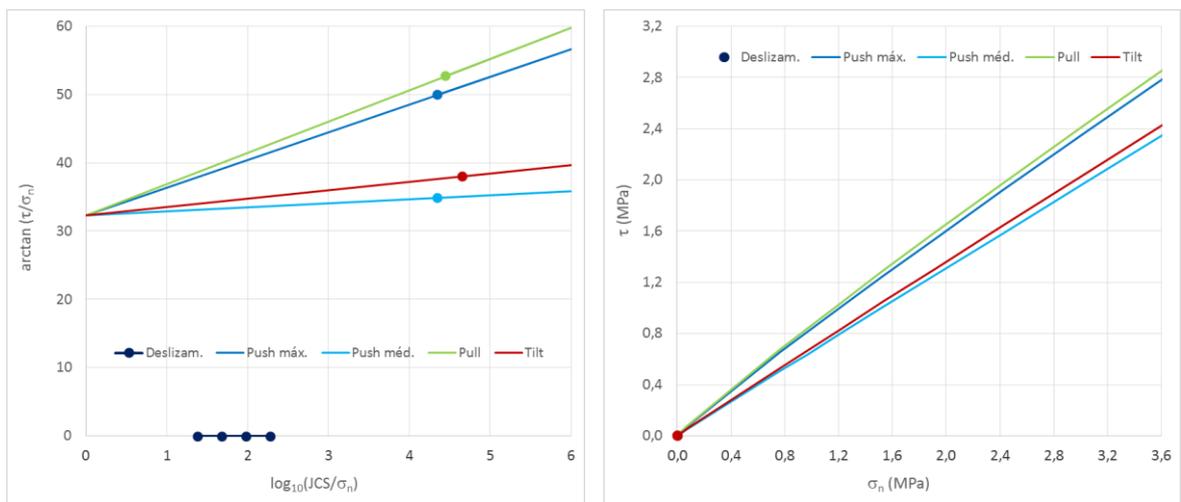


Fig. 62C – Gráficos do provete C

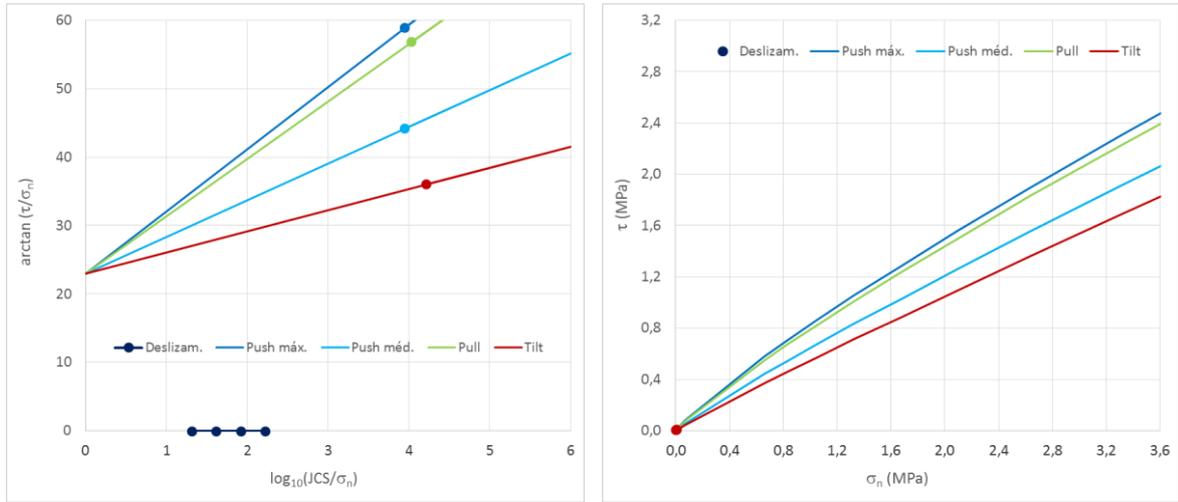


Fig. 63C – Gráficos do provete D

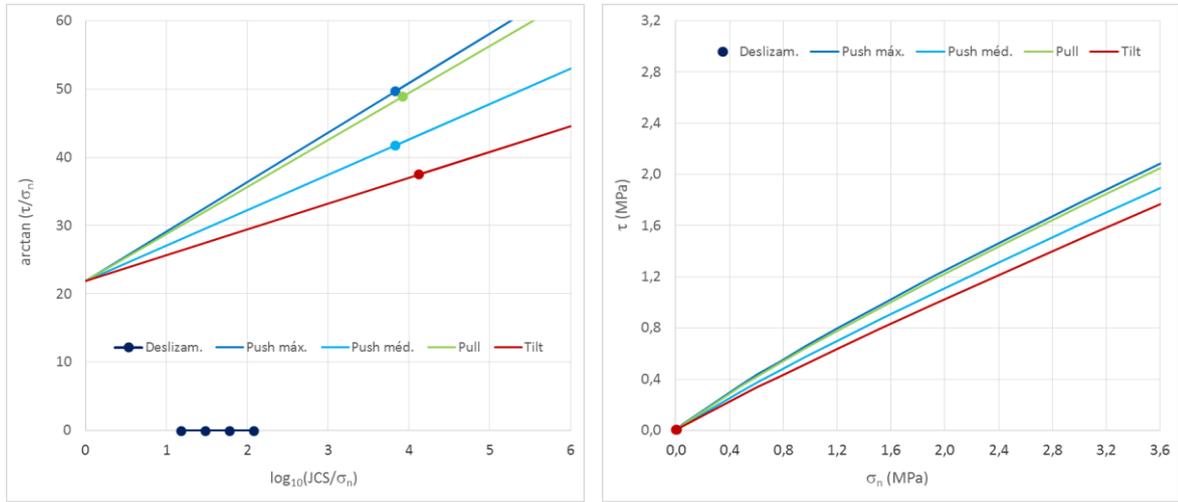


Fig. 64C – Gráficos do provete E

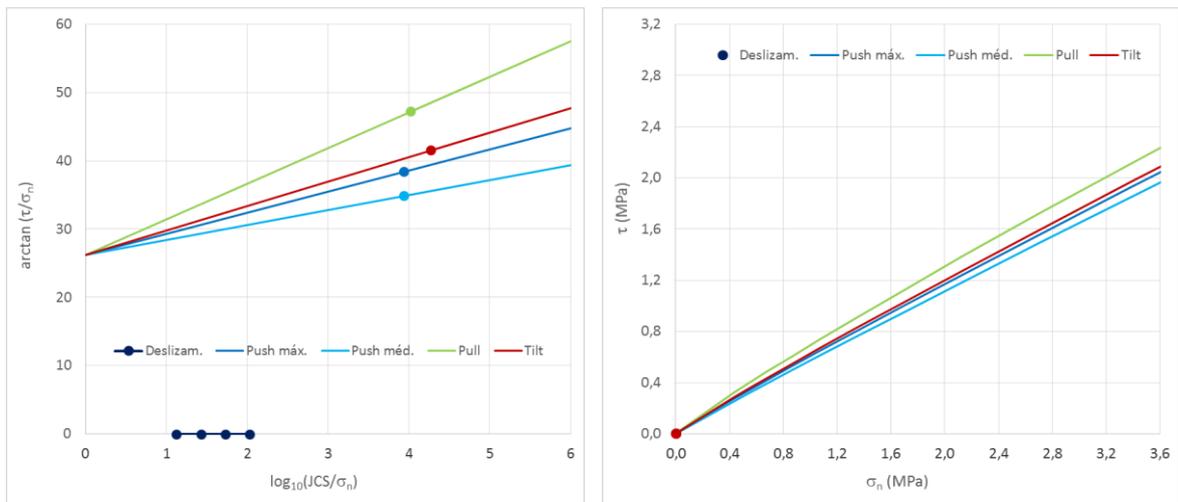


Fig. 65C – Gráficos do provete F

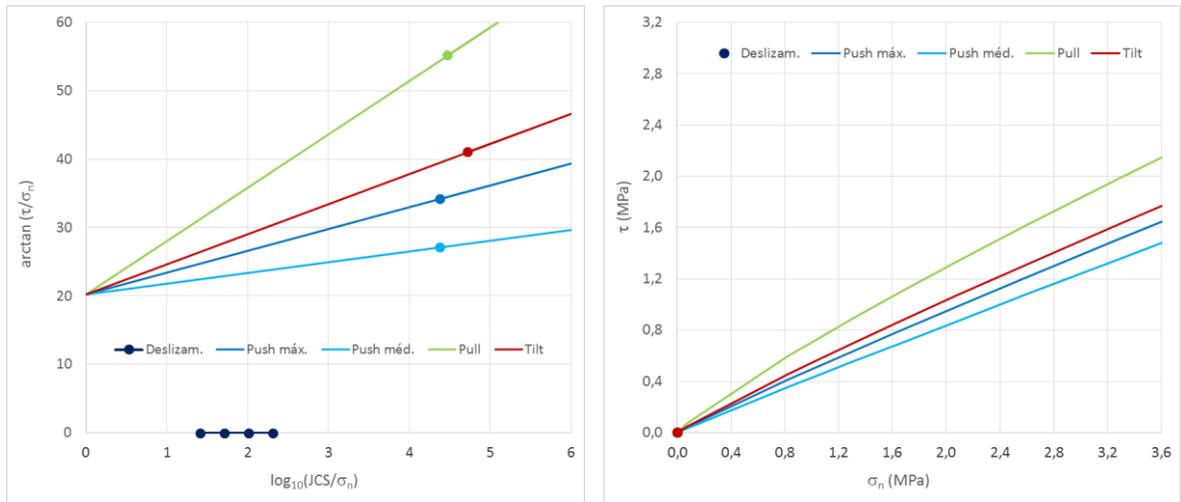


Fig. 66C – Gráficos do provete G

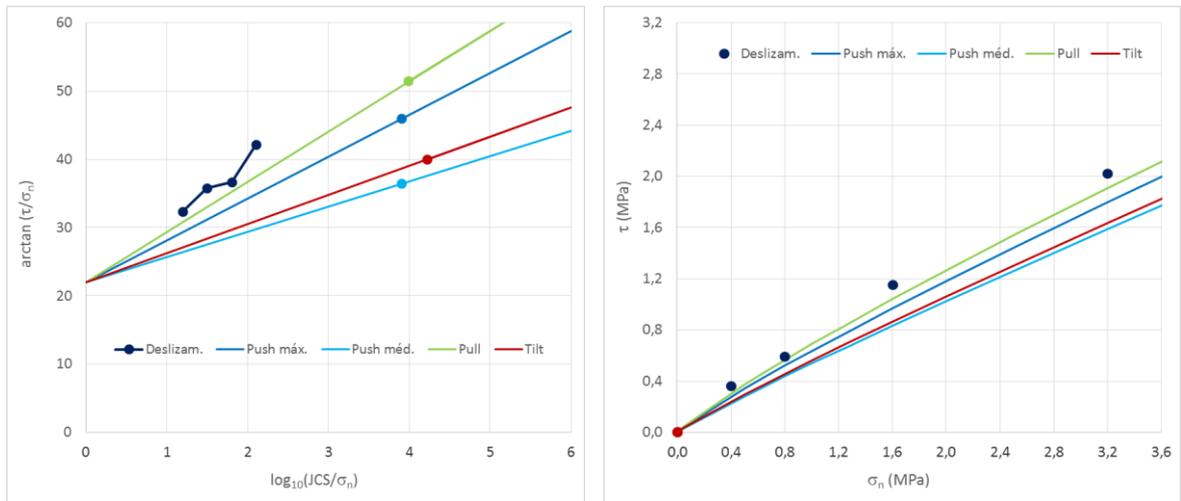


Fig. 67C – Gráficos do provete H