UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil

# Modelação numérica de ensaios de macacos planos de grande área (LFJ) para determinação da deformabilidade de maciços rochosos

Francisco Antunes Bernardo

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil de Geotecnia pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa no âmbito do convénio de cooperação entre a UNL e o LNEC

**Júri**

| | |
|---|---|
| Presidente: | Professor Doutor Nuno M.C. Guerra |
| Vogais: | Professor Doutor José R.P. Resende (Arguente) |
| | Investigador Doutor Luís M.N. Lamas (Orientador) |
| | Professor Doutor João P.B. Serra (Co-orientador) |

Lisboa, Junho de 2011

# AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar expressa a minha gratidão para com as pessoas que me auxiliaram nesta etapa do meu percurso académico:

- à família, à namorada e aos amigos pelo apoio incondicional em todos os momentos;
- ao Doutor Luís Lamas pela oportunidade de realizar esta dissertação, pelo incentivo, pela dedicação e disponibilidade;
- ao Professor Doutor João Serra pela oportunidade de realizar esta dissertação em ambiente de investigação aplicada a problemas reais, numa área da Geotecnia ausente do meu percurso académico;
- ao Engenheiro Bruno Figueiredo pela paciência e tempo dispendido no esclarecimento de dúvidas;
- ao Técnico Superior Luís Pinto e ao Bolseiro Ângelo Gil pelo incentivo e paciência dispendida no esclarecimento de dúvidas;
- aos funcionários do LNEC que de diferentes formas me auxiliaram.

A todos, mais uma vez, muito obrigado.

# RESUMO

A deformabilidade dos maciços rochosos desempenha um importante papel na concepção de diversos tipos de estruturas, tais como barragens de betão, pontes e obras subterrâneas, uma vez que o comportamento destas obras é influenciado pelos deslocamentos ocorridos no maciço.

A realização de ensaios *in situ* tem um papel importante para a determinação dos parâmetros de deformabilidade de um maciço rochoso. Para a determinação, em particular, do módulo de elasticidade pode ser utilizado o ensaio de macacos planos de grande área (LFJ).

O ensaio LFJ consiste na medição dos deslocamentos relativos das paredes de um rasgo, aberto no maciço rochoso por meio de um disco de corte com 1 m de diâmetro, sujeito a uma pressão uniforme aplicada por um macaco plano de paredes finas, deformáveis e de grande área, contendo no interior quatro defórmetros.

Os resultados deste ensaio têm-se revelado fiáveis ao longo de várias décadas de aplicação. No entanto, este ensaio devido à sua forma e ao tipo de carregamento que impõe ao maciço, obriga à interpretação cuidada dos seus resultados. Com o objectivo de melhorar a compreensão do comportamento do maciço rochoso durante o ensaio, bem como o modelo interpretativo existente, foi recentemente desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) um modelo numérico tridimensional para interpretação dos resultados deste ensaio.

Este trabalho explora as potencialidades que este modelo oferece, através da simulação de todo o processo de execução do ensaio (escavação e pressurização dos rasgos) para situações reais de ensaio estudadas e não estudadas por anteriores modelos. Paralelamente, foram calculados novos parâmetros interpretativos que permitirão uma interpretação mais correcta dos resultados de ensaio. No final realiza-se um estudo sobre as implicações que novas soluções de modelação poderão trazer para a interpretação dos resultados do ensaio.

**Palavras-chave**: Maciços rochosos; Deformabilidade; Modelo numérico tridimensional; Ensaios *in situ*

# ABSTRACT

The deformability of rock masses plays an important role in the design of various types of structures, such as concrete dams, bridges and underground works, because the behavior of these structures is influenced by the displacements in the rock masses.

*In situ* testing has an important role in determining the parameters of deformability of a rock mass. The large flat jack test (LFJ) can be used to determine specifically the elastic modulus.

The LFJ test consists in measuring the relative displacements of the walls of a thin slot opened in the rock mass by means of a disk saw with 1 m of diameter and uniformly pressurized by a large flat jack with thin deformable plates, which contains inside four displacement transducers.

The results of this test have proven to be reliable over several decades of application. However, this test requires a careful interpretation of the results due to the type of loading that it applies on the rock mass and to the shape of the flat jack. Recently, with the aim of improving the understanding of the behavior of the rock mass during the test and to upgrade the existing model, a new tridimensional numerical model has been developed by the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) for interpretation of the test results.

This work explores the potential offered by this model, through the simulation of all test stages (slot cutting and slot loading) of real test cases, studied and not yet studied by previous models. In parallel, calculations for new interpretation parameters have been performed. This work concludes with a study about the implications of new modeling solutions.



**Keywords:** Rock masses; Deformability; Tridimensional numerical model; *In situ* tests

# ÍNDICE GERAL

**Página**


1. INTRODUÇÃO ..... 1
1.1. Enquadramento e justificação da investigação ..... 1
1.2. Objectivos da dissertação ..... 2
1.3. Estrutura da dissertação ..... 2
2. DEFORMABILIDADE DOS MACIÇOS ROCHOSOS ..... 5
2.1. Distinção entre “maciço rochoso” e “material rocha” ..... 5
2.2. Factores a considerar na avaliação da deformabilidade dos maciços rochosos ..... 9
2.2.1. Anisotropia ..... 9
2.2.2. Não-linearidade ..... 11
2.2.3. Heterogeneidade ..... 14
2.2.4. Efeito do tempo ..... 15
2.2.5. Temperatura ..... 16
2.2.6. Teor de humidade ..... 16
2.3. Ensaios *in situ* para determinação da deformabilidade ..... 17
2.3.1. Ensaios em furo de sondagem ..... 18
2.3.2. Ensaios em superfícies do maciço rochoso ..... 23
3. ENSAIO DE MACACOS PLANOS DE GRANDE ÁREA ..... 27
3.1. Descrição geral do ensaio ..... 27
3.2. Equipamento de ensaio ..... 27
3.3. Escolha e preparação do local de ensaio ..... 34
3.4. Técnica de ensaio ..... 37
3.5. Resultados do ensaio ..... 38
3.6. Interpretação dos resultados do ensaio ..... 40
3.6.1. Importância da fenda de tracção ..... 40
3.6.2. Cálculo do módulo de elasticidade ..... 44
3.6.3. Cálculo dos parâmetros de fluência ..... 47
3.6.4. Determinação do estado de tensão inicial ..... 48
4. MODELAÇÃO DO ENSAIO DE MACACOS PLANOS DE GRANDE ÁREA ..... 51
4.1. Introdução ..... 51
4.2. Modelo de cálculo ..... 52
4.2.1. Aspectos gerais ..... 52

4.2.2. Malha local ..... 54
4.2.3. Malha global ..... 59
4.3. Simulação de um ensaio cíclico com dois macacos planos ..... 60
4.3.1. Características do cálculo ..... 60
4.3.2. Simulação da escavação dos rasgos ..... 61
4.3.3. Simulação da pressurização dos rasgos ..... 63
4.3.4. Cálculo do módulo de elasticidade ..... 72
4.3.5. Cálculo da tensão inicial ..... 73
5. APLICAÇÕES DO MODELO INTERPRETATIVO ..... 75
5.1. Cálculos para interpretação dos ensaios ..... 75
5.1.1. Influência da tensão inicial na profundidade da fenda ..... 75
5.1.2. Metodologia para análise de resultados ..... 76
5.1.3. Determinação da profundidade da fenda ..... 77
5.1.4. Determinação do módulo de elasticidade ..... 84
5.2. Análise da influência da geometria dos rasgos e do carregamento ..... 87
5.2.1. Influência do número de rasgos e do carregamento aplicado ..... 87
5.2.2. Influência da inclinação dos rasgos ..... 93
5.3. Análise da influência das condições de fronteira ..... 101
5.3.1. Situações consideradas ..... 101
5.3.2. Influência nos deslocamentos verticais ..... 102
5.3.3. Influência na profundidade da fenda ..... 109
5.4. Comparação com os resultados do modelo original ..... 111
6. CONCLUSÕES ..... 117
6.1. Conclusões e contribuições ..... 117
6.2. Desenvolvimentos futuros ..... 118
BIBLIOGRAFIA ..... 119
ANEXO A – Ábacos ..... 121
ANEXO B – Constantes dos macacos planos ..... 139

# ÍNDICE DE FIGURAS

**Página**


2.1. Exemplo de uma falha ..... 5

2.2. Exemplo de diáclases ..... 6

2.3. Exemplo de estratificação ..... 6

2.4. Clivagem num maciço rochoso ..... 7

2.5. Ruínas da barragem de Malpasset ..... 7

2.6. Barragem de Vajont ..... 8

2.7. Estruturas de maciços rochosos ..... 10

2.8. Variação direccional da deformabilidade em amostras de xisto ..... 10

2.9. Modelo de maciço rochoso com superfícies de descontinuidade ..... 11

2.10. Diagrama típico da variação da extensão axial e da extensão transversal num ensaio de compressão uniaxial ..... 12

2.11. Diagrama típico da variação de volume do provete de ensaio, do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade num ensaio de compressão uniaxial ..... 12

2.12. Evolução da permeabilidade num ensaio de compressão uniaxial ..... 14

2.13. Encosta na praia do Telheiro ..... 14

2.14. Diagrama das várias fases que compõem a fluência nos materiais rochosos ..... 15

2.15. Variação da resistência à compressão com a alteração da velocidade de incremento de carga ..... 16

2.16. Evolução do módulo de elasticidade em função do volume ensaiado ..... 18

2.17. Dilatómetro a ser inserido num furo de sondagem ..... 19

2.18. Esquema do equipamento de ensaio e modelo de pressurização do dilatómetro ..... 20

2.19. Exemplo de sequência de ensaio com dilatómetro ..... 21

2.20. Diagrama típico de um ensaio com dilatómetro ..... 21

2.21. Macaco para furos na variante *Goodman* ..... 22

2.22. Esquema do equipamento de ensaio e modelo de pressurização do ensaio *Goodman jack* ..... 23

2.23. Ensaio de carga em placa aplicado numa galeria de prospecção para a exploração hidroeléctrica de Tienlun (Taiwan) ..... 24

3.1. Equipamento de abertura dos rasgos de ensaio ..... 28

3.2. Macaco plano de grande área ..... 28

3.3. Macaco plano ainda não soldado ..... 29

3.4. Unidades de leitura ..... 29

3.5. Defórmetro ... 30
3.6. Elongâmetro a) e comparador b) para medição da variação de distância entre marcas ... 30
3.7. Bomba hidráulica manual ... 31
3.8. Quadro de suporte e motor hidráulico ... 32
3.9. Conjunto motor eléctrico e bomba hidráulica ... 32
3.10. Caroteadora ... 33
3.11. Serra de corte ... 33
3.12. Superfície de ensaio ... 34
3.13. Escavação do furo central ... 35
3.14. Aspecto do interior dos furos centrais ... 35
3.15. Tarolos provenientes dos furos A e B ... 36
3.16. Medição da distância entre marcas ... 36
3.17. Abertura do rasgo de ensaio ... 37
3.18. Cronograma de um ensaio de macacos planos de grande área ... 38
3.19. Resultados dos defórmetros de um macaco plano e dos elongâmetros aplicados sobre a superfície do maciço rochoso ... 39
3.20. Modelo bidimensional de Pinto e Appleton (1976) ... 40
3.21. Ábaco para o cálculo da profundidade da fenda em função da tensão normal inicial e da pressão aplicada para uma resistência à tracção nula ... 42
3.22. Ábaco para a determinação da profundidade da fenda em função da pressão aplicada, da resistência à tracção e da tensão normal inicial, num ensaio com dois macacos planos ... 43
3.23. Tabela de constantes calculadas a partir do modelo numérico de Pinto e Appleton ... 45
3.24. Gráfico final para interpretação de um ensaio LFJ ... 46
3.25. Representação da lei de fluência ... 48
3.26. Diagrama de pressão-deslocamento de um dos pares de marcas superficiais de um ensaio LFJ ... 49
4.1. Malha do modelo numérico tridimensional ... 52
4.2. Malhas para planos de ensaio inclinados ... 53
4.3. Condições de fronteira ... 54
4.4. Simulação da sequência de abertura dos rasgos ... 55
4.5. Localização dos defórmetros e dos alinhamentos ... 56
4.6. Grupos da malha local ... 56
4.7. Interface ... 57
4.8. Divisões da interface ... 57
4.9. Dimensões da malha global ... 59
4.10. Grupos da malha global ... 59
4.11. Posicionamento do alinhamento A, dos defórmetros e dos elongâmetros ... 60

4.12. Tensões verticais após a escavação do primeiro furo central ....61
4.13. Tensões verticais após a abertura do primeiro rasgo ....61
4.14. Tensões verticais após a abertura do segundo rasgo ....62
4.15. Tensão normal ao plano de ensaio durante a abertura dos rasgos ....62
4.16. Deslocamentos verticais durante o ensaio....64
4.17. Tensões verticais durante o ensaio....65
4.18. Tensão normal à interface durante o ensaio....66
4.19. Evolução do estado de tensão normal à interface durante o ensaio ....67
4.20. Deslocamentos normais ao plano dos rasgos ....67
4.21. Evolução da tensão normal à interface durante o troço de carga do primeiro ciclo ....68
4.22. Deslocamentos totais nos pontos correspondentes aos defórmetros de um dos macacos planos....69
4.23. Diagrama qualitativo de pressão *versus* deslocamento num qualquer defórmetro....69
4.24. Tensão normal à interface para pressões do ramo de carga e de descarga nos quatro ciclos....71
4.25. Comparação entre tensões normais de 1ª carga e de descarga....71
4.26. Variação do módulo de elasticidade calculado sem a correcção do efeito da fenda de tracção....73
4.27. Deslocamentos nas marcas de um dos macacos planos durante a fase de escavação e pressurização ....74
5.1. Superfície tridimensional de representação da expressão (17), para a combinação de dois macacos planos sem inclinação....79
5.2. Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para a combinação de dois macacos planos sem inclinação ....81
5.3. Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para várias profundidades de fenda, para a combinação de dois macacos planos sem inclinação....82
5.4. Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para a combinação de dois macacos planos sem inclinação ....83
5.5. Metodologia de determinação das constantes a partir do modelo....84
5.6. Evolução das constantes em cada defórmetro ou elongâmetro em função da profundidade da fenda de tracção para a combinação de dois macacos planos sem inclinação do plano dos rasgos ....86
5.7. Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 0$ para algumas das combinações calculadas ....88
5.8. Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 1$ para algumas das combinações calculadas....88
5.9. Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 2$ para algumas das combinações calculadas....89
5.10. Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 4$ para algumas das combinações calculadas....89

5.11. Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 8$ para algumas das combinações calculadas ..... 89

5.12. Tensões normais à interface para uma relação de $p/\sigma_{zz} = 4$ e $\sigma_t/\sigma_{zz} = 0$, para a combinação de um macaco plano e dois rasgos ..... 90

5.13. Tensões normais à interface para uma relação de $p/\sigma_{zz} = 4$ e $\sigma_t/\sigma_{zz} = 0$, para a combinação de um macaco plano e um rasgo ..... 90

5.14. Tensões verticais para a combinação de um macaco plano e um rasgo ..... 91

5.15. Tensões verticais para a combinação de dois macacos planos ..... 91

5.16. Perspectiva do interior da malha do modelo, com a representação do volume onde a tensão principal mínima excedeu em 20% a tensão inicial, para a combinação de um macaco plano e um rasgo ..... 92

5.17. Perspectiva do interior da malha do modelo, com a representação do volume onde a tensão principal mínima excedeu em 20% a tensão inicial, para a combinação de dois macacos planos ..... 92

5.18. Deslocamentos verticais em rasgos inclinados a 0º, 10º e 20º ..... 95

5.19. Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos sem inclinação e segundo o alinhamento A ..... 96

5.20. Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos inclinados a 20º e segundo o alinhamento A ..... 96

5.21. Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos sem inclinação, segundo um plano perpendicular ao alinhamento A e coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2 ..... 97

5.22. Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos inclinados a 20º, segundo um plano perpendicular ao alinhamento A e coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2 ..... 97

5.23. Variação das constantes com a inclinação do plano dos rasgos (0º *versus* 10º) ..... 98

5.24. Variação das constantes com a inclinação do plano dos rasgos (0º *versus* 20º) ..... 98

5.25. Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 0$ ..... 99

5.26. Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 1$ ..... 99

5.27. Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 2$ ..... 99

5.28. Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 4$ ..... 99

5.29. Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 8$ ..... 100

5.30. Condições de apoio na superfície frontal do modelo, considerando apenas uma faixa de 3 m livres ..... 101

5.31. Deslocamentos verticais no modelo sem inclinação dos rasgos e sem restrição de deslocamentos normais e verticais no plano frontal ..... 103

5.32. Deslocamentos verticais no modelo sem inclinação dos rasgos e com restrição de deslocamentos normais e verticais no plano frontal .....103

5.33. Deslocamentos segundo o alinhamento A dos elementos da superfície da malha para a combinação de dois macacos planos sem inclinação com restrição dos deslocamentos na superfície da malha .....104

5.34. Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos sem inclinação com restrição dos deslocamentos na superfície da malha, segundo um plano perpendicular ao alinhamento A coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2.....104

5.35. Variação das constantes com a aplicação da restrição de deslocamentos no plano frontal em rasgos não-inclinados.....105

5.36. Deslocamentos verticais no modelo com inclinação dos rasgos e sem restrição de deslocamentos normais e verticais no plano frontal .....106

5.37. Deslocamentos verticais no modelo com inclinação dos rasgos, com restrição de deslocamentos normais e verticais no plano frontal .....106

5.38. Deslocamentos segundo o alinhamento A dos elementos da superfície da malha para a combinação de dois macacos planos, com inclinação de 20º e com restrição dos deslocamentos na superfície da malha .....107

5.39. Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos com inclinação de 20º e com restrição dos deslocamentos na superfície da malha, segundo um plano perpendicular ao alinhamento A coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2.....107

5.40. Variação das constantes com a aplicação da restrição de deslocamentos no plano frontal para o caso de rasgos inclinados a 10º .....108

5.41. Variação das constantes com a aplicação da restrição de deslocamentos no plano frontal para o caso de rasgos inclinados a 20º .....108

5.42. Progressão da fenda de tracção para a combinação de dois macacos não-inclinados com e sem restrição dos deslocamentos .....110

5.43. Progressão da fenda de tracção para a combinação de dois macacos planos com inclinação de 20º, com e sem restrição dos deslocamentos .....110

5.44. Progressão da fenda de tracção em modelos com e sem restrição dos deslocamentos..111

5.45. Diagrama comparativo de resultados de $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade para o modelo original e para o modelo tridimensional, para a combinação de dois e um macacos planos sem inclinação .....112

5.46. Diagrama comparativo da evolução das constantes utilizando o modelo original e o modelo tridimensional para a combinação de dois macacos planos sem inclinação .....114

5.47. Diagrama comparativo da evolução das constantes utilizando o modelo original e o modelo tridimensional para a combinação de um macaco plano sem inclinação .....115

5.48. Condições de fronteira consideradas no modelo tridimensional e no modelo original .....116

# ÍNDICE DE QUADROS

**Página**

2.1. Deformabilidade do material rocha *versus* deformabilidade do maciço rochoso.....9

2.2. Ensaios *in situ* para o estudo da deformabilidade.....17

5.1. Situações para as quais foram realizados cálculos .....78

5.2. Condições iniciais do modelo, utilizadas para a realização de cálculos para as diferentes combinações de macacos planos .....79

# ABREVIATURAS

LFJ – *Large Flat Jack Test*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PNBEPH – Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico

ELFJ – *Extra Large Flat Jack Test*

LAB – Ensaios de laboratório

BHD – Dilatómetro na versão LNEC

# SIMBOLOGIA

## Alfabeto latino

$E_z$ – Módulo de elasticidade para um carregamento segundo o eixo z

$E_1$ – Módulo de elasticidade segundo a direcção de carregamento 1

$E_2$ – Módulo de elasticidade segundo a direcção de carregamento 2

$E_3$ – Módulo de elasticidade segundo a direcção de carregamento 3

$E_0$ – Módulo de elasticidade inicial

$E_\infty$ – Módulo de elasticidade para um tempo infinito

$E_r$ – Módulo de elasticidade do material rocha

$E_m$ – Módulo de elasticidade do maciço rochoso

$p_c$ – Pressão de cancelamento

$k_c$ – Coeficiente de determinação da tensão inicial

t – Tempo de aplicação da carga

p – Pressão aplicada pelos macacos planos

A – Constante com a dimensões de um tempo

$k_n$ – Rigidez normal da interface

e – Espessura do rasgo

f(h) – Função da profundidade da fenda associada à pressão aplicada pelos macacos planos

g(h) – Função da profundidade da fenda associada à tensão inicial normal ao plano de ensaio

$k_i$ – Constante do macacos plano no local de medição dos deslocamentos i

$E_{medido}$ – Módulo de elasticidade medido

$E_{real}$ – Módulo de elasticidade real

## Alfabeto grego

α – Inclinação do corte do provete de ensaio

v – Coeficiente de Poisson

$\Delta V$ – Variação do volume do provete

$\varepsilon_t$ – Extensão transversal à direcção de aplicação do carregamento

$\varepsilon_l$ – Extensão sob a direcção de aplicação do carregamento

$\sigma$ – Tensão aplicada

$\sigma_c$ – Tensão de cedência

$\sigma_t$ – Resistência à tracção do maciço rochoso

$\sigma_{zz}$ – Tensão normal ao plano do rasgos

$\varepsilon$ – Extensão

$\varepsilon_0$ – Extensão para um tempo zero

$\varepsilon_p$ – Extensão com deslocamentos permanentes

$\delta_i$ – Deslocamento medido no local i

$\Delta p$ – Variação da pressão aplicada

$\sigma_1$ – Tensão no limite da fenda devido à pressurização dos macacos planos

$\sigma_2$ – Tensão no limite da fenda devido à tensão inicial normal aos rasgos

$\Psi(h)$ – Função da profundidade da fenda de substituição a $g(h)/f(h)$

$\varphi(h)$ – Função da profundidade da fenda de substituição a $1/f(h)$

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento e justificação da investigação

O estudo dos parâmetros de dimensionamento em obras de grande magnitude, tais como vias de comunicação, barragens e obras subterrâneas realizadas em maciços rochosos, enfrenta, a par de todas as grandes obras geotécnicas, uma dificuldade comum, que consiste na representatividade dos dados recolhidos pela campanha de prospecção. Nos maciços rochosos esta dificuldade é agravada pela existência de descontinuidades que podem alterar substancialmente estes parâmetros.

A correcta caracterização dos maciços rochosos reveste-se de especial importância neste tipo de obras de grande magnitude, uma vez que o risco socioeconómico a elas associado obriga à adopção de padrões de segurança mais elevados do que na generalidade das estruturas.

A presença de descontinuidades em maciços rochosos com boas características mecânicas aparentes, torna imperioso o seu estudo através de ensaios *in situ*. Estes, ao fornecerem parâmetros mais representativos, permitem elaborar modelos de comportamento do maciço rochoso quando solicitados pelas acções da obra em projecto.

O ensaio de macacos planos de grande área (LFJ – *Large Flat Jack*) é um ensaio *in situ* que permite solicitar elevados volumes do maciço rochoso e representou à época do seu aparecimento, na década de 60, um avanço muito importante na obtenção de parâmetros representativos da deformabilidade em maciços rochosos. Este ensaio possui particularidades que implicam a utilização de modelos interpretativos dos seus resultados, que desde o seu aparecimento têm vindo a ser melhorados de modo a permitirem interpretar com maior rigor uma maior variedade de condições de ensaio.

No âmbito de estudos de deformabilidade de maciços rochosos desenvolvidos pelo LNEC, para as barragens integradas no Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico (PNBEPH), foi desenvolvido recentemente um modelo numérico com o objectivo de melhorar a metodologia de interpretação do ensaio.

O presente trabalho concentrou-se na exploração das potencialidades do modelo, nomeadamente para a compreensão das particularidades do ensaio e o cálculo dos parâmetros necessários para a sua interpretação.

## 1.2. Objectivos da dissertação

Este trabalho pretende contribuir para a melhoria do conhecimento do comportamento dos maciços rochosos quando submetidos a um ensaio de deformabilidade pelo método dos macacos planos de grande área.

Os objectivos desta dissertação são:

- Evidenciar as particularidades do estudo da deformabilidade de maciços rochosos e a sua importância no caso de grandes obras de engenharia civil.
- Analisar os ensaios *in situ* mais comuns para estudo da deformabilidade e, com especial detalhe, o ensaio LFJ.
- Evidenciar as características e as potencialidades do modelo numérico utilizado para simulação do ensaio LFJ.
- Explorar as potencialidades do modelo numérico através da simulação de casos práticos com cálculo dos parâmetros interpretativos associados.

## 1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por seis capítulos. À presente Introdução segue-se o Capítulo 2 em que se expõem as particularidades presentes no estudo da deformabilidade em maciços rochosos e se apresentam os ensaios mais comuns para a sua caracterização.

No Capítulo 3 expõe-se o procedimento experimental e o método de interpretação dos resultados fornecidos pelo ensaio LFJ.

No Capítulo 4 apresenta-se o modelo numérico e os resultados de cálculos realizados com o objectivo de compreender o processo de carregamento imposto aos maciços rochosos pelos ensaios LFJ.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados dos cálculos realizados com o modelo, nomeadamente os realizados com o objectivo de calcular parâmetros para a interpretação de casos práticos e, ainda, os realizados com o objectivo de estudar as implicações que novas soluções de modelação a implementar acarretam.

Esta dissertação conclui-se, no Capítulo 6, com a apresentação das conclusões e contribuições atingidas com a sua realização. São, ainda, propostos trabalhos futuros para a melhoria do modelo interpretativo do ensaio LFJ.

# 2. DEFORMABILIDADE DOS MACIÇOS ROCHOSOS

## 2.1. Distinção entre “maciço rochoso” e “material rocha”

O ciclo geológico é composto por um conjunto de fenómenos físicos e químicos que atribuem propriedades muito variadas aos maciços rochosos. A acção de alguns destes fenómenos leva a que os maciços rochosos sejam meios descontínuos, constituídos por uma matriz rochosa e superfícies de descontinuidade.

A classificação dos maciços rochosos é uma área da Geologia, que a realiza de acordo com as propriedades do maciço (génese, minerais, alteração, etc.). A parte contínua dos maciços rochosos designa-se usualmente por material rocha e consiste no material delimitado pelas superfícies de descontinuidade, também designadas superfícies de compartimentação. As superfícies de compartimentação podem ser de vários tipos: falhas, diáclases, estratificação e clivagem.

As falhas são superfícies de rotura nas quais se verifica deslocamento de um bordo da falha em relação ao outro. Na Figura 2.1 apresenta-se um exemplo de uma falha.

**Figura 2.1 – Exemplo de uma falha [1]**

As diáclases são superfícies de rotura nas quais não se verifica deslocamento de um bordo em relação a outro. A Figura 2.2 mostra um exemplo de diáclases.

**Figura 2.2 – Exemplo de diáclases [2]**

A estratificação é constituída por superfícies de divisão de estratos rochosos. A Figura 2.3 mostra uma imagem do Estreito de Corinto (Grécia), onde as encostas das margens exibem diferentes estratos rochosos.

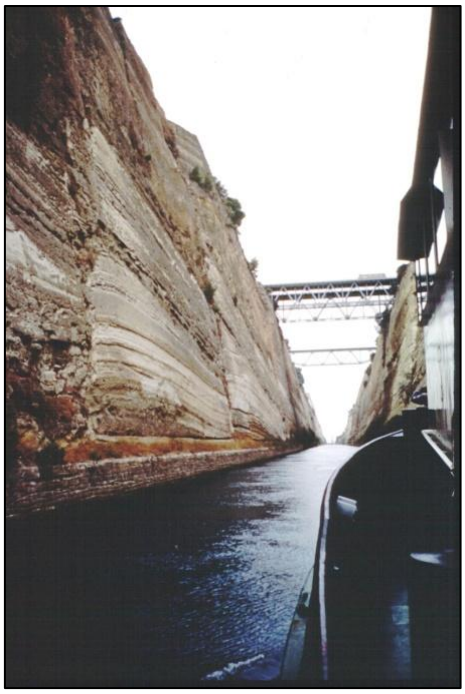


**Figura 2.3 – Exemplo de estratificação [3]**

A clivagem é constituída por superfícies em que a resistência ao corte é muito baixa quando comparada com a de superfícies vizinhas. A Figura 2.4 apresenta um maciço rochoso com clivagem.

**Figura 2.4 – Clivagem num maciço rochoso [4]**

A compartimentação dos maciços rochosos tem reflexo nos domínios de interesse para a Engenharia Civil, nomeadamente no que diz respeito ao estudo da deformabilidade, que constitui o objecto deste trabalho. Com efeito, a deformabilidade do maciço rochoso é o resultado da contribuição do material rocha e das superfícies de descontinuidade.

A necessidade do estudo das características de resistência e deformabilidade do material rocha e das superfícies de descontinuidade pode ser evidenciada pelos acidentes onde, embora o material rocha oferecesse características adequadas para o suporte, ocorreu colapso devido à existência de superfícies de compartimentação desfavoráveis. São disso exemplo o colapso da barragem de Malpasset (França, 1959) (Figura 2.5) e o deslizamento de uma das encostas da albufeira da barragem de Vajont (Itália, 1963) (Figura 2.6). O primeiro deveu-se ao desenvolvimento de um mecanismo de rotura associado a uma falha no maciço rochoso de fundação e o segundo deveu-se ao desenvolvimento de um mecanismo de rotura associado à presença de um estrato margoso na base de uma das encostas que, ao deslizar para a albufeira, gerou uma onda que galgou o coroamento em cerca de 100 m.

**Figura 2.5 – Ruínas da barragem de Malpasset [5]**

**Figura 2.6 – Barragem de Vajont [5]**

Em virtude da compartimentação do maciço rochoso, a sua deformabilidade pode, por vezes, afastar-se bastante da deformabilidade do material rocha. Este facto é evidente no Quadro 2.1, no qual são comparados os módulos de elasticidade do maciço rochoso (estudados a partir de ensaios *in situ*) com os módulos de elasticidade do material rocha (geralmente estudados a partir de ensaios de laboratório), para diferentes tipos de rocha e em locais destinados à implantação de barragens. O quociente entre o módulo de elasticidade do material rocha ($E_r$) e o módulo de elasticidade do maciço rochoso ($E_m$), elucidativo da disparidade que ambos os módulos podem atingir, encontra-se ilustrado graficamente na última coluna do Quadro 2.1.

A necessidade do estudo da deformabilidade do maciço rochoso em paralelo com o estudo da deformabilidade do material rocha está implícita na realização de ensaios de laboratório e ensaios *in situ*. A realização de ensaios *in situ* é geralmente o meio mais fiável para o estudo da deformabilidade do maciço rochoso, uma vez que amostras para o estudo em laboratório, representativas da interacção entre material rocha e superfícies de compartimentação teriam de ter dimensões tais, que os tornam inviáveis. No entanto, devido ao seu elevado custo, os ensaios *in situ* apenas são realizados em estruturas importantes em fase de projecto. Quando não é possível realizá-los, é frequente recorrer-se a correlações empíricas que relacionam o módulo de elasticidade da rocha intacta com o do maciço, mediante a consideração das características de compartimentação [6].

**Quadro 2.1 – Deformabilidade do material rocha *versus* deformabilidade do maciço rochoso (adaptado de [6])**

| Tipo de rocha | Local | Módulo de elasticidade (MPa) | | $\log_{10}(E_r/E_m)$ |
|---|---|---|---|---|
| | | Rocha $E_r$ | Maciço $E_m$ | |
| Granito | Alvarenga | 5200 | 4900 | |
| Granito | Alto Rabagão | 260 | 90 | |
| Granito | Alto Lindoso | 3200 | 600 | |
| Granito | Vilarinho das Furnas | 4300 | 150 | |
| Gnaisee | Cabora-Bassa * | 8000 | 6500 | |
| Xisto | Cedillo (paralelo xistosidade) ** | 9000 | 4000 | |
| Xisto | Cedillo (perpendicular xistosidade) ** | 6500 | 1200 | |
| Xisto | Alcântara (paralelo xistosidade) ** | 14000 | 500 | |
| Conglomerado | Avlaki *** | 6000 | 600 | |
| Grés | Cambambe **** | 6500 | 860 | |
| Siltito | Avlaki *** | 1500 | 150 | |
| Argilito | Karun ***** | 1150 | 700 | |
| Marga | Karun ***** | 4700 | 4300 | |
| Calcário | Karun ***** | 7000 | 6000 | |
| Calcário | Karun ***** | 5000 | 750 | |
| Quartzito | Alvito | 4300 | 40 | |
| Quartzito | Alvito | 3300 | 700 | |

* Moçambique; ** Espanha; *** Grécia; **** Angola; ***** Irão.

## 2.2. Factores a considerar na avaliação da deformabilidade dos maciços rochosos

A deformabilidade dos maciços rochosos pode ser influenciada por diversos factores que devem ser tidos em consideração quando se pretende efectuar a sua caracterização. Nas secções seguintes apresenta-se a influência dos principais factores a considerar.

### 2.2.1. Anisotropia

A anisotropia corresponde à variação de uma propriedade com a direcção num determinado ponto de um corpo. A deformabilidade dos maciços rochosos apresenta frequentemente esta característica, sendo mais evidente nos maciços de origem sedimentar ou metamórfica, em que a anisotropia resulta de estratificação e de xistosidade. Na Figura 2.7 encontram-se representados quatro modelos estruturais típicos dos maciços rochosos.

A regularidade da disposição dos constituintes da matriz rochosa é o resultado da acção de um conjunto de processos geológicos. Estes processos geológicos ocorrem, no caso das rochas ígneas, ao dar-se a solidificação do magma e, no caso das rochas

sedimentares, ao depositarem-se os constituintes. Posteriormente ou simultaneamente, ocorre a acção metamórfica, em particular a acção plástica, que confere aos constituintes formas compatíveis com as direcções principais de tensão [8].

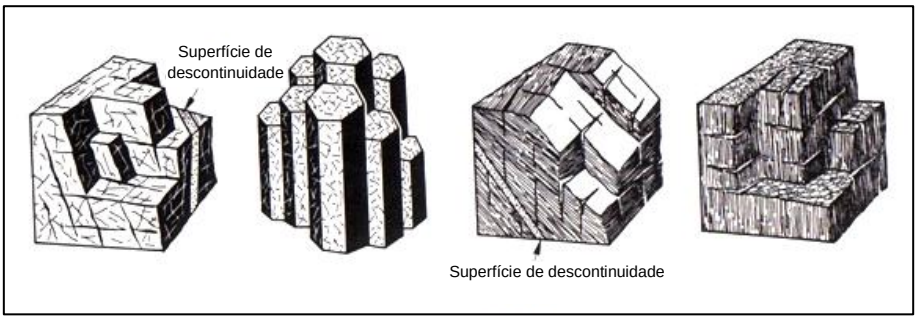



**Figura 2.7 – Estruturas de maciços rochosos (adaptado de [7])**

A anisotropia pode ser estudada na componente devida ao material rocha ou na componente devida ao maciço rochoso. A componente devida ao material rocha pode ser estudada através da análise da estrutura da matriz rochosa, enquanto a componente devida ao maciço rochoso pode ser estudada através da análise das maiores superfícies de descontinuidade do maciço rochoso.

Na Figura 2.8 é apresentada a variação da deformabilidade com a direcção de aplicação da carga num ensaio de compressão uniaxial sobre amostras de um xisto.

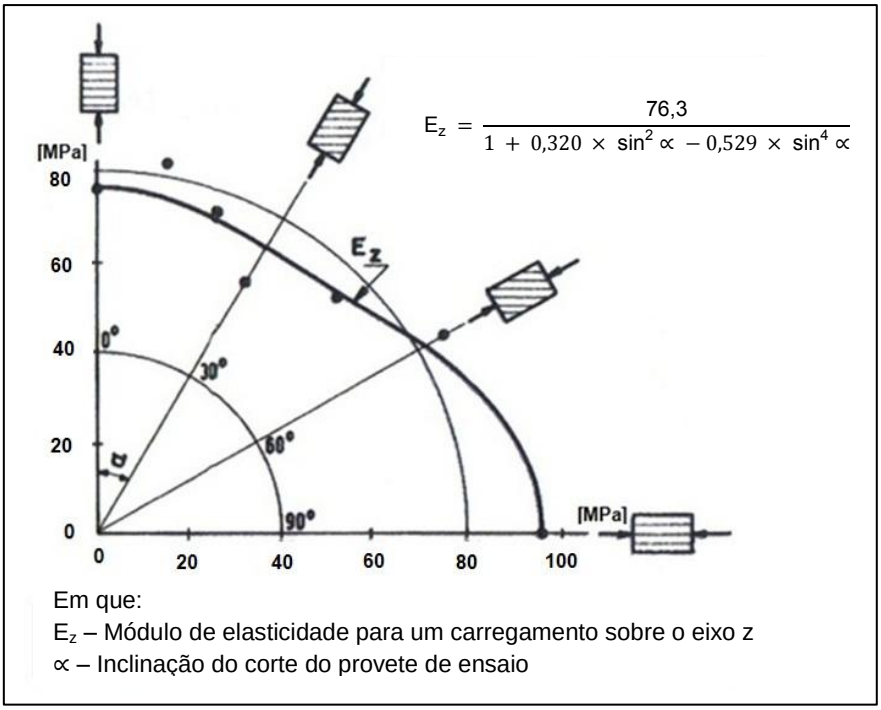
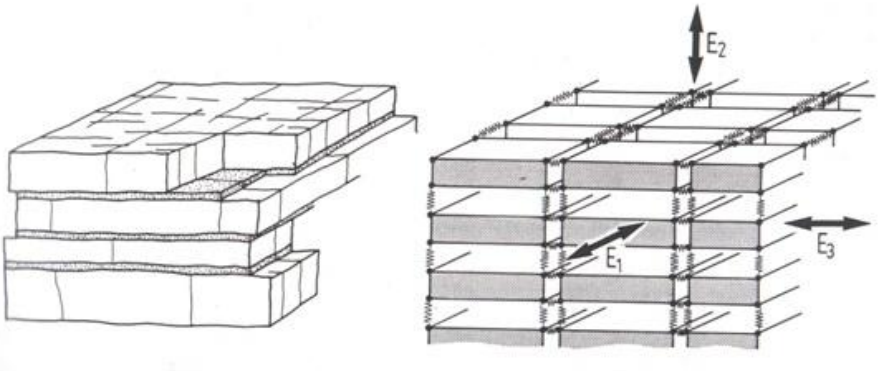



**Figura 2.8 – Variação direccional da deformabilidade em amostras de xisto (adaptado de [8])**

Na Figura 2.9 é possível identificar, à esquerda, um maciço rochoso com superfícies de descontinuidade. A existência destas superfícies está representada no modelo de deformabilidade à direita na mesma figura.

O estudo da anisotropia também apresenta limitações de representatividade quando realizado em laboratório. A realização de ensaios *in situ* acarreta geralmente elevados custos devido a envolver a execução de múltiplos ensaios a que correspondem diferentes orientações.



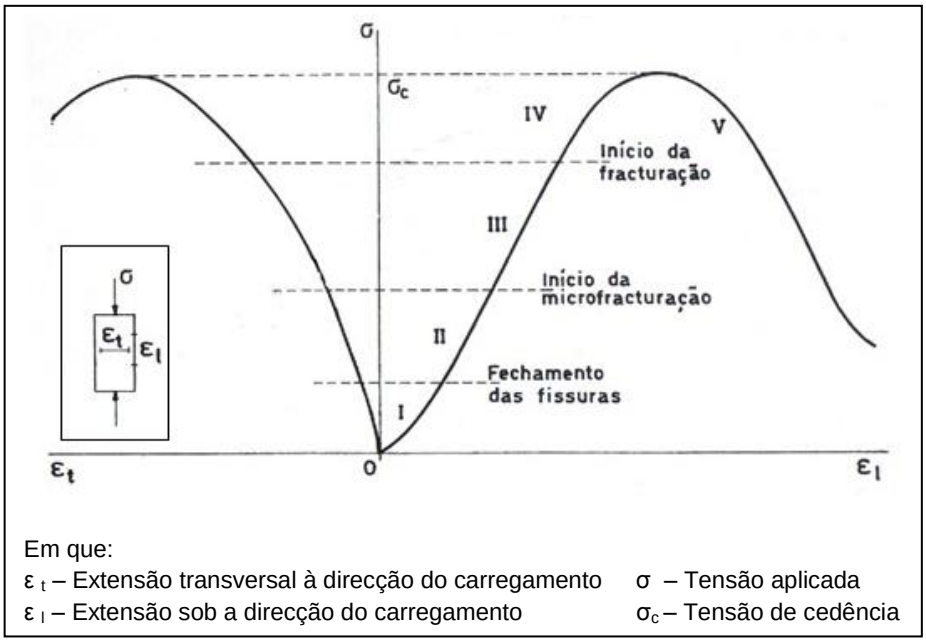

Em que:
$E_1$ , $E_2$ e $E_3$ – Módulos de elasticidade do maciço em planos ortogonais

**Figura 2.9 – Modelo de maciço rochoso com superfícies de descontinuidade (adaptado de [7])**

## 2.2.2. Não-linearidade

A não-linearidade física da resposta do material rocha é identificável pela inexistência de uma relação constante entre a tensão aplicada e a extensão resultante. A não-linearidade no material rocha é observável através da realização de ensaios laboratoriais de carga uniaxial e triaxial. É também possível verificar a existência da não-linearidade em maciços rochosos através de ensaios *in situ* com carga estática [6].

A não-linearidade do material rocha deve-se ao facto de este ser de origem natural, sendo o resultado de um conjunto de processos que lhe induziram imperfeições. As imperfeições estão materializadas em poros, diáclases, fracturas e vazios, cujo colapso durante o incremento de tensão origina modificações na estrutura, observáveis na curva de tensão-deformação [6]. As Figuras 2.10 e 2.11 apresentam diagramas típicos obtidos no ensaio de compressão uniaxial de um provete de rocha, no qual se identificam cinco trechos com comportamento diferenciado. A Figura 2.10 permite observar evolução da extensão axial e da extensão transversal ao longo dos cinco trechos.




Em que:

$\varepsilon_t$ – Extensão transversal à direcção do carregamento

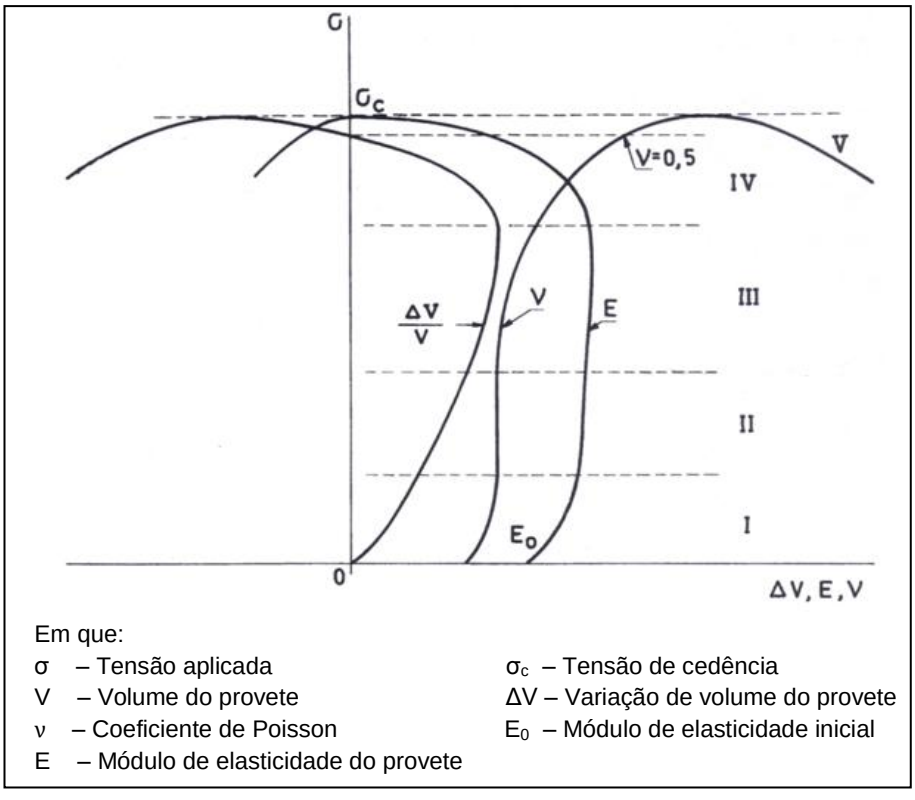
$\varepsilon_l$ – Extensão sob a direcção do carregamento

$\sigma$ – Tensão aplicada

$\sigma_c$ – Tensão de cedência

**Figura 2.10 – Diagrama típico da variação da extensão axial e da extensão transversal num ensaio de compressão uniaxial (adaptado de [6])**

A Figura 2.11 permite observar a variação de volume, a variação do coeficiente de Poisson e a variação do módulo de elasticidade ao longo dos cinco trechos.




Em que:

$\sigma$ – Tensão aplicada

V – Volume do provete

$\nu$ – Coeficiente de Poisson

E – Módulo de elasticidade do provete

$\sigma_c$ – Tensão de cedência

$\Delta V$ – Variação de volume do provete

$E_0$ – Módulo de elasticidade inicial

**Figura 2.11 – Diagrama típico da variação de volume do provete de ensaio, do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade num ensaio de compressão uniaxial (adaptado de [6])**

Os trechos identificados com a numeração romana nas Figuras 2.10 e 2.11 correspondem a alterações típicas nos diagramas de um ensaio de compressão uniaxial. Com efeito, as modificações observadas no primeiro trecho das curvas de tensão-deformação (fase I) devem-se ao fecho progressivo das fissuras, ou, no caso de rochas sedimentares, à quebra de ligações ténues entre grãos. Neste trecho é possível observar um aumento progressivo do módulo de elasticidade resultante do referido fechamento das fissuras. No segundo trecho (fase II) observa-se um andamento rectilíneo, a que corresponde o período em que a totalidade do esqueleto sólido da rocha suporta a tensão aplicada, estando associado um módulo de elasticidade constante. No terceiro trecho (fase III) observa-se a continuação do andamento rectilíneo, mas ocorre já um aumento das deformações transversais devido à microfracturação. No quarto trecho (fase IV) observa-se a intensificação do processo de fracturação iniciado no terceiro trecho com ocorrência de escorregamentos que resultam numa diminuição do módulo de elasticidade. O quinto trecho (fase V) inicia-se com o atingir de um valor de 0,5 para o coeficiente de Poisson e com o aumento de volume face ao volume inicial, ou seja, ocorre dilatância. Neste trecho atinge-se uma tensão máxima, denominada tensão de cedência, a partir da qual, geralmente, o provete "rompe" devido à sua natureza frágil. O andamento deste trecho é condicionado pela rigidez da máquina de ensaio, observando-se diminuições mais bruscas em máquinas mais deformáveis e menos bruscas em máquinas mais rígidas [6].

Sucintamente, é de referir a importância do processo de desenvolvimento da fracturação no estudo das condições hidrogeológicas de um maciço rochoso, uma vez que a fracturação influencia a permeabilidade, tal como mostra a Figura 2.12. Nesta figura, é possível visualizar que nos trechos I e II ocorre uma diminuição da permeabilidade face ao seu valor inicial devido ao fecho das fissuras e à diminuição da porosidade, surgindo um aumento da permeabilidade com o início da microfracturação, que se intensifica até à rotura [6].

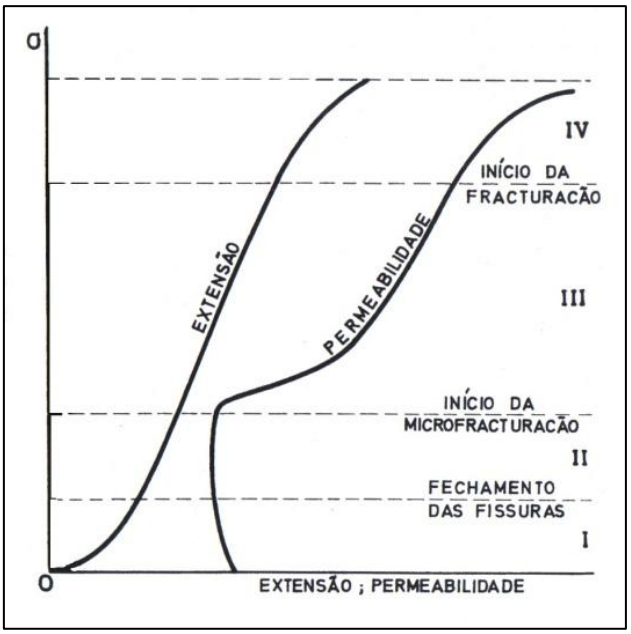



**Figura 2.12 – Evolução da permeabilidade num ensaio de compressão uniaxial (adaptado de [6])**

## 2.2.3. Heterogeneidade

A diversidade de factores envolvidos nos processos geológicos atribui ao meio rochoso características que podem mudar substancialmente de ponto para ponto. A Figura 2.13 ilustra este facto ao mostrar um talude de uma rocha sedimentar onde é possível observar diferentes estratos com várias orientações.

**Figura 2.13 – Encosta na praia do Telheiro (Algarve) [9]**

A existência de heterogeneidade implica a caracterização das diferentes formações rochosas ocorrentes. A compreensão da heterogeneidade de um maciço rochoso permite ajustar a amostragem com as campanhas de ensaios, de modo a que sejam obtidos dados

que fundamentem uma análise completa e precisa das características das diferentes formações ocorrentes na zona em estudo do maciço rochoso [6].

## 2.2.4. Efeito do tempo

A fluência corresponde à evolução das extensões no tempo sob um estado de tensão constante. A Figura 2.14 mostra as três fases em que a fluência das rochas pode ser dividida: a fase I corresponde à fluência retardada, a fase II à fluência constante e a fase III à fluência acelerada que culmina com a rotura. No que respeita ao comportamento da rocha em cada fase, este difere quanto à recuperação dos deslocamentos. Na fase I a diminuição da carga não produz deslocamentos permanentes, na fase II ocorre apenas uma recuperação parcial dos deslocamentos sofridos e na fase III apenas uma pequena parte dos deslocamentos é recuperada [8].

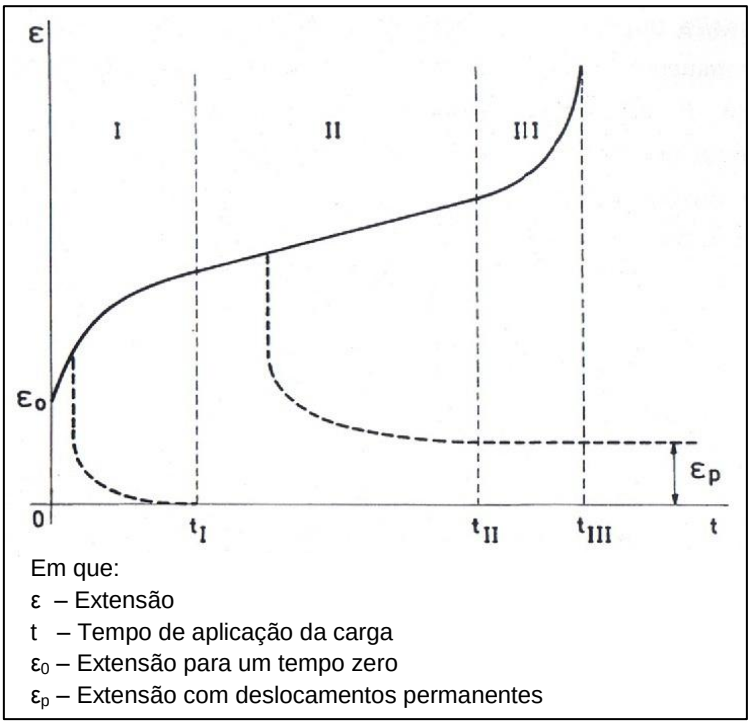



**Figura 2.14 – Diagrama das várias fases que compõem a fluência nos materiais rochosos (adaptado de [6])**

O estudo da fluência dos maciços rochosos pode ter importância em alguns tipos de rocha e para certos tipos de obras.

A relação entre a evolução das forças aplicadas no tempo e a correspondente medição das deformações influencia o diagrama de deformação, podendo os parâmetros de resistência variar substancialmente quando esta relação é modificada [8]. A Figura 2.15

ilustra a alteração da tensão de rotura com a velocidade de carga, verificando-se que a tensão de rotura aumenta com o aumento da velocidade de carga.

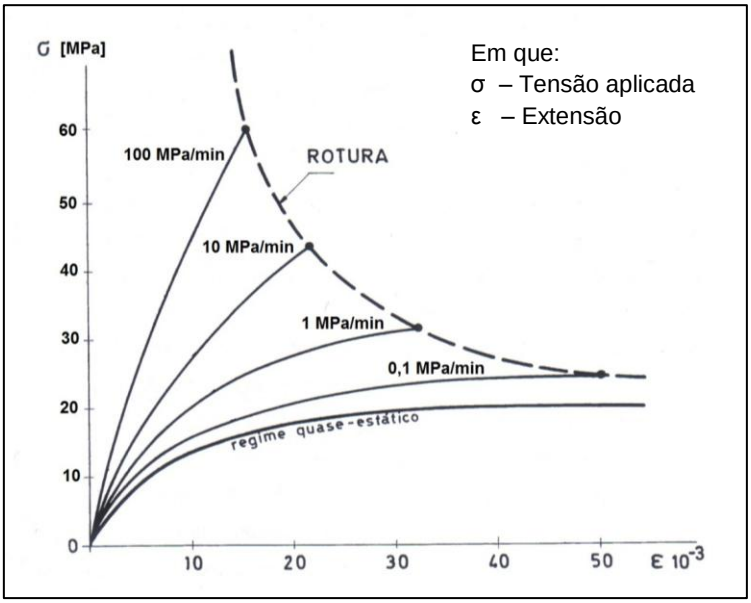



**Figura 2.15 – Variação da resistência à compressão com a alteração da velocidade de incremento de carga (adaptado de [10])**

## 2.2.5. Temperatura

O estudo do efeito da temperatura em maciços rochosos surge usualmente associado à fluência, uma vez que geralmente provoca efeitos semelhantes no estudo dos parâmetros de deformabilidade e resistência [8].

O estudo da temperatura assume uma importância fundamental na aplicação da mecânica das rochas no estudo dos fenómenos geológicos. A influência da temperatura no estudo da deformabilidade de maciços rochosos tem, também, especial relevo nas aplicações em que os maciços rochosos sejam expostos, por prolongados períodos de tempo, a temperaturas diferentes das pré-existentes, nomeadamente no caso do armazenamento de resíduos radioactivos [6].

## 2.2.6. Teor de humidade

O efeito do teor de humidade na deformabilidade de maciços rochosos está fundamentalmente associado ao tempo de actuação da carga. A sua contribuição manifesta-se através da alteração dos estados de tensão no maciço, uma vez que a presença de água

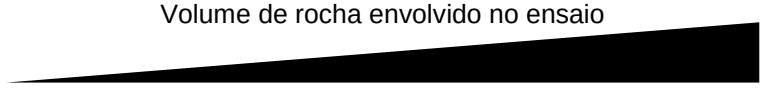
implica a existência de pressão intersticial. A componente pressão intersticial acumula em si uma componente da carga aplicada ao maciço que é tanto maior quanto mais rápido for o carregamento e/ou piores forem as condições de drenagem no seu interior [11].

## 2.3. Ensaios *in situ* para determinação da deformabilidade

A necessidade do estudo da deformabilidade de maciços rochosos através da realização de ensaios de laboratório e ensaios *in situ* originou o desenvolvimento de vários tipos de ensaio. Os ensaios de laboratório mais comuns para o estudo da deformabilidade são o ensaio de compressão uniaxial e o método de propagação de ondas sónicas. O ensaio de compressão uniaxial é fundamentalmente utilizado para determinar os parâmetros de deformabilidade e resistência. O ensaio de propagação de ondas sónicas permite, com base na teoria da elasticidade, através da medição da velocidade de propagação das ondas P e S determinar parâmetros de deformabilidade dinâmicos, em geral, superiores aos obtidos em ensaios estáticos [8].

Os ensaios *in situ* mais comuns para o estudo da deformabilidade são os apresentados no Quadro 2.2, onde os ensaios se encontram ordenados da esquerda para a direita, por ordem crescente de volume de maciço rochoso que permitem ensaiar. O ensaio *Extra Large Flat Jack* (ELFJ) indicado no quadro corresponde a uma variante do ensaio LFJ, na qual são utilizados macacos planos de ainda maior área.

**Quadro 2.2 – Ensaios *in situ* para o estudo da deformabilidade**

| Ensaios *in situ* | | | |
|---|---|---|---|
| Volume de rocha envolvido no ensaio  | | | |
| Ensaios em furos de sondagem | Ensaios de carga em placa | Ensaios em fenda aberta | Ensaios geofísicos |
| Dilatómetro | Placa rígida e flexível | LFJ | Ensaio de propagação de ondas sísmicas |
| Macacos para furos de sondagem | Carga radial | ELFJ | Ensaio de resistividade eléctrica |

O volume ensaiado, a heterogeneidade e as descontinuidades existentes podem, em combinação com o tipo de ensaio *in situ* adoptado, fazer variar significativamente os

parâmetros de deformabilidade obtidos [12]. Esta variação é ilustrada na Figura 2.16, que mostra o módulo de elasticidade (E) em função do volume de rocha ensaiado através de ensaios de laboratório e de dois tipos de ensaios *in situ*. Esta figura evidencia uma diferença significativa entre o módulo de elasticidade médio determinado através dos ensaios de laboratório (LAB) e os determinados por ensaios *in situ* (dilatómetro LNEC (BHD) e LFJ).

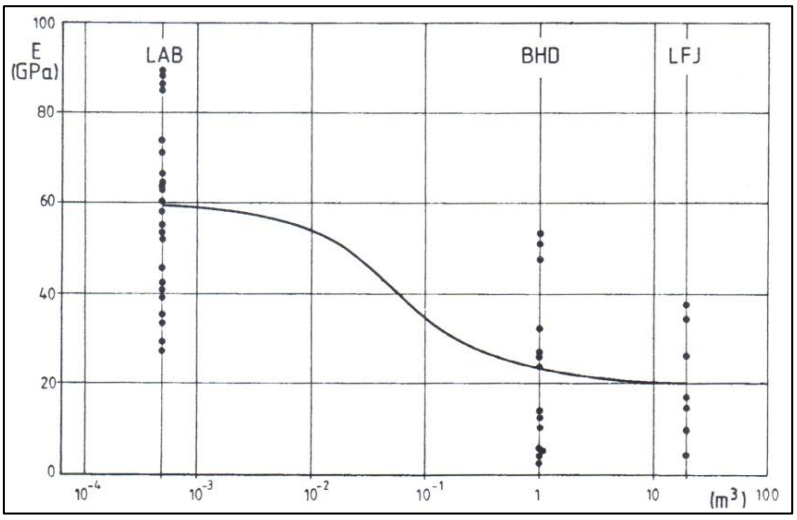



**Figura 2.16 – Evolução do módulo de elasticidade em função do volume ensaiado [12]**

Nos ensaios geofísicos, o tipo de acção aplicada permite ensaiar volumes de rocha muito superiores aos ensaios com aplicação de carga estática. Nestes últimos, o estudo de maiores volumes de rocha implica um elevado incremento da carga aplicada, aumentando significativamente os seus custos. Porém, é de referir que a precisão destes últimos é superior, uma vez que os seus resultados não implicam a utilização de correlações.

### 2.3.1. Ensaios em furo de sondagem

Os furos de sondagem permitem, com baixa perturbação, estudar os maciços rochosos a profundidades dificilmente acessíveis por outros meios. Os ensaios realizados no interior destes furos permitem, com relativa rapidez e economia, ensaiar diferentes locais e recolher amostras para ensaio em laboratório.

Os furos de sondagem são geralmente abertos com o auxílio de caroteadoras com dentes diamantados. A rotação é transmitida por um conjunto de varas ligadas a um motor e acompanhada de injecção de água para redução da temperatura gerada pelo atrito de corte. Os tarolos resultantes do corte permitem a reconstituição do perfil litológico, a visualização da qualidade do maciço atravessado e a recolha de amostras.

Os furos de sondagem permitem a introdução de equipamentos especificamente desenvolvidos para operar no seu interior, permitindo a medição de várias propriedades dos maciços rochosos.

Para a medição da deformabilidade no interior de furos de sondagem, existem dois tipos de equipamentos: os dilatómetros e os macacos para furos. Para cada um destes existem diversos aparelhos cujas diferenças residem no país de origem, no tipo de fluído utilizado para a pressurização, no método de medição de deslocamentos, no número de diâmetros de medição, no diâmetro do furo onde se aplicam, no comprimento de trecho de furo que permitem carregar, na pressão máxima que alcançam e na precisão que oferecem.

Seguidamente aborda-se o ensaio do tipo dilatómetro na sua variante dilatómetro LNEC e o ensaio do tipo macaco para furo na variante *Goodman*. A selecção destes ensaios justifica-se pelo facto de serem ensaios muito utilizados para a medição da deformabilidade de maciços rochosos. A Figura 2.17 mostra um dilatómetro a ser inserido no interior de um furo de sondagem e o equipamento de ensaio associado ao carregamento e medição.

**Figura 2.17 – Dilatómetro a ser inserido num furo de sondagem [13]**

## Dilatómetro

O dilatómetro, na variante desenvolvida pelo LNEC, é um instrumento constituído por um cilindro de aço, com 540 mm de comprimento, um diâmetro externo de 66 mm e uma espessura de parede de 10 mm envolvida por uma camisa de borracha com uma espessura de 4 mm. O seu diâmetro externo totaliza 74 mm, ao qual se adiciona uma folga de 2 mm, permitindo a sua aplicação em furos com um diâmetro de 76 mm. Cada trecho de furo é pressurizado através da bombagem de água que exerce pressão sobre a camisa de borracha

que por sua vez carrega as paredes do furo de sondagem. O troço analisado pode ser submetido até pressões de 15 MPa. Na zona central da camisa de borracha encontram-se inseridos quatro pares de apalpadores metálicos ligados a núcleos de transdutores, dispostos segundo quatro direcções separadas por um ângulo de 45º entre si e perpendiculares ao eixo do furo. Os apalpadores de cada par encontram-se na posição diametralmente oposta e contactam directamente com as paredes do furo medindo as deformações diametrais do furo de sondagem [13]. A Figura 2.18 mostra à esquerda um dilatómetro inserido num furo de sondagem e, à direita, um esquema da pressurização aplicada por este sobre as paredes do furo de sondagem.

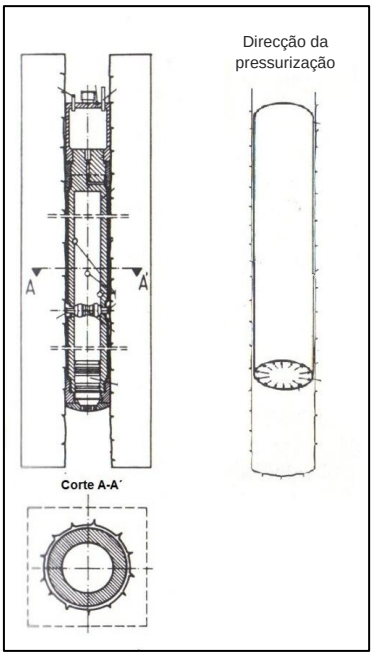



**Figura 2.18 – Esquema do equipamento de ensaio e modelo de pressurização do dilatómetro (adaptado de [6])**

A preparação do ensaio consiste no posicionamento do equipamento a uma profundidade, azimute e inclinação bem definidos, e na realização das ligações aos equipamentos de medição e pressurização. Geralmente, o ensaio baseia-se na aplicação de ciclos de carga e descarga até pressões máximas crescentes, seguidos de uma nova carga máxima até à pressão máxima atingida no último ciclo, que é mantida estável durante um intervalo de tempo para determinação dos parâmetros de fluência [13]. A Figura 2.19 mostra um exemplo de uma sequência de ensaio.

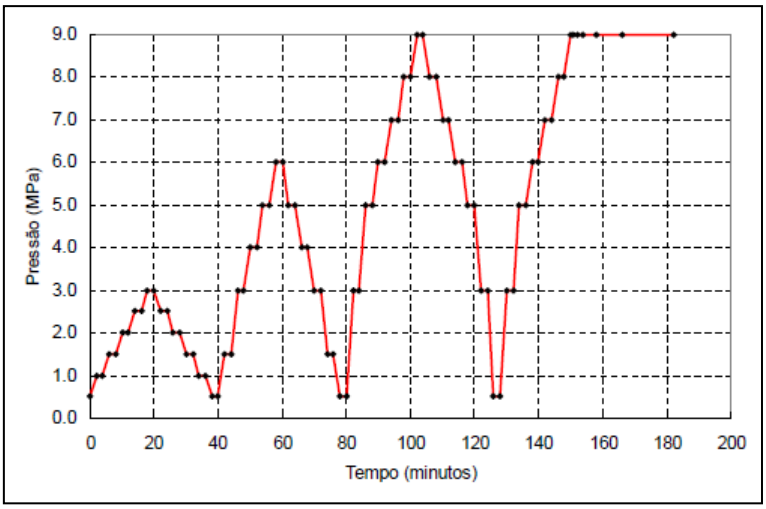



**Figura 2.19 – Exemplo de sequência de ensaio com dilatómetro [13]**

A execução do ensaio inicia-se com a determinação da pressão de encosto, que deverá ser a mínima possível que garanta durante todo o ensaio o encosto entre a camisa de borracha e a parede do furo. De acordo com a sequência de ensaio é possível estabelecer relações tensão-deformação para os troços correspondentes aos ciclos de carga e aos ciclos de descarga [14]. Na Figura 2.20 apresenta-se um diagrama típico de tensão-deformação de um dos quatro diâmetros que este tipo de ensaio possibilita medir, com três ciclos de carga-descarga.

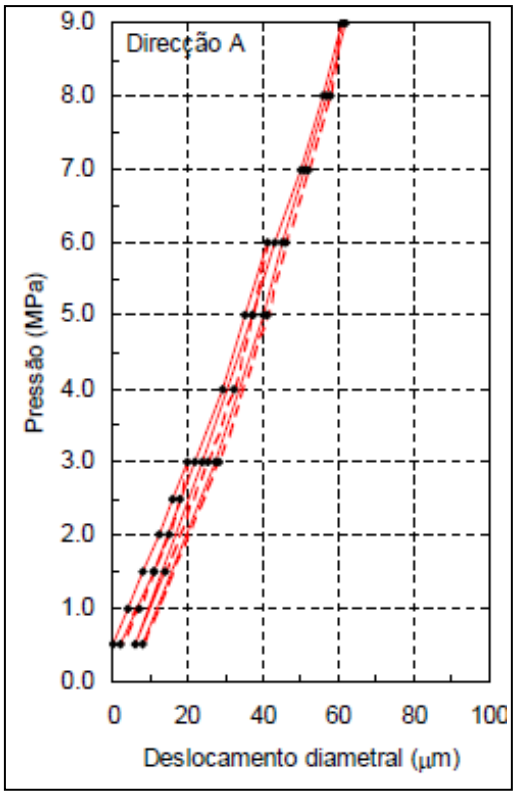



**Figura 2.20 – Diagrama típico de um ensaio com dilatómetro [13]**

A pressurização das paredes do furo de sondagem provoca o aparecimento de tensões de tracção que, ao ultrapassarem a resistência à tracção do maciço rochoso, originam a fissuração do maciço. Este fenómeno associado a outros condicionalismos do ensaio resulta na não obtenção do módulo de elasticidade do volume de rocha ensaiado. O módulo obtido designa-se assim por módulo dilatométrico [13].

Este ensaio possibilita realizar um elevado número ensaios devido à sua relativa rapidez e economia, permitindo desenvolver estudos sobre a anisotropia e a heterogeneidade do maciço rochoso [8].

## Macaco para furos de sondagem – *Goodman jack*

O macaco para furos na variante *Goodman* é constituído por um cilindro metálico ao qual estão fixos macacos hidráulicos que aplicam pressões contra as paredes do furo através de duas placas rígidas com $90^0$ de abertura. O trecho de furo ensaiado tem aproximadamente 445 mm de comprimento e 70-85 mm de diâmetro, a que corresponde um volume 0,024 $m^3$. A expansão das placas rígidas é registada, no mínimo, por dois transdutores eléctricos [15]. A Figura 2.21 apresenta um macaco para furo e o restante equipamento necessário para a execução do ensaio. A Figura 2.22 mostra, à esquerda, a sonda de ensaio e, à direita, um esquema da pressurização aplicada.

**Figura 2.21 – Macaco para furos na variante *Goodman* [16]**

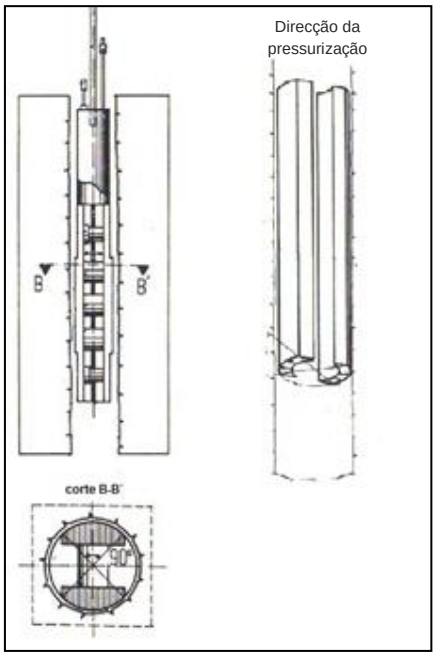



**Figura 2.22 – Esquema do equipamento de ensaio e modelo de pressurização do ensaio *Goodman jack* (adaptado de [6])**

Após a instalação e a realização das ligações do equipamento, a preparação do ensaio consiste em calibrar e aplicar as correcções necessárias (atrito entre as placas e as paredes do furo). Após o encosto das placas às superfícies do furo, realiza-se o ensaio, aplicando ciclos de carga e descarga até pressões máximas crescentes [15].

Os resultados de tensão-deformação recolhidos permitem obter o módulo de elasticidade do volume de rocha carregado [8].

A principal vantagem deste ensaio é ser possível a aplicação de pressões em apenas dois semi-espaços, permitindo uma exacta definição da direcção da aplicação das pressões. Se relevante, é possível estudar a pressão necessária para a abertura de uma fenda num plano bem definido [8].

### 2.3.2. Ensaios em superfícies do maciço rochoso

Os ensaios em superfícies de maciços rochosos foram os precursores no estudo da deformabilidade *in situ*. Estes realizam-se através da aplicação de cargas sobre o maciço rochoso numa direcção, geralmente aquela na qual actuarão as tensões principais. Estes ensaios submetem elevados volumes de rocha a uma dada pressão. No entanto, a elevada dimensão e custo dos equipamentos faz com que apenas seja realizado um número reduzido de ensaios deste tipo.

Existem várias modalidades de ensaios em superfície, sendo as mais comuns: o ensaio de carga em placa, o ensaio com macacos planos de grande área e o ensaio com macaco radial (realizado em túneis). Seguidamente, focar-se-á os ensaios de placa e os ensaios com macacos planos de grande área. Os primeiros por se tratarem do primeiro tipo de ensaios a serem desenvolvidos e por serem ensaios por vezes utilizados na investigação de maciços rochosos destinados a túneis e barragens. Os segundos, por se tratarem do objecto central desta dissertação e, adicionalmente, por serem ensaios de grande interesse pois a sua preparação e execução provoca uma menor perturbação no maciço rochoso quando comparada com os restantes ensaios [17].

## Ensaio de carga em placa

O ensaio de carga em placa possui inúmeras variantes. O que as distingue é o método de montagem do equipamento, a área carregada, a pressão máxima aplicável e a rigidez da placa em contacto com a superfície, podendo esta última ser classificada como flexível ou rígida. Uma das variantes encontra-se representada na Figura 2.23.

**Figura 2.23 – Ensaio de carga em placa aplicado numa galeria de prospecção para a exploração hidroeléctrica de Tienlun (Taiwan) [18]**

Quando aplicada em obras subterrâneas, a pressurização dos macacos hidráulicos resulta idealmente na aplicação de uma força distribuída uniformemente nas paredes opostas da galeria. A pressão de ensaio é registada simultaneamente nos manómetros do dispositivo de pressurização e em almofadas metálicas instaladas entre as placas circulares e as

paredes da galeria. Os deslocamentos medem-se através de defórmetros posicionados em cada superfície carregada [6].

A preparação deste ensaio consiste em revestir as superfícies de ensaio com argamassa para reduzir a interferência de irregularidades, e em realizar a montagem dos equipamentos de medição e pressurização. O ensaio processa-se através da realização de ciclos de carga e descarga [6].

Os diagramas de tensão-deformação obtidos a partir da realização deste ensaio permitem estimar parâmetros de deformabilidade, em particular o módulo de elasticidade [17].

A qualidade dos resultados provenientes deste ensaio está relacionada com as condições em que este é realizado, particularmente, o estado de perturbação das superfícies provocado pelo método de abertura das galerias e a distribuição uniforme da pressão de ensaio [18].

### Ensaio de macacos planos de grande área

Uma versão inicial do ensaio com macacos planos de grande área foi desenvolvida pelo LNEC. Esta foi oficialmente apresentada no trabalho intitulado *A New Method for the Determination of the Deformability in Rock Masses*, apresentado no primeiro Congresso Internacional de Mecânica das Rochas patrocinado pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM), e teve a sua primeira aplicação num projecto internacional em 1968 [19].

O ensaio LFJ destina-se à determinação do módulo de elasticidade de maciços rochosos. Adicionalmente, este ensaio permite realizar ensaios de fluência e estimar a tensão *in situ*. Este ensaio é útil para o estudo de parâmetros de dimensionamento para estruturas fundadas em maciços rochosos, como barragens, túneis, cavernas, etc. [18].

O ensaio LFJ foi desenvolvido com o objectivo de ultrapassar as limitações do ensaio de carga em placa, nomeadamente a perturbação do maciço e a necessidade de aumentar os volumes de rocha ensaiados utilizando equipamentos economicamente viáveis e rápidos de transportar e montar. Este ensaio permite envolver elevados volumes de rocha e pode aplicar pressões que ultrapassam os 10 MPa [20].

O ensaio LFJ pode tomar diferentes configurações em função da natureza do estudo pretendido, podendo variar o número de macacos planos instalados e a inclinação do plano

de ensaio. É de referir que a dimensão do macaco plano e, consequentemente, a dimensão do rasgo e o volume de maciço rochoso interessado podem variar, existindo a versão de ensaio denominada *Extra Large Flat Jack* (ELFJ) cujo rasgo é aberto com um disco de 1,2 m de diâmetro [20].

No capítulo seguinte irá fazer-se uma descrição detalhada deste ensaio.

# 3. ENSAIO DE MACACOS PLANOS DE GRANDE ÁREA

## 3.1. Descrição geral do ensaio

O estudo da deformabilidade levado a cabo através do ensaio LFJ baseia-se na medição dos deslocamentos relativos de duas faces de um rasgo aberto na superfície de um maciço rochoso, com o auxílio de uma serra circular com 1 m de diâmetro. Os deslocamentos relativos são impostos pela pressurização das faces do rasgo através de um macaco plano de grande área. A medição dos deslocamentos impostos é realizada através de quatro defórmetros localizados no interior de cada macaco plano [21].

A preparação do ensaio consiste na abertura de um ou mais rasgos contínuos na superfície do maciço rochoso, com uma profundidade e espessura bem definidas, utilizando uma serra de corte. Após a abertura dos rasgos contíguos procede-se à inserção dos macacos planos. A sua pressurização decorre com a medição dos deslocamentos perpendiculares ao plano dos rasgos e dos deslocamentos na superfície do maciço. O ensaio processa-se realizando uma série de ciclos de carga e descarga, até pressões máximas crescentes, seguidas de um ensaio de fluência à pressão máxima aplicada no último ciclo [21].

Uma vez conhecidas as pressões aplicadas no maciço e os deslocamentos correspondentes é possível traçar diagramas de tensão-deformação que permitem estimar o módulo de elasticidade. O registo da deformação em função do tempo decorrido a uma pressão constante permite estudar a fluência do maciço rochoso. A análise da evolução dos deslocamentos na superfície da fenda possibilita estimar a pressão de cancelamento, ou seja, a pressão para a qual os deslocamentos registados durante a abertura dos rasgos na superfície de ensaio do maciço rochoso, são cancelados. A partir do valor da pressão de cancelamento é possível estimar a tensão inicial normal ao plano dos rasgos [19].

## 3.2. Equipamento de ensaio

O equipamento de ensaio é constituído por um conjunto de dispositivos adaptados para a abertura e pressurização dos rasgos de ensaio. A Figura 3.1 indica o posicionamento dos equipamentos destinados à abertura dos rasgos, numa situação onde se pretende realizar um ensaio no plano horizontal.

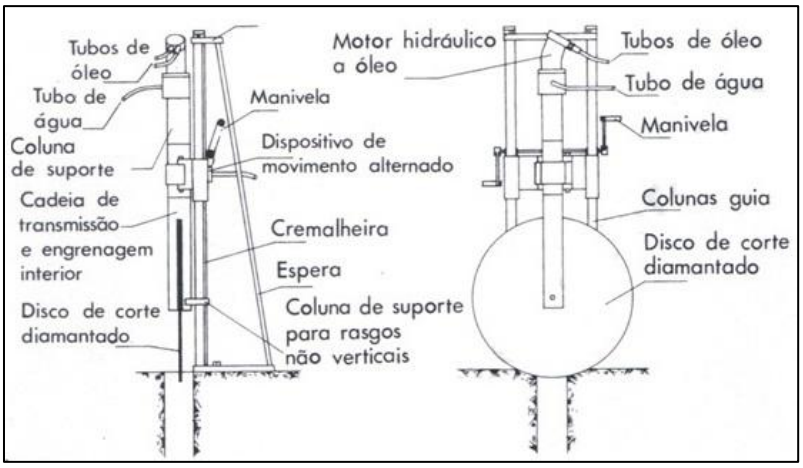



**Figura 3.1 – Equipamento de abertura dos rasgos de ensaio [6]**

Macacos planos

Os macacos planos (Figura 3.2) são fabricados com duas chapas de aço com 1 mm de espessura, soldadas no seu contorno, totalizando uma espessura de 6 mm. A sua pressurização é realizada através da bombagem manual de óleo. Os macacos planos permitem a aplicação de uma pressão máxima superior a 10 MPa quando a rocha possui baixa deformabilidade. No seu interior encontram-se quatro defórmetros com campos de medida adaptados à abertura prevista do rasgo.

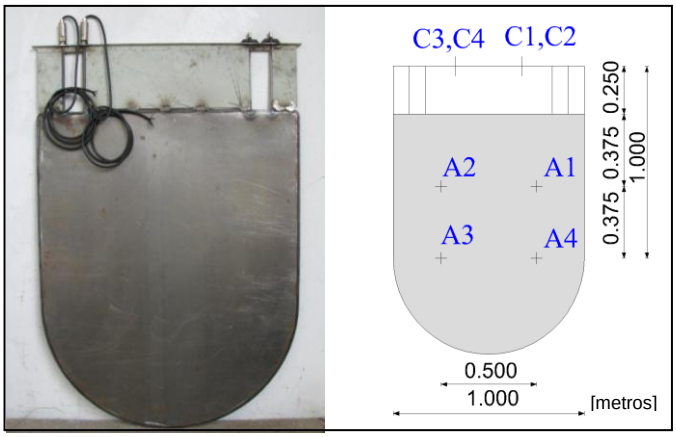



**Figura 3.2 – Macaco plano de grande área [22]**

Defórmetros de resistividade eléctrica

Os defórmetros de resistividade eléctrica são dispositivos que permitem a medição da deformação através da alteração das propriedades de transmissão da corrente eléctrica de uma lâmina metálica quando esta se deforma. Cada um dos quatro defórmetros instalados no interior de cada macaco plano possui quatro extensómetros eléctricos de resistência. A

medição da resistividade e a sua conversão em deformação realiza-se através de unidades de leitura. A Figura 3.3 mostra os quatro defórmetros instalados no interior de um macaco plano aberto antes de ambas as chapas serem soldadas. A Figura 3.4 mostra no canto inferior esquerdo duas unidades de leitura à qual se encontram ligados os defórmetros. A Figura 3.5 mostra um defórmetro antes de ser montado.

**Figura 3.3 – Macaco plano ainda não soldado**

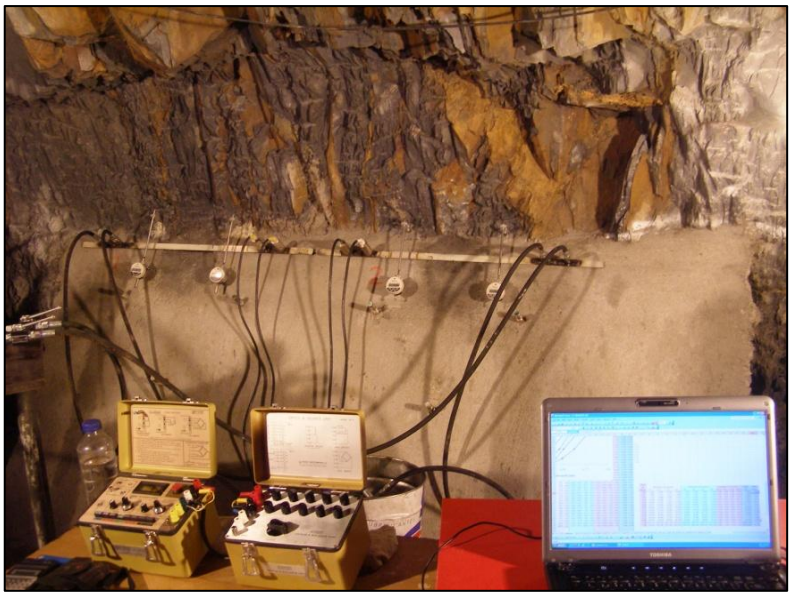


**Figura 3.4 – Unidades de leitura**

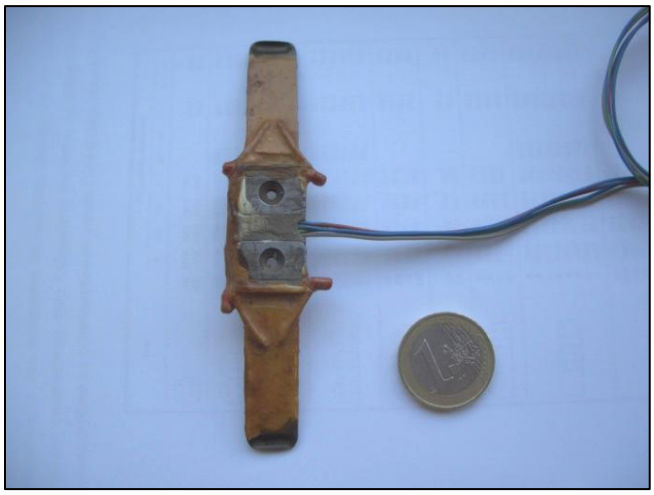


**Figura 3.5 – Defórmetro**

Elongâmetros e comparadores

A medição da abertura ou do fecho do rasgo na superfície do maciço rochoso durante o ensaio pode ser efectuada com elongâmetros mecânicos desenvolvidos pelo LNEC para o efeito, ou utilizando comparadores digitais que medem a variação da distância entre as marcas de medida colocadas em ambos os lados do rasgo. A Figura 3.6 a) mostra uma medição efectuada com elongâmetro mecânico antes da abertura do rasgo e a Figura 3.6 b) mostra um comparador digital instalado para efectuar as leituras durante o ensaio.

**Figura 3.6 – Elongâmetro a) e comparador b) para medição da variação de distância entre marcas**

Bomba hidráulica manual

A bomba hidráulica manual permite elevar a pressão do óleo no interior dos macacos planos até aos valores pré-estabelecidos. Para controlar a pressão é utilizado um manómetro

com um campo de medida e resolução adequados às pressões estabelecidas. Na Figura 3.7 é possível visualizar a bomba hidráulica manual (cinzento e preto) ligada a um manómetro de controlo da pressão.

**Figura 3.7 – Bomba hidráulica manual**

Quadro de suporte

O quadro de suporte é um equipamento construído em ferro, constituído por uma parte destinada à fixação aos varões roscados (chumbadores) aplicados na superfície do maciço rochoso e uma parte destinada ao mecanismo de avanço e orientação do corte. Este equipamento destina-se a suportar a caroteadora durante a escavação do furo central e a serra de corte durante a abertura do rasgo.

Motor hidráulico

O motor hidráulico fornece binário aos equipamentos de corte e é impulsionado a óleo através de uma bomba accionada por um motor eléctrico de 30 kW, localizado num local distante da superfície de ensaio. A bomba retira o óleo de um reservatório de 150 litros montado sobre o motor eléctrico, enviando-o para o motor hidráulico através de tubos metálicos e mangueiras flexíveis, facilitando a abertura do rasgo em locais com acesso difícil. A rotação dos equipamentos de corte é controlada através da regulação de uma válvula manual restritora do caudal de óleo, localizada próxima do quadro de suporte. A Figura 3.8 mostra o motor hidráulico (a azul) acoplado à serra de corte durante a fase de abertura do rasgo. A Figura 3.9 mostra o conjunto motor eléctrico e bomba hidráulica no exterior da galeria de ensaio.

**Figura 3.8 – Quadro de suporte e motor hidráulico**

**Figura 3.9 – Conjunto motor eléctrico e bomba hidráulica**

Caroteadora

A caroteadora é o equipamento que realiza a escavação do furo central que permite o avanço da serra de corte. A caroteadora tem 60 cm de comprimento e possui uma coroa de corte substituível, com 16,8 cm de diâmetro externo, equipada com dentes diamantados. O binário do motor hidráulico é-lhe transmitido através de varas, que podem ser acrescentadas para a realização de furos até profundidades mais elevadas. A Figura 3.10 mostra a caroteadora no canto superior direito.

**Figura 3.10 – Caroteadora**

Serra de corte

A serra de corte é o equipamento que permite a abertura do rasgo até à profundidade determinada, geralmente 1,5 m. Este equipamento é constituído por um disco com 1 m de diâmetro e 7 mm de espessura, equipado com dentes diamantados substituíveis. A rotação do disco é transmitida desde o motor até ao seu eixo através de duas correntes instaladas no interior da coluna de suporte da serra. A Figura 3.11 mostra a serra de corte já montada e alinhada para a abertura do rasgo de ensaio.

**Figura 3.11 – Serra de corte**

## 3.3. Escolha e preparação do local de ensaio

Quando possível, o ensaio LFJ é realizado orientando os macacos planos segundo uma direcção que lhes permita aplicar pressão na mesma direcção da máxima tensão de compressão que a estrutura a construir exercerá sobre o maciço rochoso. Se forem realizados ensaios com diferentes orientações é também possível estudar a anisotropia do maciço rochoso. O número de macacos planos a instalar depende do volume de maciço que se pretende estudar. Actualmente os ensaios são quase sempre executados com dois macacos planos contíguos.

No estudo da deformabilidade de fundações de barragens é frequente a realização deste ensaio no interior de galerias de modo a que sejam analisadas zonas mais profundas e, geralmente, menos perturbadas do maciço rochoso. A preparação do local de ensaio consiste na abertura de uma câmara com dimensões que permitam a instalação dos equipamentos e a movimentação dos operadores. O método de escavação a utilizar deverá minimizar a fracturação nas zonas superficiais do maciço por forma a ser o menos perturbador possível [21].

Após a abertura da câmara de ensaio é necessária a regularização da superfície de ensaio através da aplicação de argamassa de cimento criando uma superfície lisa e perpendicular ao plano do rasgo. Seguidamente, é possível introduzir os chumbadores no maciço rochoso, que servirão de pontos de apoio ao quadro de suporte. A Figura 3.12 mostra, no interior de uma galeria, uma superfície de ensaio já regularizada para a abertura dos rasgos. Destaca-se a presença dos triângulos de posicionamento dos chumbadores na superfície de ensaio.

**Figura 3.12 – Superfície de ensaio**

Utilizando uma caroteadora, procede-se à abertura do furo central com aproximadamente 110 cm de profundidade (Figura 3.13), que permitirá o avanço da coluna de suporte da serra de corte.

**Figura 3.13 – Escavação do furo central**

A observação do interior do furo central e do tarolo dele resultante, permite realizar a inspecção visual de uma região do maciço menos perturbada pelo processo de escavação das galerias. A Figura 3.14 mostra quatro furos centrais realizados em quatro maciços rochosos diferentes. A Figura 3.15 mostra os tarolos resultantes de dois deles.

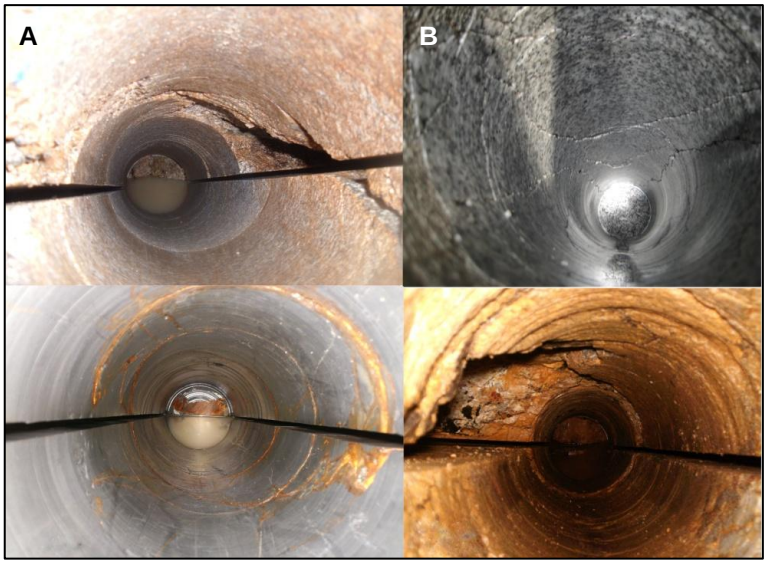



**Figura 3.14 – Aspecto do interior dos furos centrais**

**Figura 3.15 – Tarolos provenientes dos furos A e B**

Após a abertura do furo central aplicam-se, na superfície exterior da câmara de ensaio, quatro marcas alinhadas em pares perpendiculares ao plano de ensaio, que permitirão medir o fecho do rasgo durante a sua escavação e a abertura durante a fase de pressurização. Após a aplicação das marcas, realiza-se uma primeira medição de referência da distância entre as marcas com o auxílio do elongâmetro (Figura 3.16).

**Figura 3.16 – Medição da distância entre marcas**

Seguidamente, procede-se à abertura do rasgo com um mínimo de 100,5 cm de largura e 150 cm de profundidade, utilizando uma serra de corte (Figura 3.17).

**Figura 3.17 – Abertura do rasgo de ensaio**

Após a abertura do rasgo deve garantir-se que não ficam materiais soltos ou irregularidades no seu interior que possam dificultar a inserção do macaco plano.

Com o auxílio do quadro de suporte, insere-se o macaco plano no interior do rasgo. Posteriormente, realiza-se o preenchimento dos semi-cilindros correspondentes ao furo central com argamassa de cimento. Todo o procedimento descrito repete-se para cada macaco plano a instalar.

A fase de preparação termina com a realização das ligações do circuito hidráulico de pressurização, das ligações do circuito eléctrico de medição e com a instalação dos comparadores nas marcas superficiais.

## 3.4. Técnica de ensaio

A pressurização dos macacos planos pode ser realizada individualmente ou em série, ou seja, no caso de se encontrarem instalados dois ou mais macacos planos estes podem ser pressurizados simultânea ou individualmente. A prática mais habitual consiste em pressurizar simultaneamente todos os macacos, para envolver no ensaio o maior volume de maciço possível. A pressurização é realizada com uma bomba hidráulica manual, na qual para os ciclos de carga é necessário accionar o mecanismo de bombagem e para os ciclos de descarga basta a abertura da válvula de retorno. A pressão no interior do macaco plano é monitorizada com o auxílio de um manómetro.

Para cada ensaio devem ser realizados, no mínimo, três ciclos de carga e descarga, desde uma pressão de encosto, geralmente de 0,05 MPa, que tem por objectivo garantir que as faces do macaco plano se mantêm sempre em contacto com as superfícies do rasgo.

Como referido na secção 3.1., os ensaios de deformabilidade com macacos planos de grande área constam de um conjunto de ciclos de carga e descarga até uma pressão máxima crescente. Deve ser pré-estabelecido um cronograma do ensaio, o qual por vezes tem de ser adaptado durante o ensaio em função dos deslocamentos que vão sendo registados. Em cada ciclo, tanto no ramo de carga como no ramo de descarga, devem existir pelo menos cinco patamares de pressão que são mantidos durante dois minutos. Os períodos de transição entre patamares têm, também, a duração de dois minutos. Geralmente é realizado um ciclo à carga máxima durante o tempo conveniente, que não deve ser inferior a uma hora, para o estudo dos parâmetros de fluência. A Figura 3.18 mostra um cronograma de ensaio.

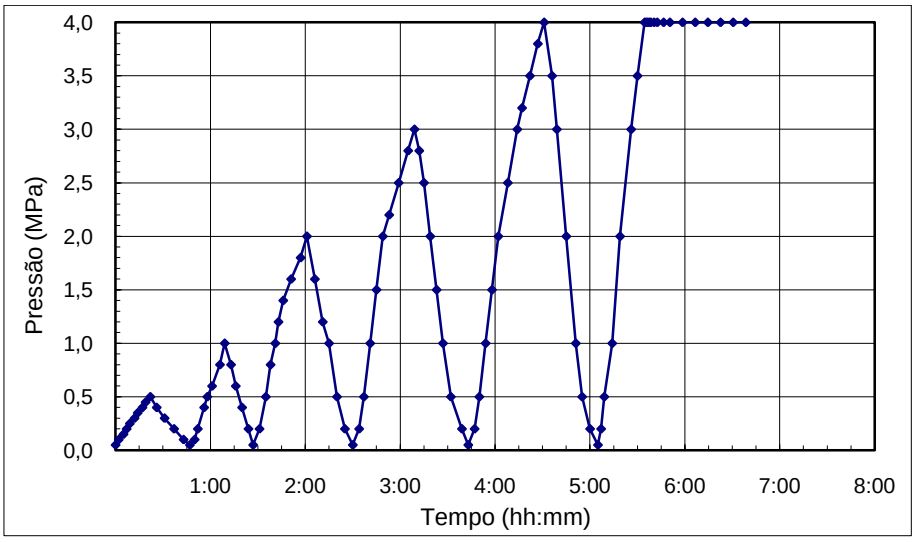



**Figura 3.18 – Cronograma de um ensaio de macacos planos de grande área**

## 3.5. Resultados do ensaio

Os resultados directos do ensaio são:

- os deslocamentos medidos pelos defórmetros no interior dos macacos planos;
- os deslocamentos medidos pelos elongâmetros e comparadores na superfície exterior do maciço rochoso;
- a pressão no interior dos macacos planos;
- o tempo decorrido entre as medições.

A Figura 3.19 apresenta os resultados típicos de um ensaio LFJ em forma de gráficos, relacionando as pressões de ensaio com os deslocamentos observados em cada um dos locais de medição.

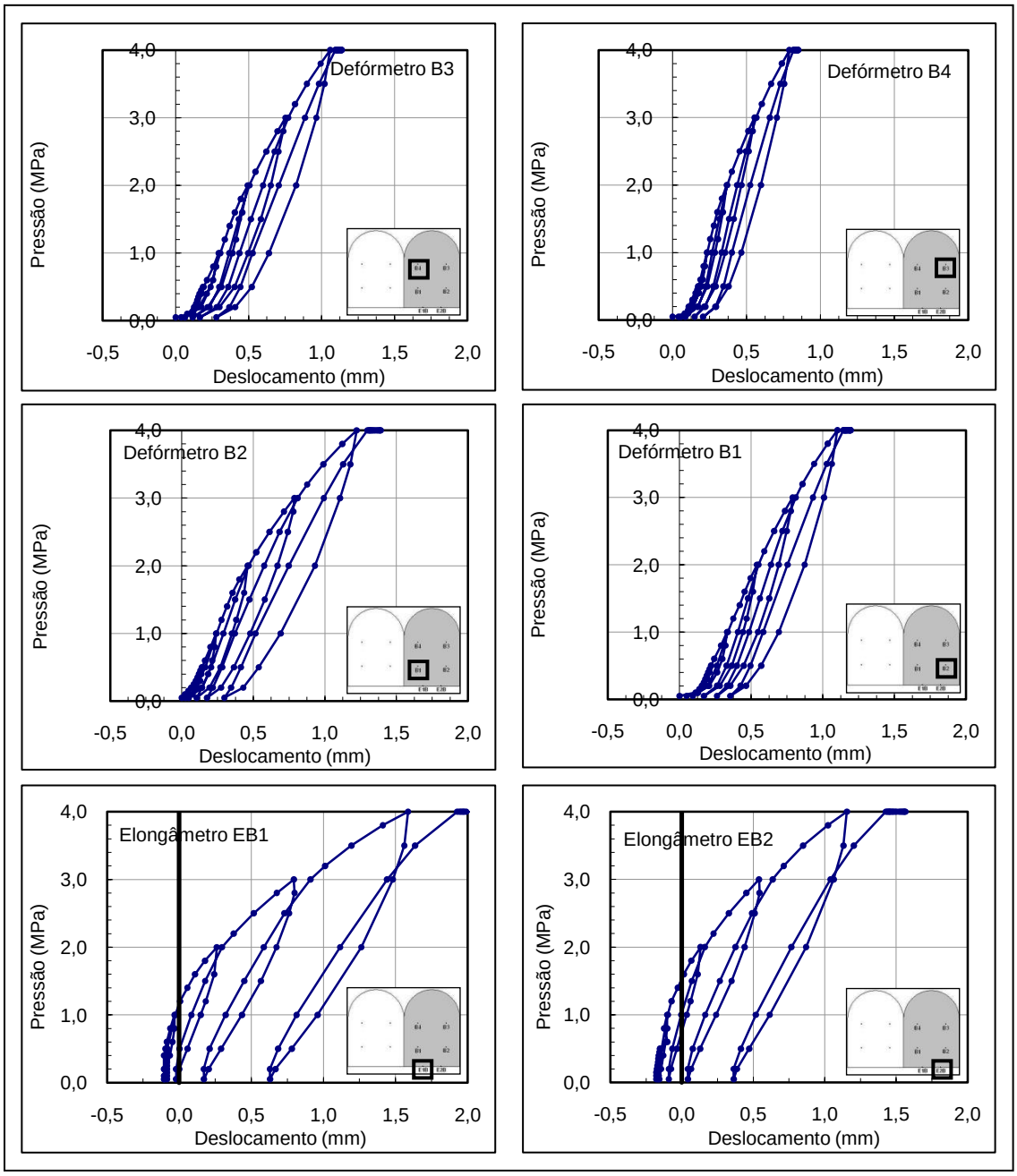



**Figura 3.19 – Resultados dos defórmetros de um macaco plano e dos elongâmetros aplicados sobre a superfície do maciço rochoso**

## 3.6. Interpretação dos resultados do ensaio

### 3.6.1. Importância da fenda de tracção

Devido à pressurização dos macacos planos durante a realização do ensaio são impostas ao maciço rochoso tensões de tracção que, por vezes, resultam no desenvolvimento de uma fenda de tracção no plano dos rasgos. Assim, não existe uma relação única entre a pressão aplicada, os deslocamentos medidos e o módulo de elasticidade do maciço. Essa relação vai depender do desenvolvimento, ou não, da fenda de tracção e, caso ela se forme, da sua profundidade.

A interpretação dos resultados é dificultada pelo desconhecimento da profundidade atingida pela fenda durante o ensaio, uma vez que, embora esta seja visível a olho nu na câmara de ensaio, o seu desenvolvimento para o interior do maciço é desconhecido [23].

A profundidade da fenda de tracção é uma função da pressão aplicada nos rasgos (p), da resistência à tracção do maciço envolvente ($\sigma_t$), e da tensão normal ao plano dos rasgos preexistente ao ensaio ($\sigma_{zz}$).

Pinto e Appleton (1976) [24] desenvolveram um modelo para interpretação dos ensaios LFJ baseado na teoria da elasticidade e nas hipóteses de homogeneidade, isotropia e elasticidade linear do maciço rochoso. O modelo simula rasgos normais à superfície do maciço, considerando que os ensaios se realizam nos hasteais de uma câmara com 3,5 m de comprimento, 2,5 m de largura e altura infinita, como se mostra na Figura 3.20.

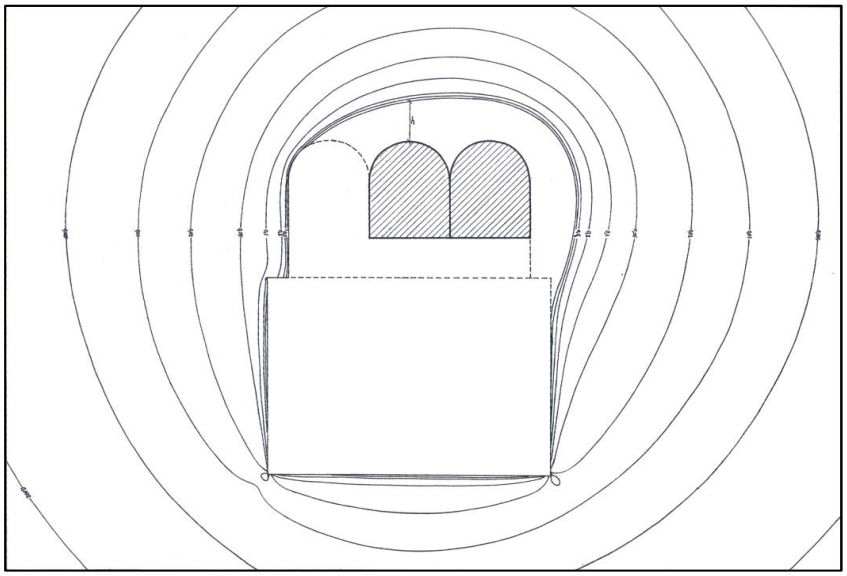


**Figura 3.20 – Modelo bidimensional de Pinto e Appleton (1976) [24]**

Utilizando o modelo desenvolvido, Pinto e Appleton obtiveram uma série de ábacos que permitem relacionar a pressão aplicada, a resistência à tracção do maciço, a tensão normal inicial e a profundidade da fenda [24]. Nas Figuras 3.21 e 3.22 apresentam-se dois desses ábacos. Com o ábaco da Figura 3.21 é possível obter a profundidade da fenda de tracção, se forem conhecidas a pressão de ensaio e a tensão normal inicial, para uma resistência à tracção nula e para ensaios com um ou dois macacos planos. A Figura 3.22 permite obter, para um ensaio com dois macacos planos, a profundidade da fenda em função da pressão de ensaio, da resistência à tracção e da tensão normal inicial.

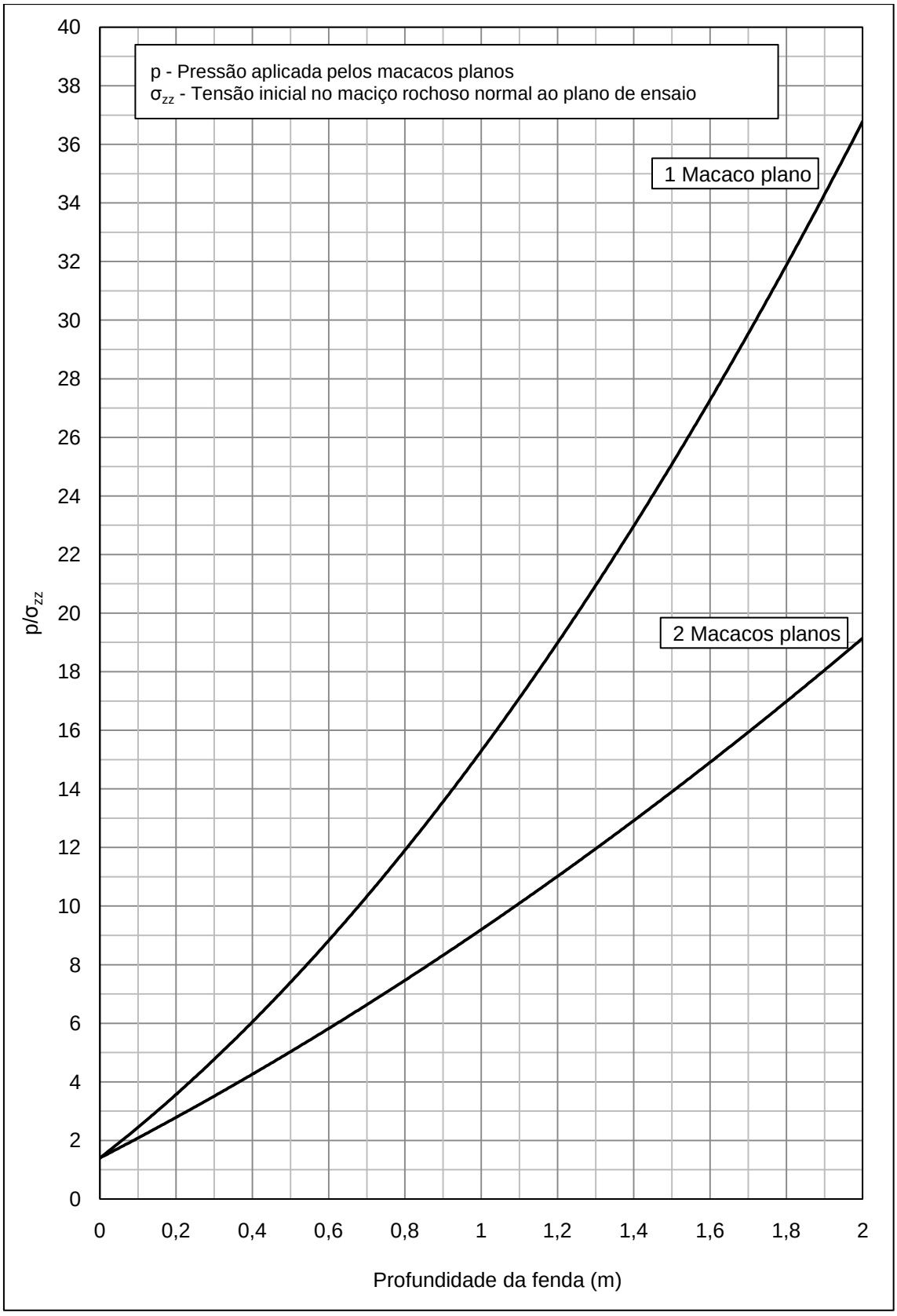



**Figura 3.21 – Ábaco para o cálculo da profundidade da fenda em função da tensão normal inicial e da pressão aplicada para uma resistência à tracção nula (adaptado de [24])**

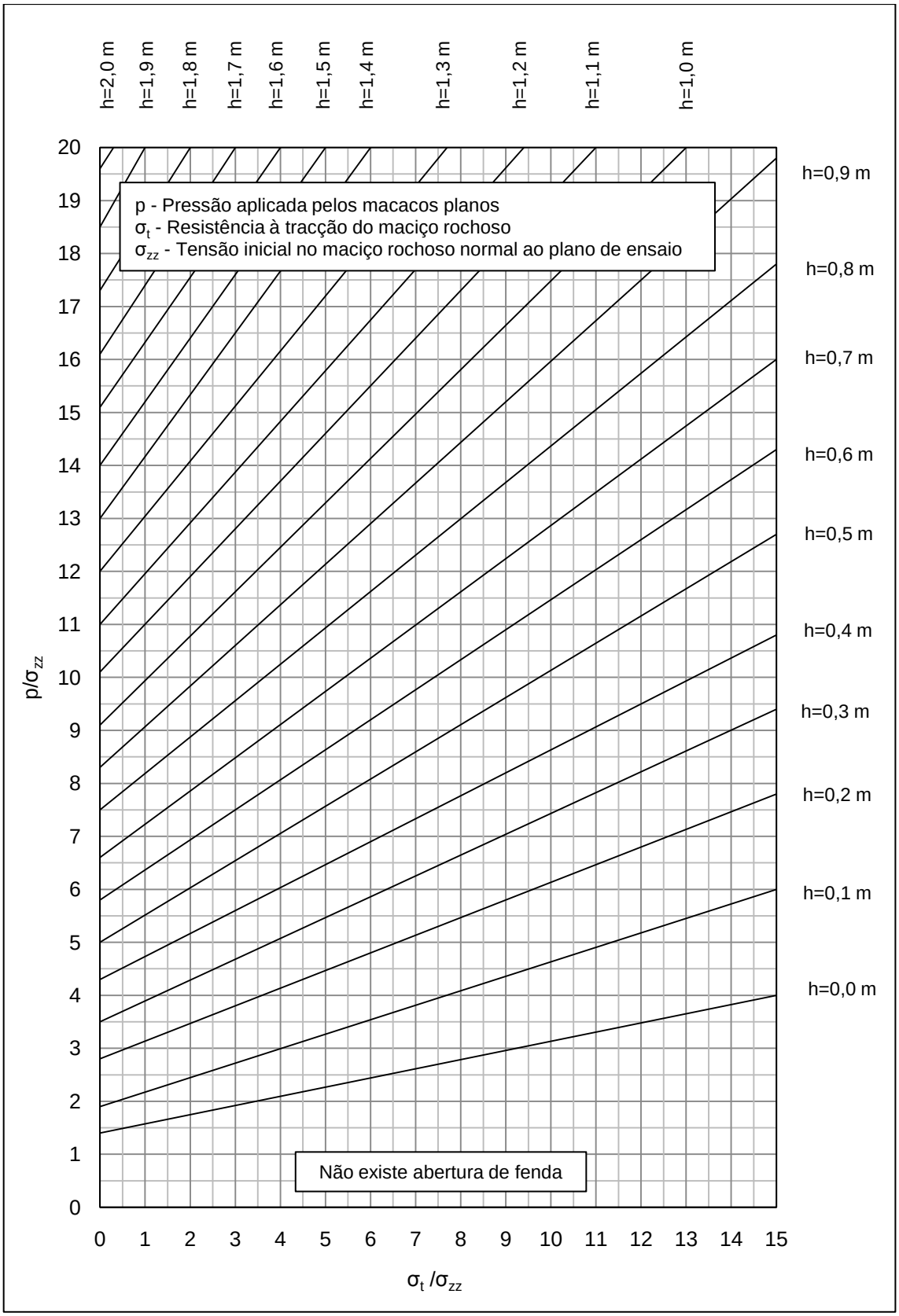



**Figura 3.22 – Ábaco para a determinação da profundidade da fenda em função da pressão aplicada, da resistência à tracção e da tensão normal inicial, num ensaio com dois macacos planos (adaptado de [24])**

### 3.6.2. Cálculo do módulo de elasticidade

A interpretação dos resultados do ensaio LFJ realiza-se com base na teoria da elasticidade para corpos homogéneos, isotrópicos e elásticos lineares. Considerando que $\delta_i$ é o deslocamento medido no ponto de medida i para uma pressão p aplicada pelos macacos planos, que E é o módulo de elasticidade e que v é o coeficiente de Poisson do maciço rochoso, verifica-se:

$$\delta_i = \frac{1 - v^2}{E} \, p \, k_i \qquad (1)$$

Sendo $k_i$ uma constante dependente da localização do ponto i, da geometria da área carregada, da profundidade e geometria da fenda aberta no maciço e da pressão p aplicada pelos macacos planos. Pinto e Appleton [24] apresentaram os valores das constantes $k_i$ para várias profundidades de fenda em ensaios com diferentes combinações de macacos planos, que se apresentam na Figura 3.23.

Conhecida a profundidade da fenda, o valor de $k_i$ e o valor de $\delta_i$, o módulo de elasticidade calculado para os pontos correspondentes a cada defórmetro é dado por:

$$E = \left( 1 - v^2 \right) \Delta p \, \frac{k_i}{\delta_i} \qquad (2)$$

Determina-se o valor mais provável de E pelo método dos mínimos quadrados, a partir dos valores dos deslocamentos medidos nos quatro defórmetros de cada macaco plano:

$$E = \left( 1 - v^2 \right) \Delta p \, \frac{\sum k_i^2}{\sum k_i \delta_i} \qquad (3)$$

| Caso | | Profundidade da fenda (m) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 0,2 | 0,5 | 1 | 1,5 | 1,7 | 2 | 3 | ∞ |
| A B / C D | AB | 131,4 | 163,0 | 183,9 | 196,7 | | | 205,8 | | 222,4 |
| | CD | 136,8 | 166,0 | 184,4 | 196,7 | | | 205,0 | | 221,5 |
| A B / C D; E F / G I | AF | 150,3 | 193,0 | 214,2 | 232,1 | 240,7 | | 246,9 | | 280,8 |
| | BE | 191,0 | 239,0 | 257,0 | 273,0 | 281,1 | | 286,6 | | 320,3 |
| | CI | 160,7 | 198,2 | 217,1 | 232,6 | 240,5 | | 246,2 | | 279,8 |
| | DG | 215,3 | 245,4 | 260,6 | 274,1 | 281,3 | | 286,6 | | 319,7 |
| A B / C D | A | 151,5 | 175,2 | 187,3 | 196,7 | | | 205,8 | | 222,4 |
| | B | 137,4 | 167,8 | 185,7 | 196,7 | | | 205,8 | | 222,4 |
| | C | 164,8 | 179,4 | 188,8 | 196,7 | | | 205,0 | | 221,5 |
| | D | 144,7 | 171,3 | 186,6 | 196,7 | | | 205,0 | | 221,5 |
| A B / C D; E F / G I; J L / M N | AL | 155,7 | 199,3 | 224,9 | 242,4 | 257,3 | | 267,3 | | 313,2 |
| | BJ | 202,8 | 255,5 | 277,8 | 292,2 | 307,6 | | 316,8 | | 361,9 |
| | CN | 167,7 | 206,2 | 228,4 | 243,5 | 257,5 | | 266,9 | | 312,2 |
| | DM | 231,7 | 264,9 | 282,6 | 296,0 | 308,2 | | 316,8 | | 361,3 |
| | EF | 216,9 | 273,9 | 296,0 | 312,2 | 325,0 | | 333,8 | | 378,6 |
| | GI | 249,7 | 284,4 | 301,2 | 314,2 | 325,6 | | 333,9 | | 378,0 |
| A B / C D; E F / G I | AF | 141,1 | 178,7 | 198,2 | 213,4 | | | 224,0 | | 254,9 |
| | BE | 159,7 | 192,8 | 209,7 | 223,8 | | | 233,9 | | 264,1 |
| | CI | 149,5 | 183,3 | 200,3 | 213,7 | | | 223,5 | | 253,8 |
| | DG | 176,0 | 198,7 | 212,2 | 224,2 | | | 234,3 | | 263,1 |
| A B / C D | AB | 159,8 | 182,9 | 190,4 | 196,7 | | | 205,8 | | 222,4 |
| | CD | 176,1 | 187,8 | 192,3 | 196,7 | | | 205,0 | | 221,5 |
| A B / C D | A | 152,2 | 177,9 | 190,1 | 199,1 | | | 205,8 | | 222,4 |
| | B | 137,9 | 171,3 | 187,2 | 199,0 | | | 205,8 | | 222,4 |
| | C | 165,7 | 182,5 | 191,7 | 199,5 | | | 205,0 | | 221,5 |
| | D | 145,1 | 175,3 | 188,6 | 199,3 | | | 205,0 | | 221,5 |
| A B / C D; E F / G I | A | 175,7 | 210,6 | 220,0 | 232,1 | 240,7 | | 246,9 | | 280,8 |
| | B | 200,7 | 247,0 | 258,7 | 273,0 | 281,1 | | 286,6 | | 320,3 |
| | C | 197,2 | 218,1 | 224,1 | 232,6 | 240,5 | | 246,2 | | 279,8 |
| | D | 228,6 | 255,3 | 263,2 | 274,1 | 281,2 | | 286,6 | | 319,7 |
| | E | 195,3 | 243,5 | 256,8 | 273,0 | 281,1 | | 286,6 | | 320,3 |
| | F | 152,2 | 197,1 | 213,5 | 232,1 | 240,7 | | 246,9 | | 280,8 |
| | G | 221,4 | 251,4 | 261,1 | 274,1 | 281,2 | | 286,6 | | 319,7 |
| | I | 163,3 | 203,4 | 217,0 | 232,6 | 240,5 | | 246,2 | | 279,8 |
| A B / C D; E F / G I; J L / M N; O P / Q R | AP | 157,5 | 199,4 | 225,5 | 250,0 | | 268,9 | | 288,1 | 335,7 |
| | BO | 206,2 | 258,6 | 284,3 | 306,4 | | 323,6 | | 341,5 | 388,5 |
| | CR | 170,5 | 209,1 | 231,1 | 252,6 | | 269,3 | | 287,2 | 334,6 |
| | DQ | 237,5 | 271,6 | 291,1 | 309,6 | | 324,4 | | 340,9 | 387,8 |
| | EL | 223,4 | 282,4 | 309,3 | 331,0 | | 347,4 | | 364,4 | 411,1 |
| | FJ | 228,8 | 291,6 | 319,4 | 341,1 | | 357,2 | | 373,8 | 420,3 |
| | GN | 259,9 | 296,8 | 316,6 | 334,1 | | 348,2 | | 363,8 | 410,4 |
| | IM | 267,9 | 306,8 | 326,9 | 344,3 | | 358,0 | | 373,3 | 419,7 |

**Figura 3.23 – Tabela de constantes calculadas a partir do modelo numérico de Pinto e Appleton [24]**

Decorrente do exposto, a dificuldade existente na interpretação dos resultados do ensaio LFJ está associada à dificuldade em estimar a profundidade da fenda, da qual dependem os valores das constantes $k_i$. Assim, foram desenvolvidas três metodologias para estimar este importante parâmetro [22]:

a) Se for conhecido o valor da resistência à tracção e da tensão normal inicial, a profundidade da fenda pode ser determinada utilizando um ábaco do tipo do da Figura 3.22.

b) O módulo de elasticidade é calculado para vários valores de profundidade da fenda utilizando a expressão (3). Para cada profundidade da fenda utiliza-se o método dos mínimos quadrados do desvio entre os deslocamentos medidos em cada defórmetro e os deslocamentos obtidos com o módulo de elasticidade calculado para essa profundidade de fenda. A profundidade de fenda mais provável é a que conduz ao menor desvio, e o módulo de elasticidade mais provável é o obtido para essa profundidade de fenda.

c) O módulo de elasticidade para a primeira carga é calculado para cada pressão aplicada, partindo do pressuposto que não existe abertura de fenda. Geralmente, após um aumento inicial, devido à recompressão do maciço rochoso, o módulo de elasticidade mantêm-se constante para pressões superiores. Isto indica que o maciço rochoso se comporta linearmente e que ainda não se formou uma fenda de tracção. A diminuição do módulo de elasticidade é indicador do início da abertura da fenda. Considera-se que o módulo de elasticidade do maciço rochoso é o obtido imediatamente antes da abertura da fenda. Para cada pressão, a profundidade de fenda é o valor que permite obter o módulo de elasticidade já determinado.

A Figura 3.24 apresenta um gráfico final de interpretação de um ensaio LFJ utilizando a metodologia apresentada em c).

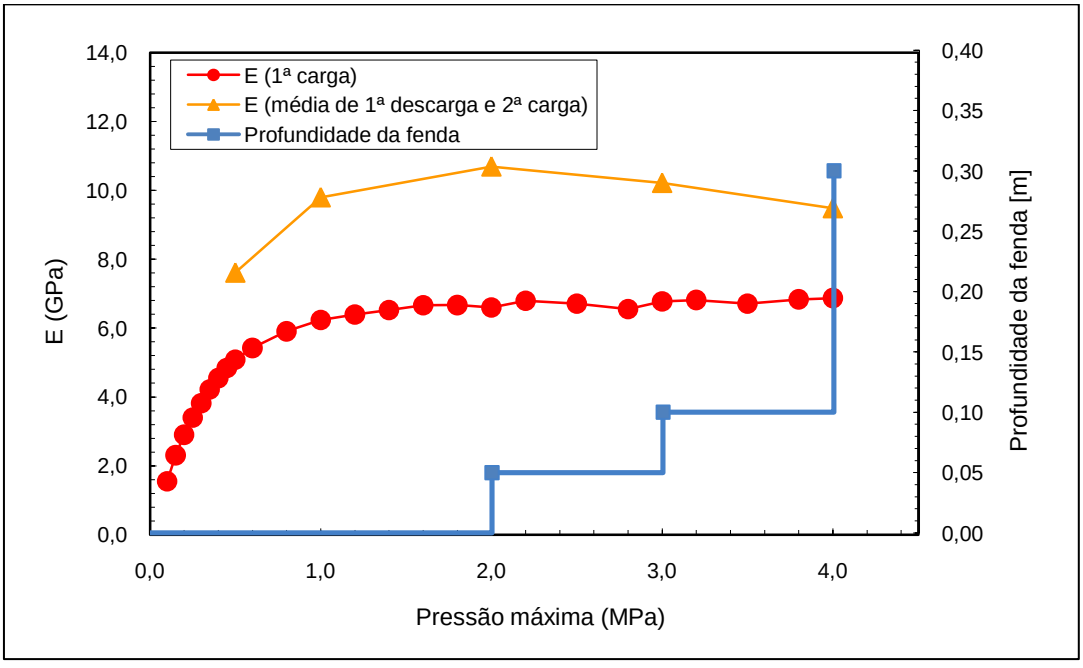



**Figura 3.24 – Gráfico final para interpretação de um ensaio LFJ**

A curva que permite obter o módulo de elasticidade do maciço é a que representa a média entre os resultados da primeira descarga e os resultados da segunda carga, por se considerar que estes são menos influenciados pelo efeito de recompressão do maciço.

### 3.6.3. Cálculo dos parâmetros de fluência

A realização de um ensaio de fluência tem como objectivo determinar a redução do módulo de elasticidade a tempo infinito. Para tal, os ensaios têm um patamar de fluência, geralmente no final dos ciclos de carga e descarga, a uma pressão constante, que geralmente é a máxima atingida no ensaio.

Os ensaios de fluência são interpretados, de acordo com a experiência do LNEC, em termos de uma relação linear entre o logaritmo da deformação de fluência (a deformação ocorrida desde que a pressão de fluência foi atingida) e a raiz cúbica do inverso do tempo de fluência (o tempo decorrido desde que se atingiu a pressão de fluência). Esta relação pode ser expressa como:

$$\ln\left(\frac{E_0}{E} - 1\right) = \ln\left(\frac{E_0}{E_\infty} - 1\right) - \sqrt[3]{\frac{A}{t}} \qquad (4)$$

Em que:

$E_0$ – módulo de elasticidade no instante em que se atingiu a pressão de fluência;

E – módulo de elasticidade medido no final do ensaio de fluência;

$E_\infty$ – módulo de elasticidade para um tempo infinito;

A – constante com as dimensões de um tempo;

t – tempo decorrido desde que se atingiu a pressão de fluência.

A resolução da expressão anterior permite determinar um módulo de elasticidade para um tempo infinito e assim compreender qual a redução expectável do módulo de elasticidade ao longo do tempo.

Na Figura 3.25 apresenta-se a representação da lei de fluência obtida num ensaio.

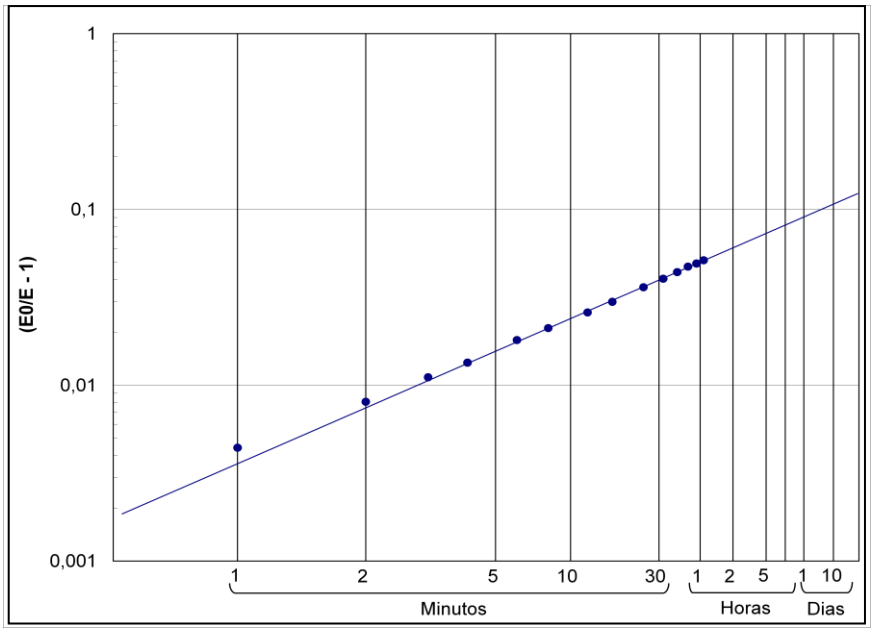



**Figura 3.25 – Representação da lei de fluência**

## 3.6.4. Determinação do estado de tensão inicial

Como mencionado anteriormente, uma das potencialidades do ensaio LFJ é permitir a determinação do estado de tensão inicial. Para o fazer, é necessário o registo dos deslocamentos durante a fase de abertura dos rasgos e a determinação da pressão para a qual os deslocamentos se anulam. Tal só é possível com a aplicação das marcas superficiais. A Figura 3.26 apresenta os resultados provenientes de um dos pares de marcas superficiais onde são instalados os elongâmetros e os comparadores. Nesta figura é possível visualizar, a tracejado vermelho, a primeira passagem da curva de pressão-deslocamento pelo ponto de deslocamento zero, à qual corresponde a pressão de cancelamento. A pressão de cancelamento toma diferentes valores consoante o par de marcas superficiais em que é estimado, uma vez que os macacos planos não pressurizam homogeneamente todo o rasgo [19].

Para obter a tensão inicial normal $\sigma_{zz}$ ao plano dos rasgos é necessário dividir a pressão de cancelamento $p_c$ em cada par de marcas por um coeficiente $k_c$:

$$\sigma_{zz} = \frac{p_c}{k_c} \qquad (5)$$

A determinação destes coeficientes para dois macacos planos sem inclinação, a partir do modelo tridimensional sobre o qual incide esta dissertação, foi recentemente

apresentada no trabalho de Figueiredo *et al* [22]. A metodologia utilizada para a sua determinação será apresentada no Capítulo 4.

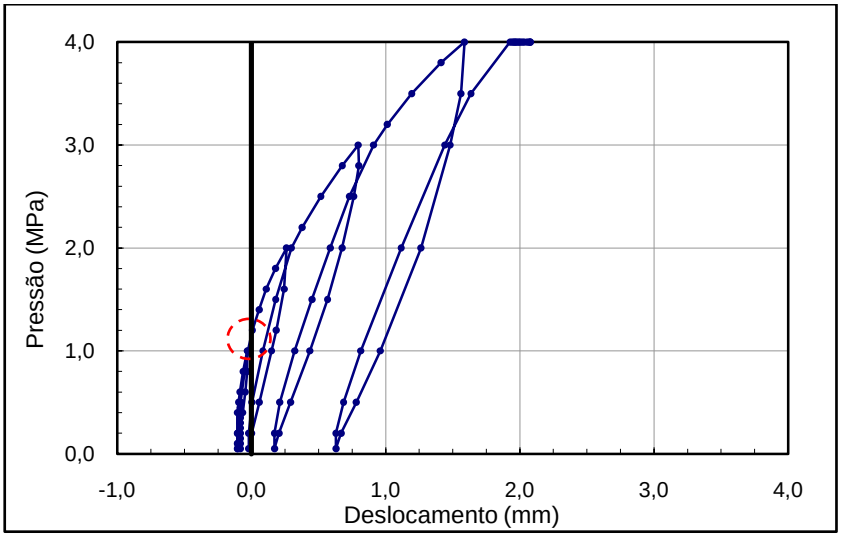



**Figura 3.26 – Diagrama de pressão-deslocamento de um dos pares de marcas superficiais de um ensaio LFJ**

# 4. MODELAÇÃO DO ENSAIO DE MACACOS PLANOS DE GRANDE ÁREA

## 4.1. Introdução

Com o objectivo de simular numericamente um ensaio de macacos planos de grande área, iniciou-se no LNEC, o desenvolvimento de um modelo numérico tridimensional utilizando o programa FLAC3D [22]. Pretende-se com este modelo simular com detalhe os seguintes aspectos:

- ensaios com um ou dois rasgos contíguos;
- a geometria tridimensional do ensaio, nomeadamente a inclinação do plano dos rasgos relativamente à superficie do maciço rochoso;
- a sequência de escavação dos rasgos;
- a sequência de pressurização dos macacos planos durante um ensaio cíclico;
- a influência da tensão no maciço rochoso, normal ao plano dos rasgos.

O FLAC3D é um programa de cálculo automático que utiliza o método das diferenças finitas e que permite a análise de problemas mecânicos, especialmente geomecânicos. Disponibiliza vários modelos constitutivos para a representação de problemas geotécnicos, em que cada elemento da malha pode ter um diferente modelo constitutivo ou propriedade, podendo ser atribuído um gradiente ou distribuição estatística a qualquer uma das suas propriedades [25].

Este programa disponibiliza um modelo de interface para que seja possível representar o contacto entre duas ou mais porções de malha através de uma superfície com determinadas propriedades mecânicas. A interface é um plano segundo o qual o deslizamento e/ou separação são admitidos, possibilitando a representação de falhas, diáclases ou outras superfícies de descontinuidade [25].

O FLAC3D possui um gerador automático de malha tridimensional através da manipulação de formas pré-definidas, podendo ser especificadas as condições iniciais de tensão [25].

O FLAC3D possui uma linguagem de programação específica, denominada FISH, que permite ao utilizador definir variáveis e funções, aumentando as capacidades de modelação e interacção com o programa.

## 4.2. Modelo de cálculo

### 4.2.1. Aspectos gerais

A malha de cálculo constitui um sólido, com dimensões 30 m × 30 m × 15 m, constituída por 149.440 elementos (Figura 4.1 A).

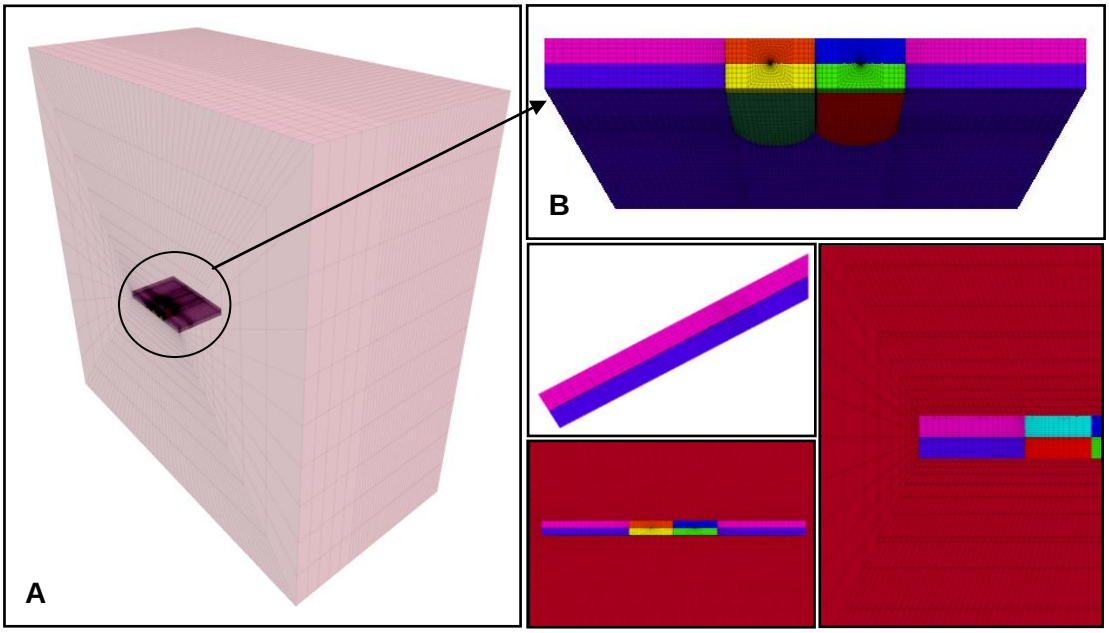



**Figura 4.1 – Malha do modelo numérico tridimensional [20]**

Por forma a simular, com o detalhe requerido, a geometria dos rasgos onde são colocados os macacos planos e o comportamento do maciço rochoso na sua vizinhança, tornou-se necessário desenvolver uma malha local (Figura 4.1 B), muito mais refinada, a qual foi posteriormente inserida na malha global.

Contrariamente ao modelo anteriormente utilizado para a interpretação dos resultados provenientes de ensaios de macacos planos, este modelo permite a consideração de rasgos inclinados relativamente à superfície do maciço rochoso [22]. A Figura 4.2 ilustra, à esquerda, a malha local gerada segundo diferentes ângulos entre o plano do rasgo e a superfície do maciço rochoso. A Figura 4.2 ilustra, à direita, a totalidade da malha do modelo gerada para rasgos inclinados a 20º.

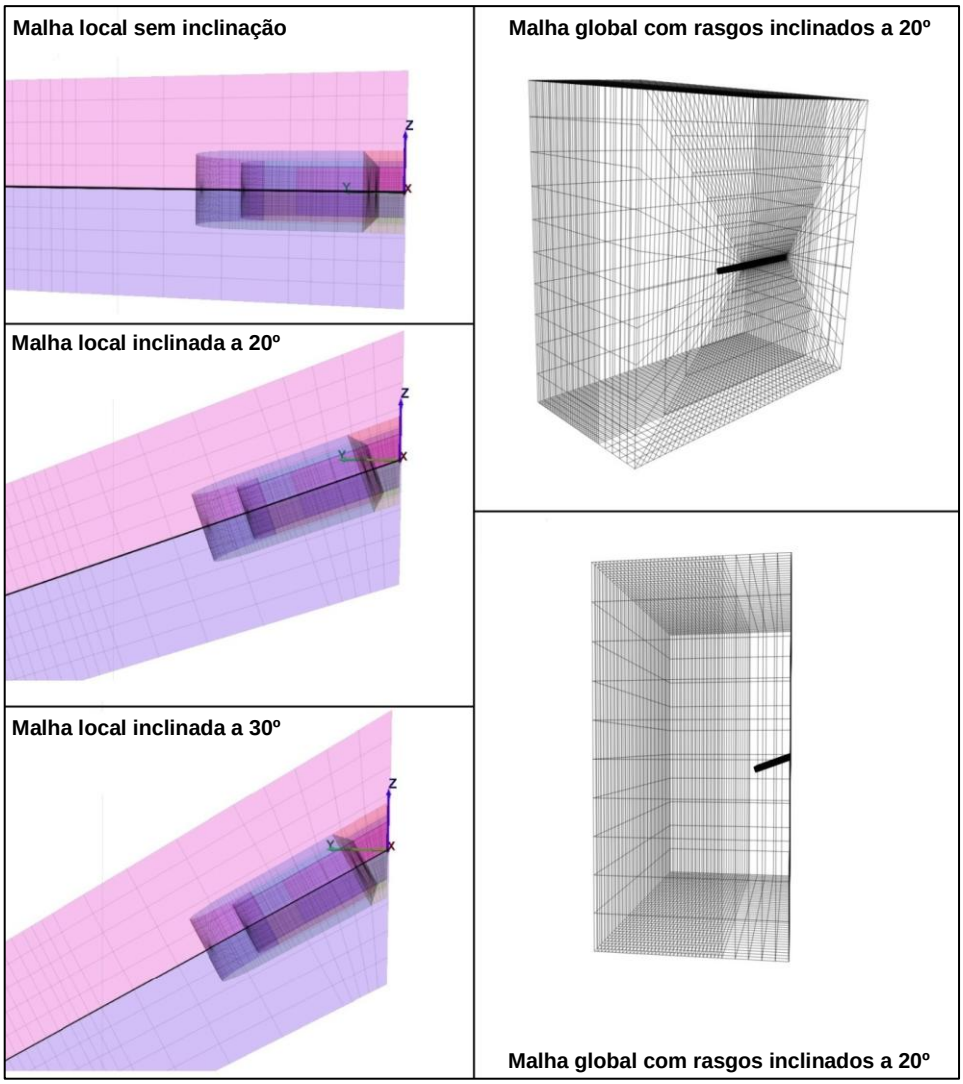



**Figura 4.2 – Malhas para planos de ensaio inclinados**

As condições de fronteira do modelo estão definidas nas superfícies exteriores da malha global através da restrição dos deslocamentos normais, com excepção da superfície frontal, a qual simula a superfície do maciço rochoso onde se executam os rasgos. Com isto, pretende-se simular a realidade de ensaio na qual podem ocorrer deslocamentos na superfície de ensaio devido à descompressão imposta pela escavação da câmara de ensaio ou por se tratar de um ensaio realizado numa superfície a céu aberto. A Figura 4.3 mostra a malha do modelo (a preto) com as restrições (verde, azul escuro e azul claro) dispostas sobre os seus nós.

Neste modelo a geração e a propagação da fenda de tracção ocorrem numa interface localizada no plano médio da malha local, o qual contém os macacos planos.

No que refere às propriedades dos materiais, foi considerado um modelo elástico linear sem rotura para todo o maciço rochoso, à excepção da interface, em que a rotura por

tracção ocorre quando a tensão normal de tracção ultrapassa o valor da resistência à tracção atribuída ao maciço rochoso.

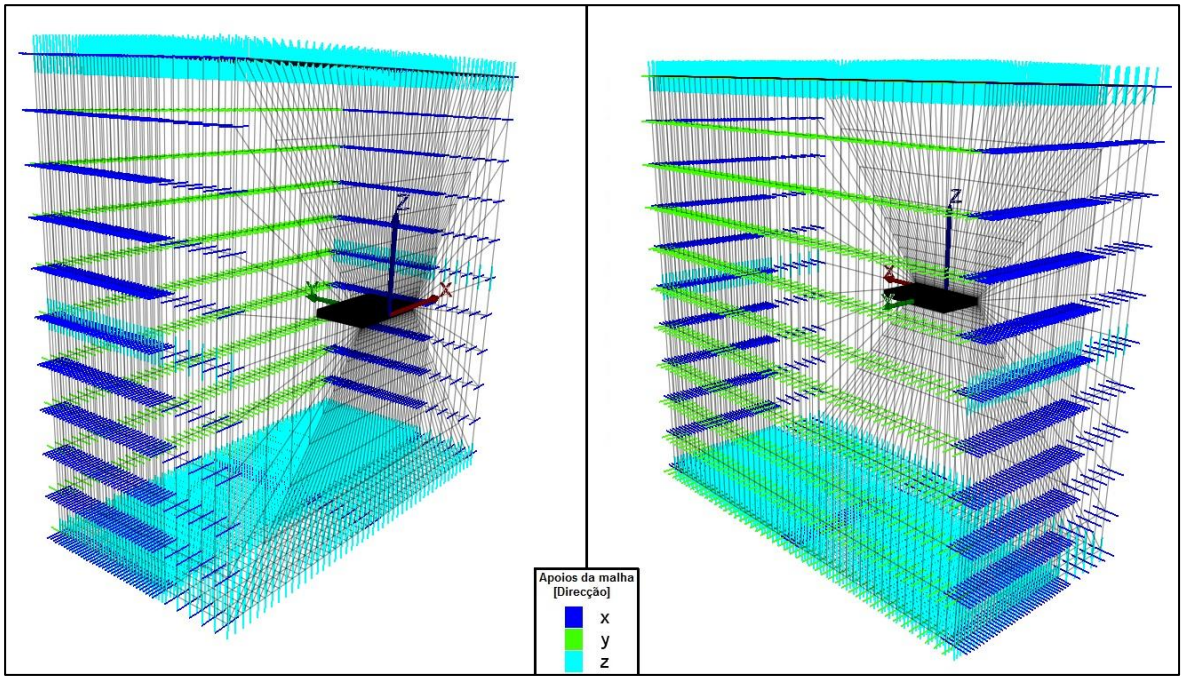



**Figura 4.3 – Condições de fronteira**

## 4.2.2. Malha local

Esta zona principal da malha de cálculo é um paralelepípedo com 3,5 m × 6 m × 0,5 m e 70400 elementos, tendo sido modelada por forma a possibilitar a simulação de toda a sequência de ensaio.

O cálculo inicia-se com a instalação do estado de tensão inicial do maciço rochoso no modelo. Seguidamente, é efectuada a escavação do furo central e do rasgo. A abertura dos rasgos é simulada através da eliminação dos elementos de interface posicionados na área correspondente aos rasgos. Na Figura 4.4 apresentam-se imagens de algumas das fases da simulação da escavação dos rasgos.

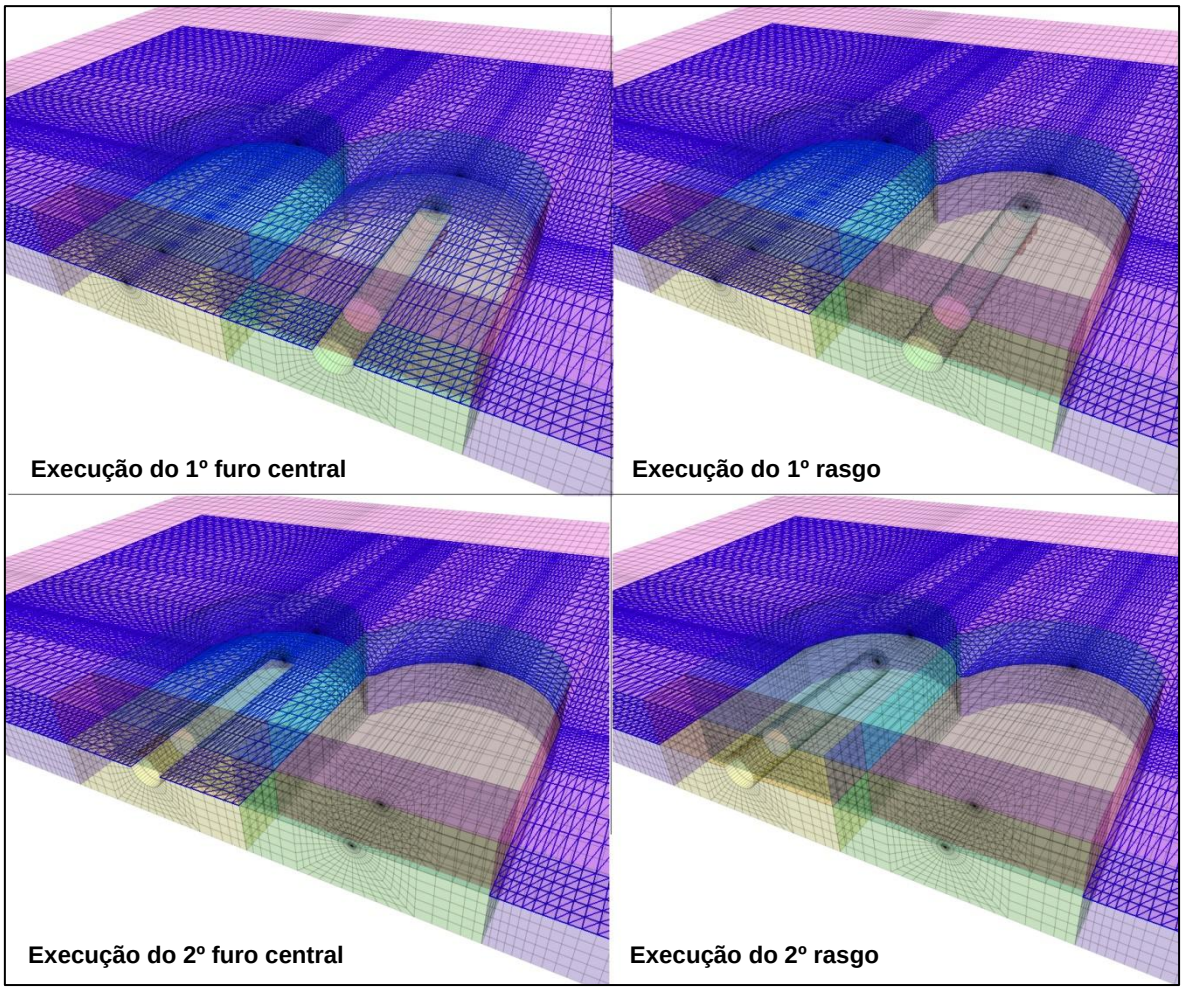



**Figura 4.4 – Simulação da sequência de abertura dos rasgos**

A pressurização dos macacos planos foi simulada através da aplicação de uma pressão normal na superfície constituída pelos elementos, superiores e inferiores, contíguos aos rasgos.

O carregamento pode ser imposto, independentemente ou simultaneamente, em cada macaco plano. Para cada incremento de pressão, o modelo permite calcular a profundidade da fenda de tracção (h) e a evolução dos deslocamentos no local dos defórmetros (Figura 4.5). O modelo permite também calcular os deslocamentos e as tensões ao longo dos alinhamentos apresentados na Figura 4.5.

A malha local comporta dez grupos de elementos (Figura 4.6). A área de cada rasgo é definida pela fronteira entre os grupos superiores e inferiores adjacentes. Assim, na definição destas áreas é considerado:

- o maciço rochoso em contacto com a superfície superior pressurizada do macaco plano;
- o maciço rochoso em contacto com a superfície inferior pressurizada do macaco plano;
- o maciço rochoso em contacto com a superfície exterior superior não pressurizada do macaco plano;
- o maciço rochoso em contacto com a superfície exterior inferior não pressurizada do macaco plano.

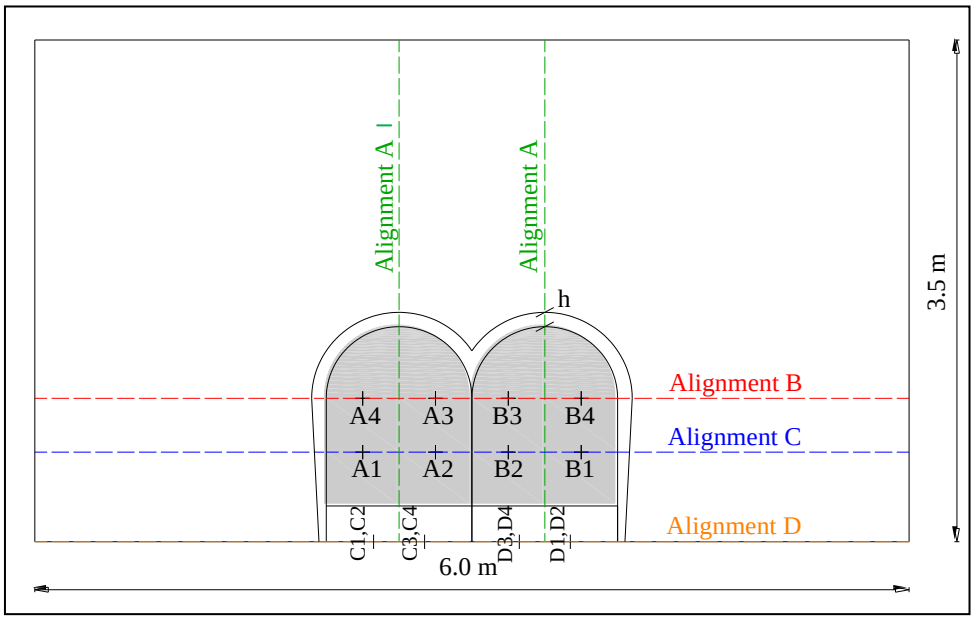



**Figura 4.5 – Localização dos defórmetros e dos alinhamentos [22]**

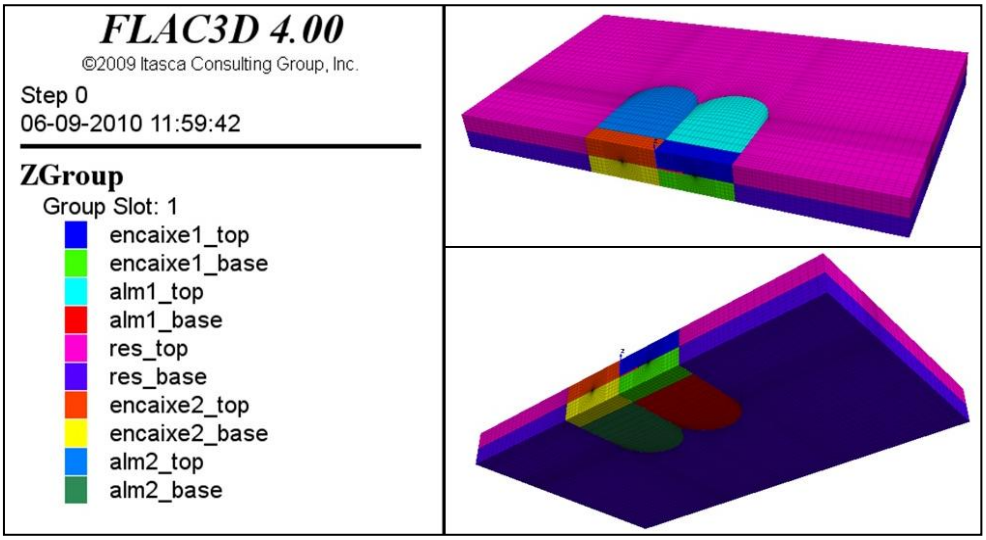



**Figura 4.6 – Grupos da malha local**

Os macacos planos estão localizados na superfície média da malha local. A interface está colocada no plano dos rasgos e a sua malha é mais refinada nas proximidades dos alinhamentos segundo os quais se pretende avaliar a profundidade da fenda. A geometria dos seus elementos adapta-se à geometria dos macacos planos (Figura 4.7).

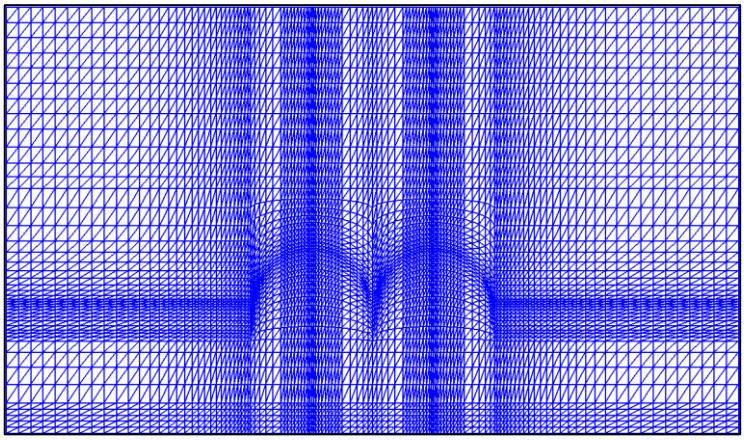


**Figura 4.7 – Interface**

A interface é definida por cinco regiões que permitem a simulação das fases correspondentes à escavação dos rasgos e à aplicação do carregamento (Figura 4.8).

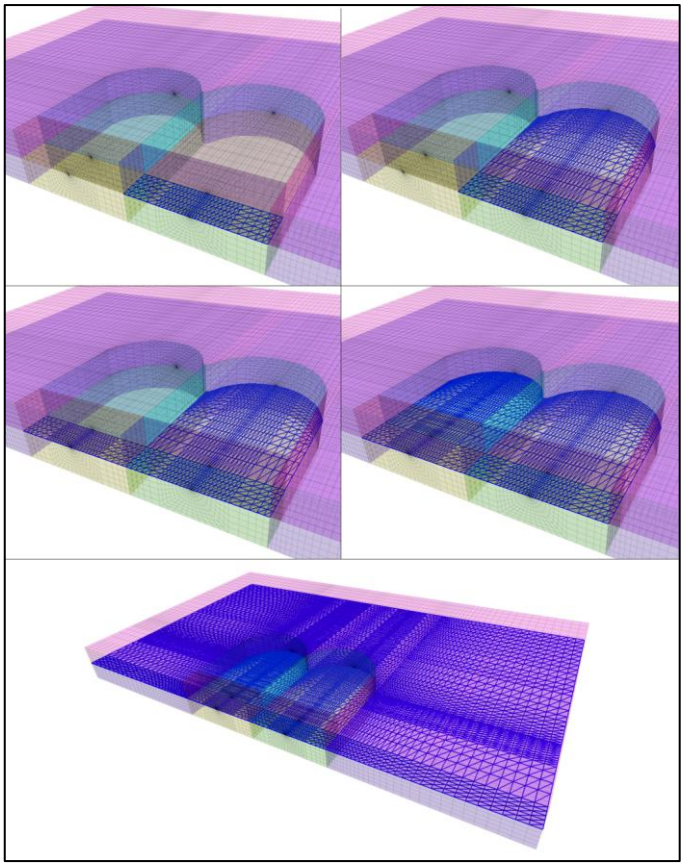


**Figura 4.8 – Divisões da interface**

Os elementos de interface garantem o contacto entre os elementos da malha fronteiros aos rasgos. A alternativa à utilização de uma interface na área dos macacos planos consistia em utilizar elementos com espessura para a simulação do plano dos rasgos, obrigando a que estes possuíssem dimensões muito reduzidas quando comparadas com as dos elementos adjacentes, com uma grande diferença entre as suas três dimensões, causando problemas numéricos.

Neste modelo, a geração e propagação da fenda de tracção ocorrem na interface instalada no plano dos macacos planos. A separação das faces do elemento de interface acontece quando a tensão normal supera o valor da resistência à tracção.

Na Mecânica da Fractura, a geração e o crescimento de fendas não depende de um limite de tensão, mas da energia que deve ser fornecida ao material. Esta energia, denominada energia de fractura, é definida como a área sob o diagrama de tensão-deformação do material, sendo importante considerar o enfraquecimento pós-pico do material em tracção [26].

No caso presente ocorre rotura por tracção, com separação, quando é atingido o valor da resistência à tracção. Para controlar, de certa forma, a influência da energia de fractura, Figueiredo *et al* [22] efectuaram um estudo de sensibilidade da variação da profundidade da fenda com a rigidez normal dos elementos de interface. Neste estudo, os autores concluíram que tal efeito não é sensível para valores de rigidez normal superiores à rigidez equivalente de uma fiada de elementos de 10 mm de espessura, que corresponde à largura do rasgo. Deste modo, utilizaram-se elementos de interface com uma rigidez normal ($k_n$) equivalente a 10 mm de espessura (espessura real de um rasgo), de acordo com a seguinte expressão [25]:

$$k_n = \frac{E}{e} \qquad (6)$$

Em que:
$k_n$ - Rigidez normal da interface
E - Módulo de elasticidade do maciço rochoso
e - Espessura do rasgo

Por outro lado, para evitar a influência que uma fraca discretização pode ter no desenvolvimento da fenda, utilizou-se uma discretização muito fina com elementos de interface na zona de iniciação da fenda com comprimento inferior a 5 cm.

### 4.2.3. Malha global

A malha global tem como objectivo proporcionar distanciamento entre a malha local e os limites do modelo, simulando o confinamento da região dos rasgos pelo maciço rochoso envolvente. Foi com este objectivo que foram adoptadas as dimensões indicadas na Figura 4.9 para a malha global.

A malha global é gerada através de nove grupos de elementos que envolvem a malha local (Figura 4.10). A adopção de diferentes grupos permite adaptar a malha global à inclinação da malha local.

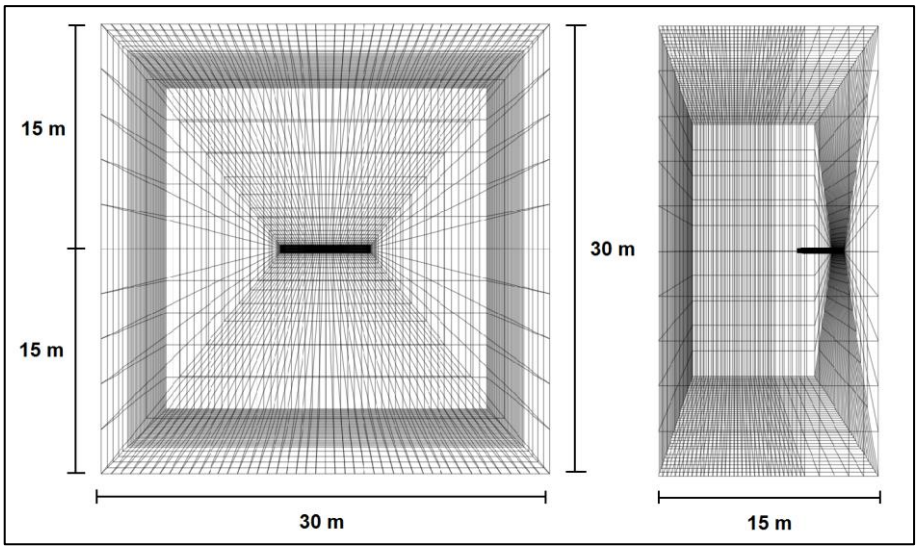



**Figura 4.9 – Dimensões da malha global**

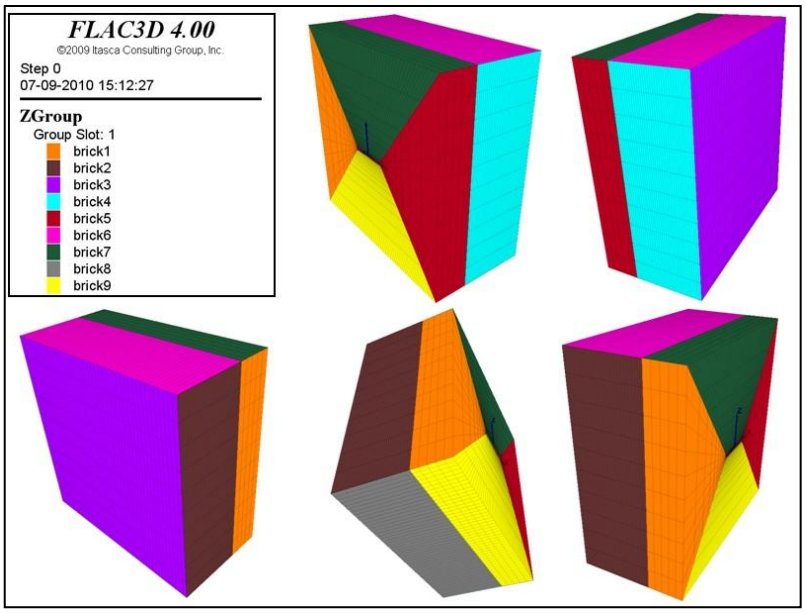



**Figura 4.10 – Grupos da malha global**

Uma vez que não existem comportamentos não lineares ou elevados gradientes de deslocamentos ou tensões na zona do maciço simulada pela malha global, foi adoptada uma malha menos refinada. Existe uma gradação radial da dimensão dos elementos desde o limite exterior do modelo (onde os elementos são de maior dimensão) até aos elementos da malha local (onde os elementos são de menor dimensão).

## 4.3. Simulação de um ensaio cíclico com dois macacos planos

### 4.3.1. Características do cálculo

A simulação de um ensaio cíclico através do modelo numérico tridimensional permitiu evidenciar algumas das particularidades do ensaio LFJ, nomeadamente o mecanismo de desenvolvimento da fenda de tracção e a sua influência na interpretação dos resultados do ensaio.

Foi adoptada uma configuração de dois macacos planos, inseridos horizontalmente num maciço rochoso com módulo de elasticidade de 1 GPa, coeficiente de Poisson de 0,2 e resistência à tracção de 4 MPa. Foi considerada uma tensão inicial de 1 MPa perpendicular ao plano de ensaio. Após a simulação da fase de escavação dos rasgos foram realizados quatro ciclos de carga e descarga, com pressões máximas crescentes de 2, 4, 8 e 16 MPa.

A análise do processo de desenvolvimento da fenda de tracção foi realizada com base nas tensões normais ao plano de ensaio, calculadas nos elementos de interface apresentados. Estes elementos encontram-se posicionados segundo um alinhamento que se inicia no final do macaco plano e termina na extremidade da interface. Este alinhamento, designado por alinhamento A, encontra-se representado na Figura 4.11. Foram, também, medidos os deslocamentos na posição dos defórmetros e dos elongâmetros, representados na mesma figura.

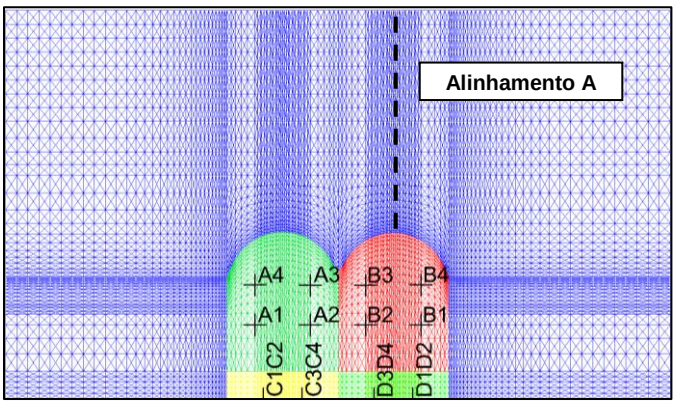



**Figura 4.11 – Posicionamento do alinhamento A, dos defórmetros e dos elongâmetros**

### 4.3.2. Simulação da escavação dos rasgos

A escavação do primeiro furo central provoca a primeira alteração do estado de tensão do maciço rochoso. A Figura 4.12 apresenta as tensões verticais no plano correspondente à superfície da galeria (superfície frontal do modelo). A análise desta figura permite constatar que a realização do primeiro furo central induz perturbações pouco relevantes para este estudo.

A abertura do primeiro rasgo introduz a primeira grande perturbação do estado de tensão no maciço rochoso, observável na Figura 4.13. Esta figura permite, também, perceber que o reequilíbrio de tensões provocado pela abertura do rasgo conduz à concentração de tensões de compressão em torno dos limites do rasgo.

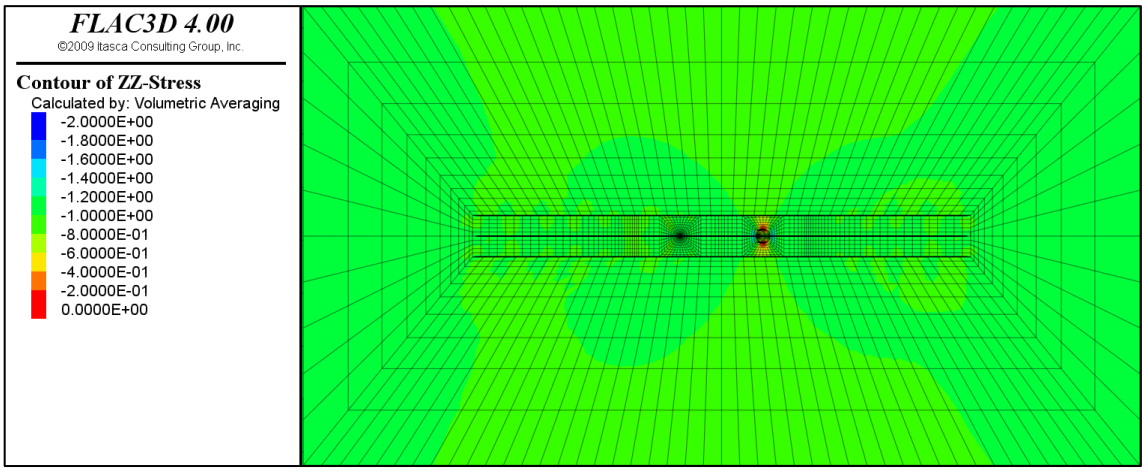



**Figura 4.12 – Tensões verticais após a escavação do primeiro furo central**

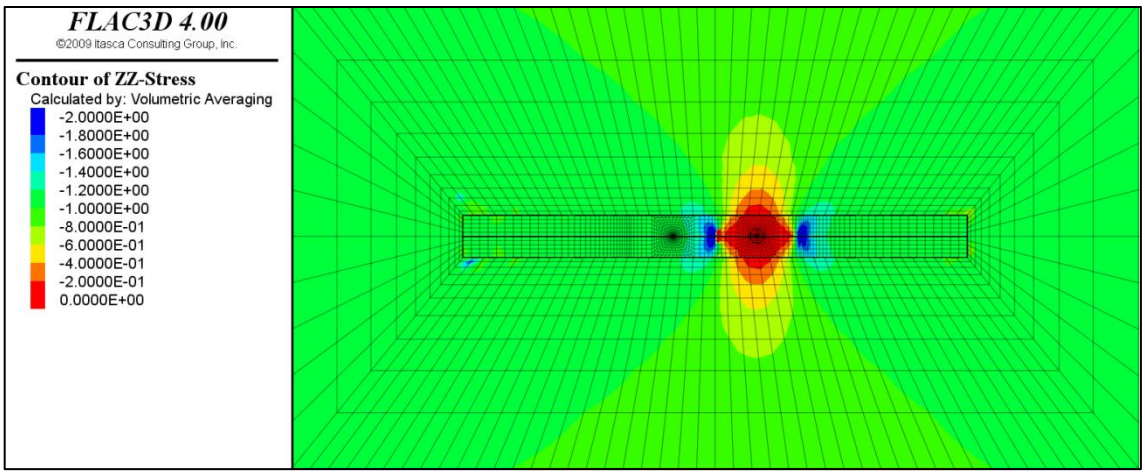



**Figura 4.13 – Tensões verticais após a abertura do primeiro rasgo**

As tensões verticais após a escavação do segundo furo central e do segundo rasgo estão representadas na Figura 4.14. A Figura 4.15 mostra a tensão normal à interface sobre o alinhamento A, após a escavação do primeiro furo central, do primeiro rasgo e do segundo rasgo, permitindo visualizar a concentração de tensões na zona adjacente ao rasgo.

As alterações nas tensões verticais provocadas pelo processo de escavação dos rasgos de ensaio consistem, genericamente, num aumento das compressões nas zonas limítrofes dos rasgos (regiões a azul) e numa diminuição das compressões das zonas em contacto com as zonas escavadas (regiões a vermelho). A concentração de tensões nas zonas limítrofes é, como se demonstrará mais adiante, um dado importante para a compreensão do processo de abertura da fenda de tracção durante a pressurização dos macacos planos.

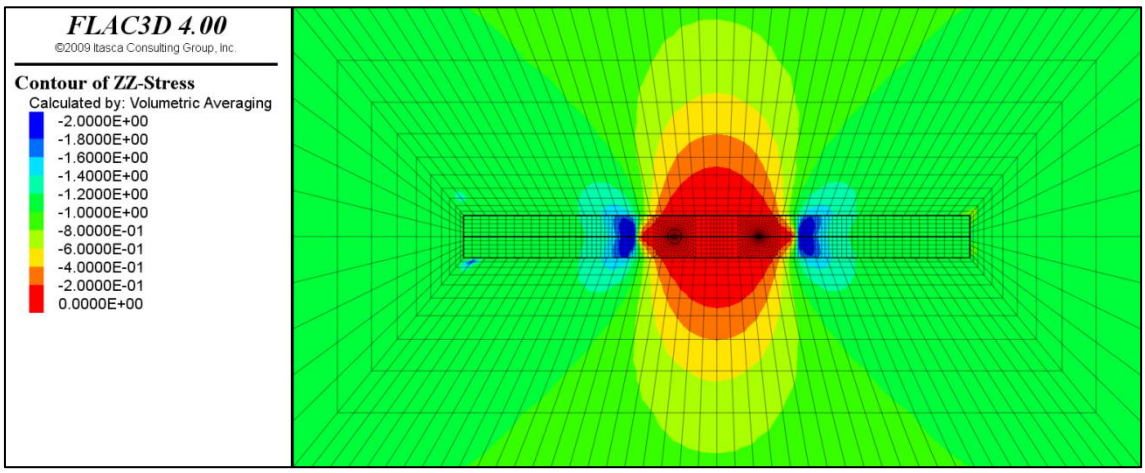



**Figura 4.14 – Tensões verticais após a abertura do segundo rasgo**

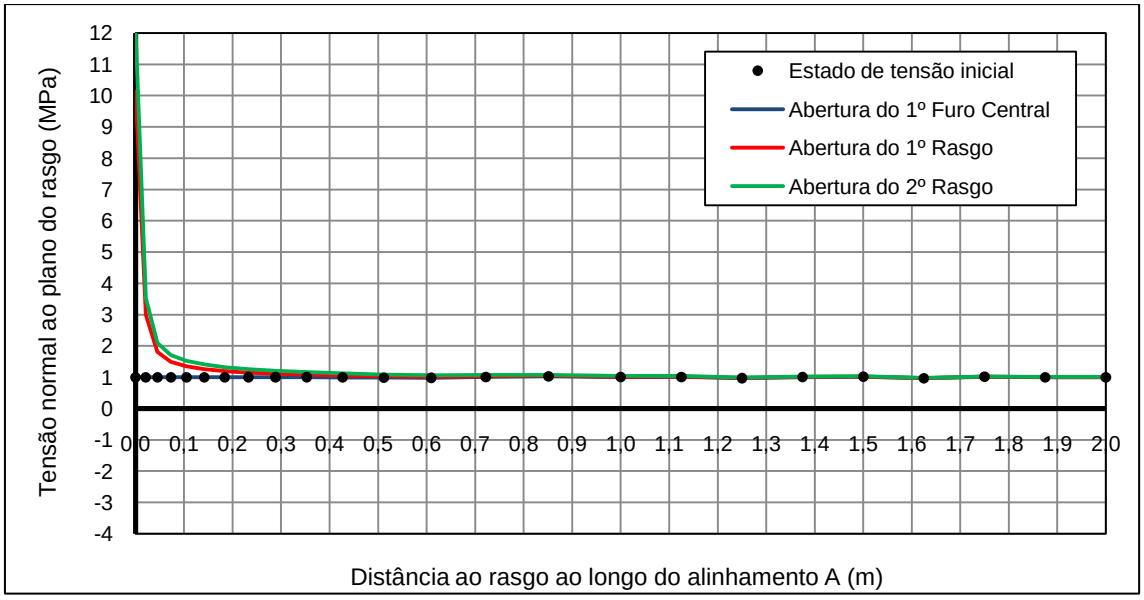



**Figura 4.15 – Tensão normal ao plano de ensaio durante a abertura dos rasgos**

### 4.3.3. Simulação da pressurização dos rasgos

A simulação de quatro ciclos de carga e descarga permitiu observar as modificações no estado de tensão do maciço rochoso e a correspondente evolução da fenda de tracção. A Figura 4.16 mostra os deslocamentos verticais no plano correspondente à superfície da galeria e a Figura 4.17 apresenta as tensões verticais, no mesmo plano, no final da fase de escavação dos rasgos e na fase de pressurização para a pressão máxima de cada ciclo. Na Figura 4.18 está representada a evolução das tensões normais em toda a interface, em que a região a vermelho representa os elementos com tensão nula, ou seja, os elementos em que se verificou rotura por tracção e que constituem a fenda. A Figura 4.19 representa a tensão normal à interface ao longo do alinhamento A, para o final da fase de escavação dos rasgos e para a pressão máxima atingida em cada um dos quatro ciclos. Nesta figura é também possível observar a mobilização da resistência à tracção através da existência de valores negativos de tensão normal.

Na Figura 4.20 é possível visualizar os deslocamentos entre os bordos da fenda de tracção, segundo o alinhamento A, onde as abcissas negativas representam o prolongamento do alinhamento A para o interior dos macacos planos. Nesta figura pode ver-se o aumento da profundidade e o aumento da abertura da fenda de tracção com o aumento da pressão aplicada, bem como apreciar a evolução dos deslocamentos nas paredes do macaco plano. É de referir que a diminuição destes deslocamentos junto à superfície do maciço se deve ao facto de a pressão de ensaio não ser aplicada numa faixa superficial de 25 cm.

A variação da tensão normal à interface desde o final da escavação dos rasgos até ao início da formação da fenda de tracção está representada na Figura 4.21. Nesta é possível visualizar o estado de compressão sobre os limites do rasgo e o processo de mobilização da resistência à tracção. As quatro curvas do gráfico representam a evolução da tensão normal à interface no primeiro ciclo e durante o ramo de carga. Através da observação destas curvas é possível perceber que a tensão de compressão é elevada sobre o contorno dos rasgos no final da fase de escavação dos mesmos, diminuindo ao longo do ramo de carga do primeiro ciclo (linhas a azul). Na curva que representa o estado de tensão quando a pressão é de 0,5 MPa, a compressão no limite do rasgo diminui. Sucede-lhe a curva representativa da pressão de 1 MPa com uma tensão de compressão no limite do rasgo de aproximadamente 1,5 MPa. A linha representativa da pressão de 1,5 MPa apresenta uma tensão normal de cerca de -3,8 MPa, o que constitui uma mobilização quase total da resistência à tracção (-4 MPa), mas ainda sem abertura de fenda. A curva representativa da máxima pressão do primeiro ciclo (2 MPa) exibe valores nulos, aos quais corresponde uma abertura de fenda nos primeiros centímetros adjacentes ao limite do rasgo e uma mobilização da resistência à tracção na zona seguinte.

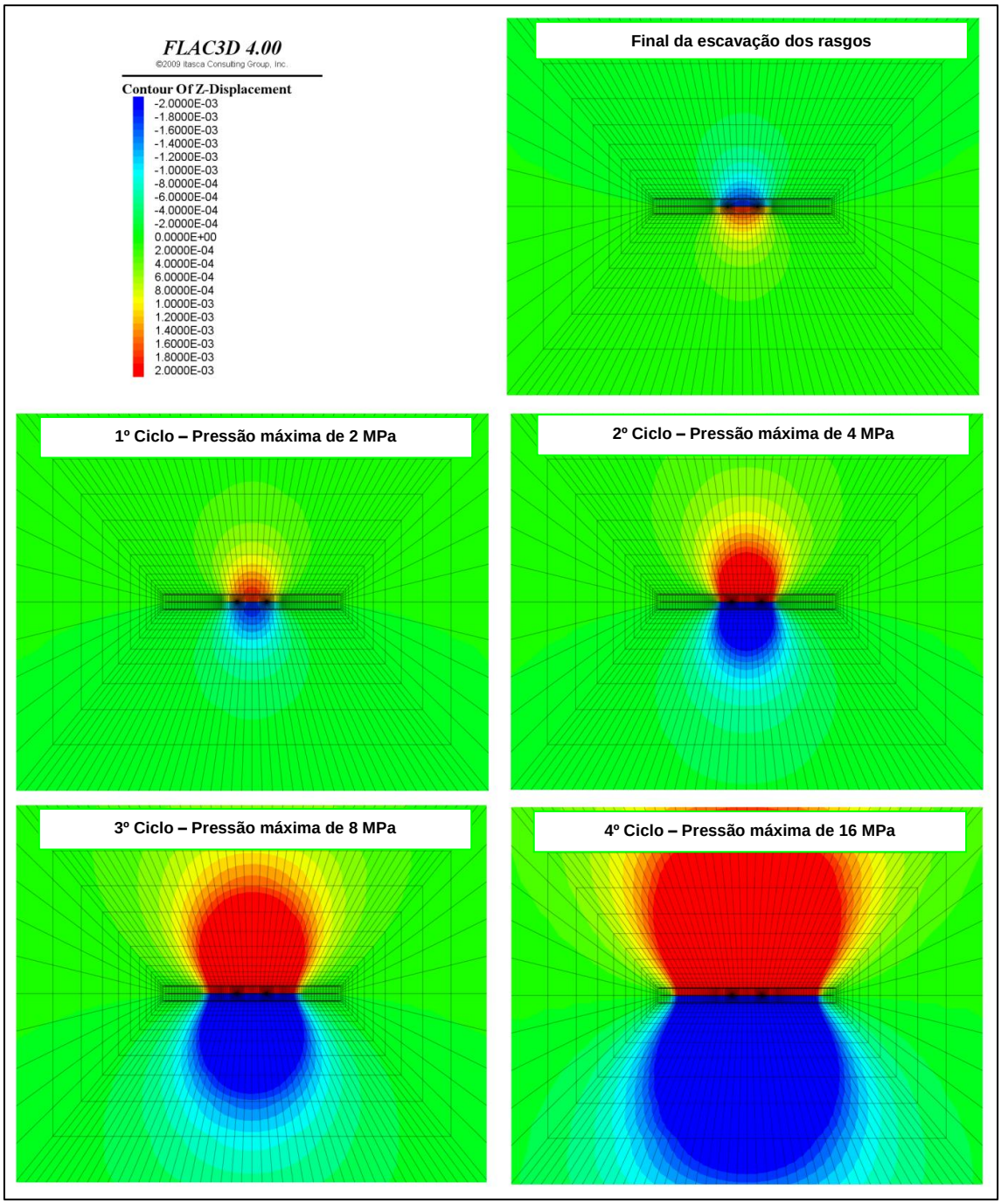



**Figura 4.16 – Deslocamentos verticais durante o ensaio**

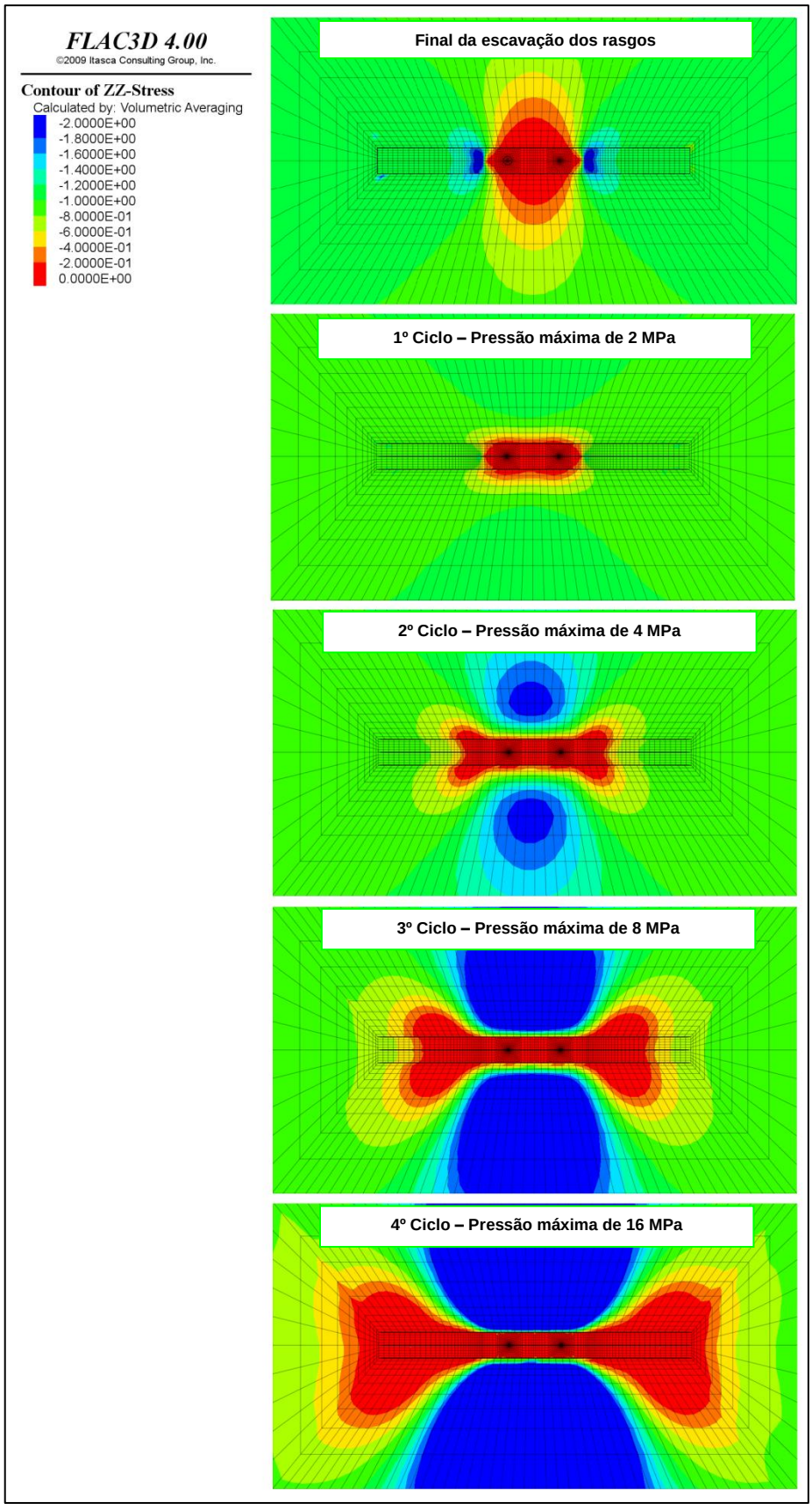



**Figura 4.17 – Tensões verticais durante o ensaio**

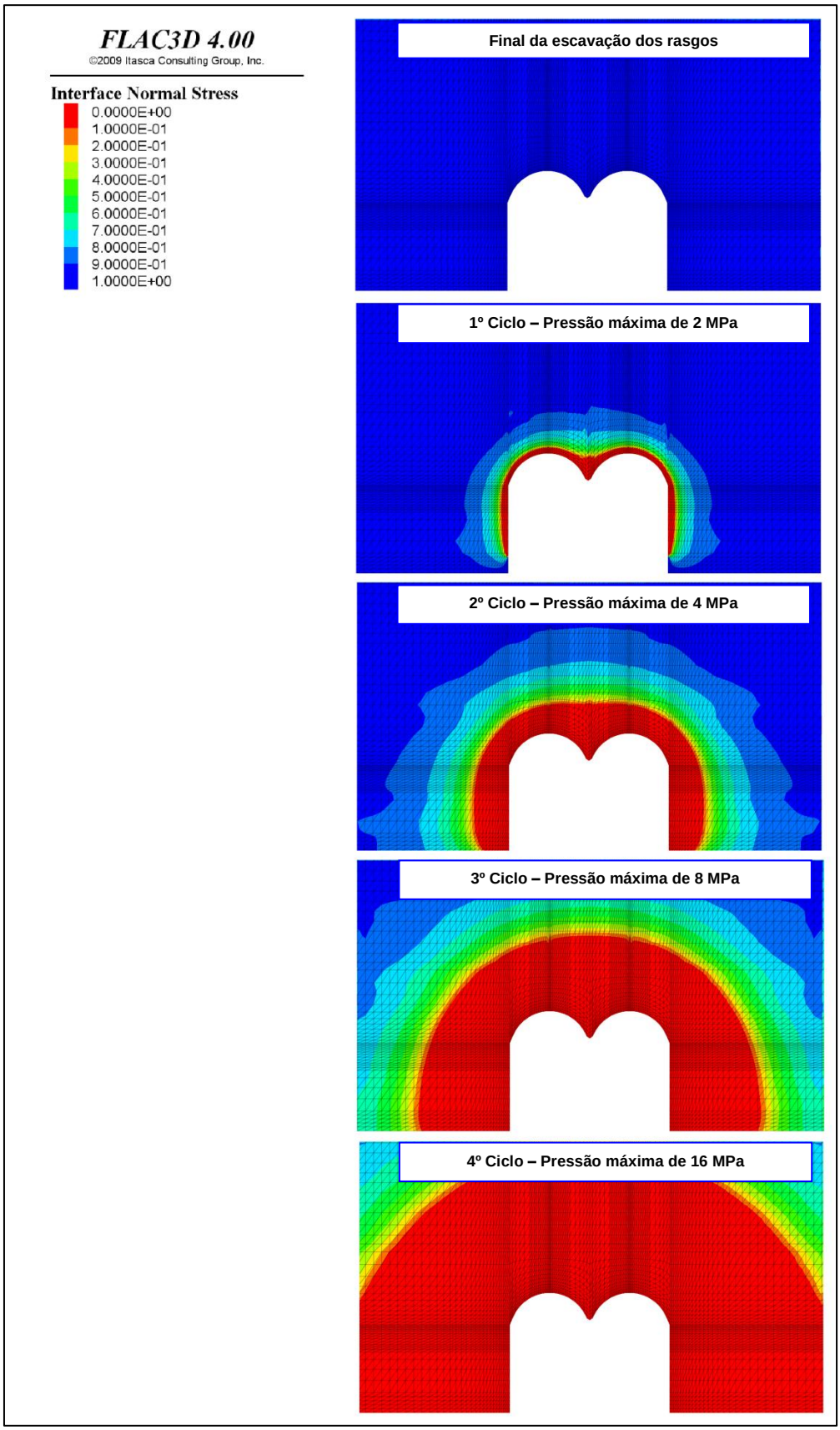



**Figura 4.18 – Tensão normal à interface durante o ensaio**

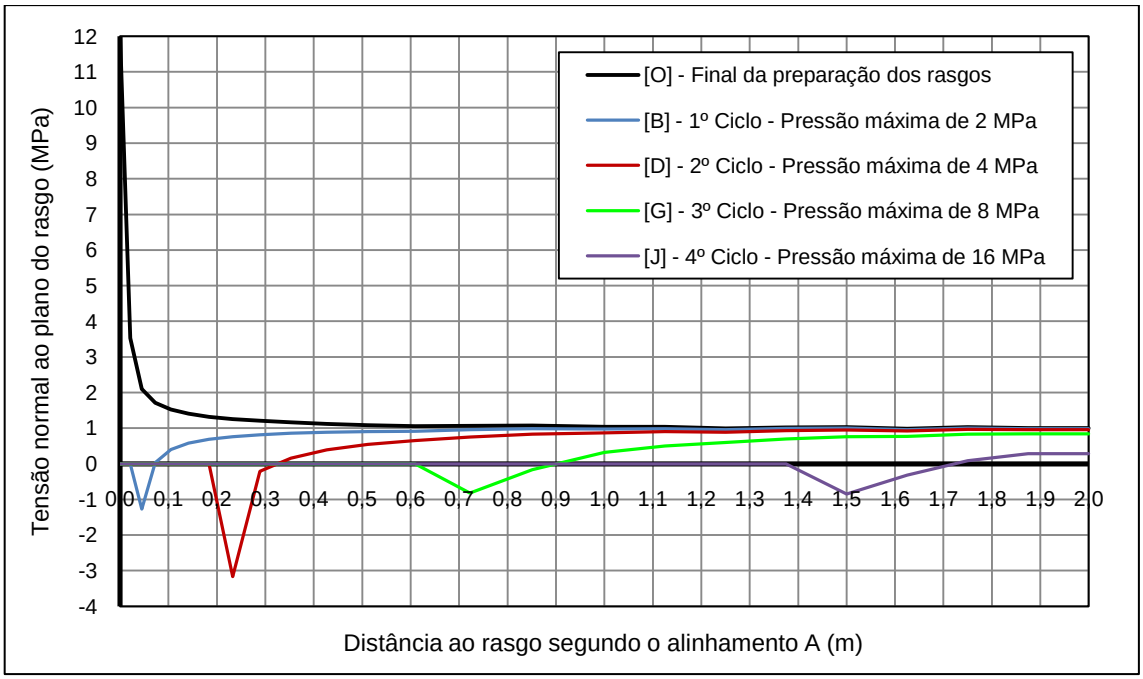



**Figura 4.19 – Evolução do estado de tensão normal à interface durante o ensaio**

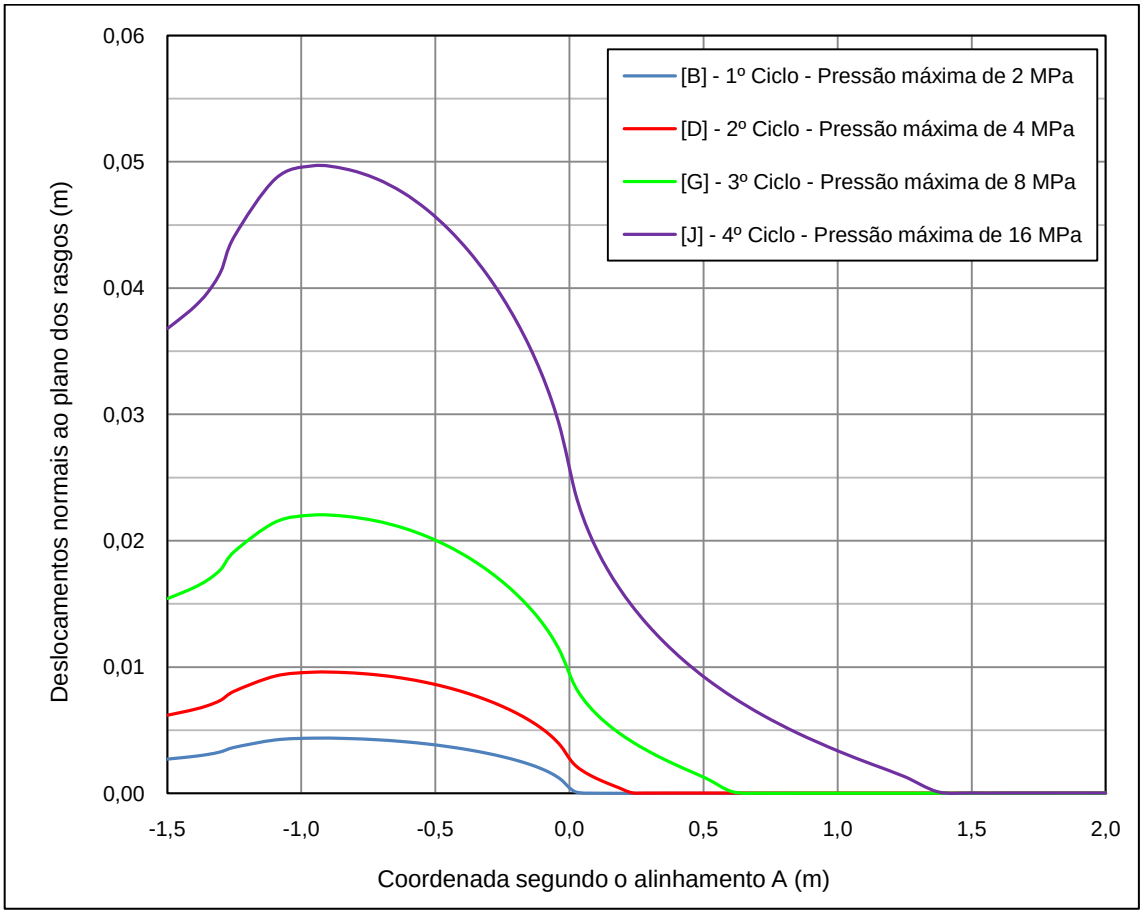



**Figura 4.20 – Deslocamentos normais ao plano dos rasgos**

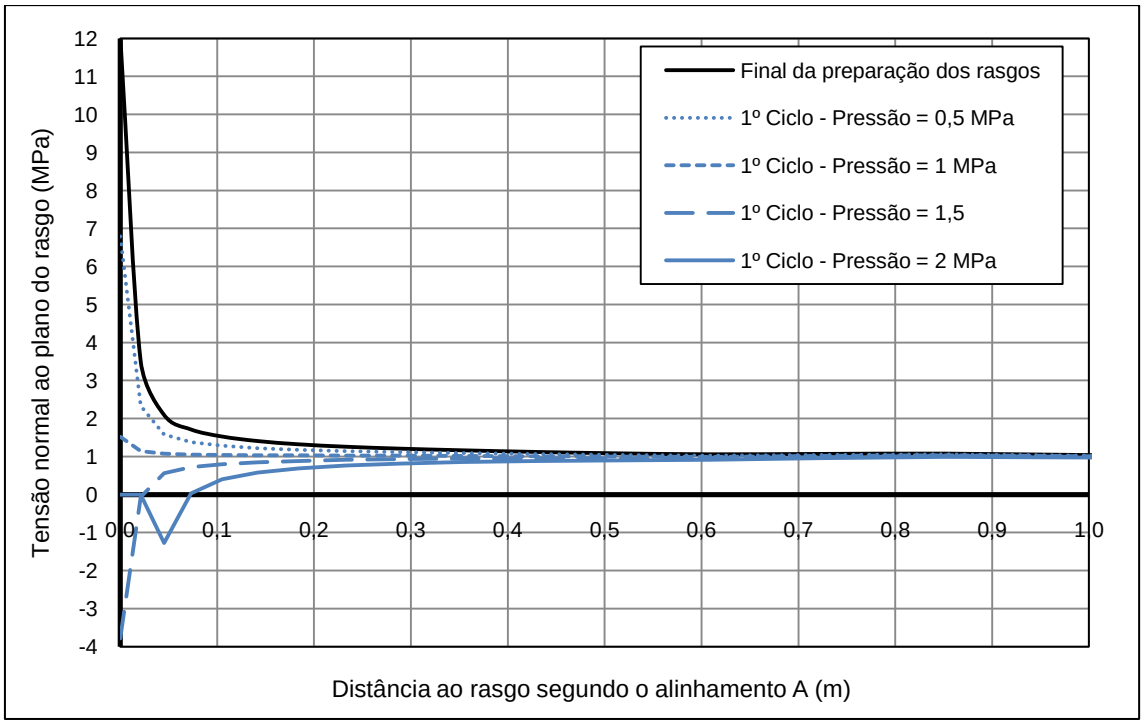



**Figura 4.21 – Evolução da tensão normal à interface durante o troço de carga do primeiro ciclo**

Sendo o objectivo principal do ensaio de macacos planos determinar o módulo de elasticidade do maciço rochoso, importa compreender a influência da evolução da fenda de tracção nos deslocamentos ocorridos para cada patamar de pressão aplicado. Para isso, o modelo permitiu calcular os deslocamentos durante o ensaio nos locais dos defórmetros dos macacos planos, indicados na Figura 4.22 para os quatro ciclos. Neste gráfico é possível observar a existência de não-linearidade e histerese, causada pela formação da fenda.

Para melhor compreender a evolução dos deslocamentos com a pressão aplicada quando se desenvolve uma fenda de tracção, foi elaborada a Figura 4.23. Com esta figura pretende-se representar, qualitativamente, a evolução dos deslocamentos no local de qualquer um dos defórmetros ou elongâmetros para os ciclos de carga e de descarga que compõem este ensaio.

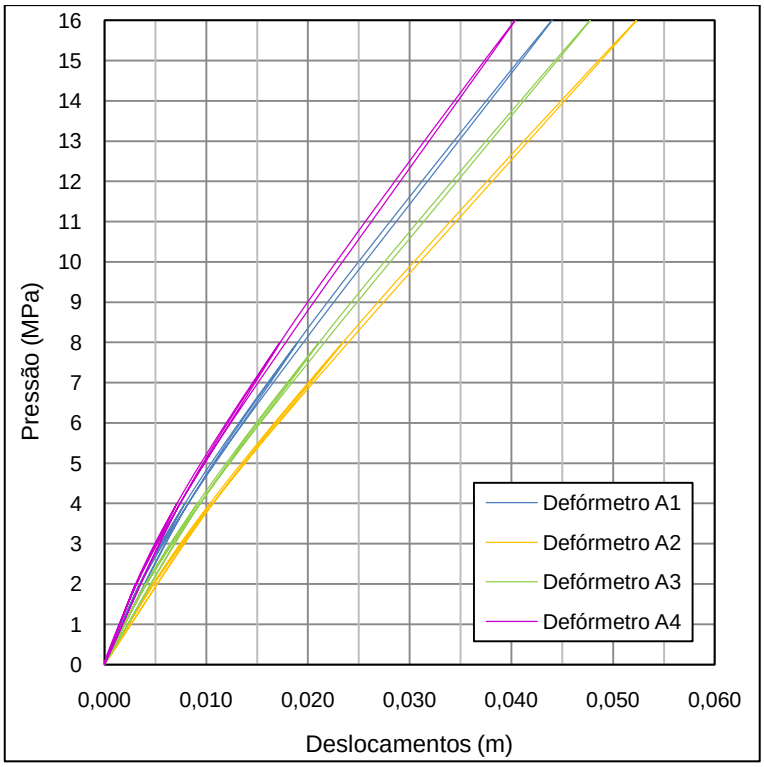



**Figura 4.22 – Deslocamentos totais nos pontos correspondentes aos defórmetros de um dos macacos planos**

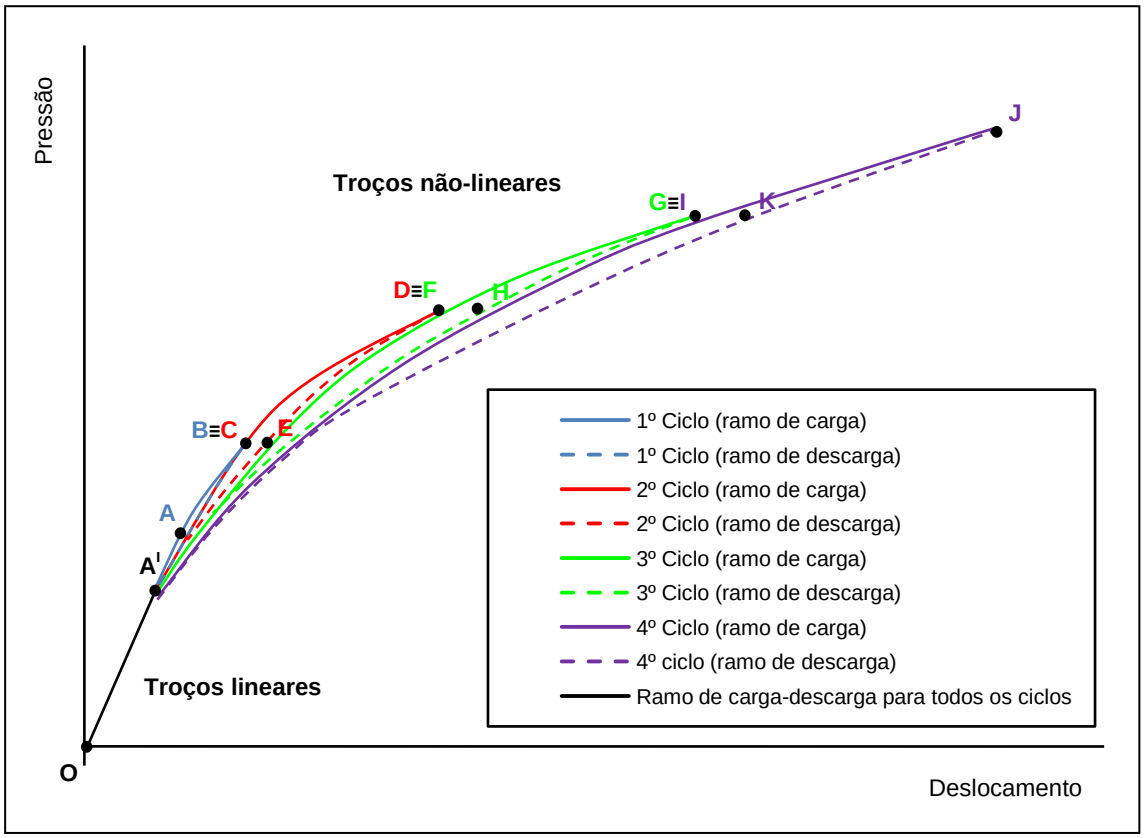



**Figura 4.23 – Diagrama qualitativo de pressão *versus* deslocamento num qualquer defórmetro**

Na Figura 4.23 observa-se um troço linear, representado pelo segmento de recta $OA^I$, e um conjunto de troços não-lineares, representados pelas curvas a traço cheio e a traço interrompido, cujas cores permitem distinguir os ciclos. O troço linear $OA^I$ corresponde ao começo do ramo de carga do primeiro ciclo, inicia-se no ponto O, que corresponde ao final da escavação dos rasgos, e termina no ponto $A^I$, que representa a pressão em que é atingida uma tensão normal nula no limite dos rasgos. O troço linear $A^IA$ representa o intervalo de pressão do ramo de carga do primeiro ciclo em que é mobilizada a resistência à tracção no plano dos rasgos, onde o ponto A corresponde à pressão que provoca o início da formação da fenda de tracção. O troço não-linear AB representa o intervalo de pressão em que ocorre o aumento da profundidade da fenda, onde o ponto B corresponde à pressão máxima do primeiro ciclo do ensaio. A trajectória do ramo de descarga ($BA^I$) é também não-linear e não-coincidente com a do ramo de carga (histerese), até que a fenda aberta pelo ramo de carga se feche, o que ocorre quando o ramo de descarga atinge o ponto $A^I$. Neste ponto, a tensão normal no limite dos rasgos volta a ser nula e a diminuição da pressão faz-se novamente em troço linear ($A^IO$). No segundo ciclo, o ramo de carga inicia-se novamente no ponto O, pois não existem deslocamentos permanentes, progredindo até $A^I$ pelo troço linear enquanto a fenda se encontra fechada. O troço $A^IC$ representa o intervalo de pressão em que ocorre a reabertura da fenda desenvolvida no ramo de carga do primeiro ciclo. A reabertura ocorre sem a mobilização de resistência à tracção, sendo, por esse motivo, coincidente com o ramo de descarga do primeiro ciclo. Em C atinge-se a pressão máxima do primeiro ciclo e o ramo de carga mantém a sua progressão em trajectória não-linear até à pressão máxima do segundo ciclo (D). O ramo de descarga deste segundo ciclo ocorre de forma idêntica ao do primeiro ciclo, ou seja, ocorre em troço não-linear e não-coincidente com a trajectória do ramo de carga até que se feche a fenda ($A^I$). No terceiro e quarto ciclos observa-se o mesmo comportamento.

Na Figura 4.24 apresentam-se as tensões normais à interface para diferentes pressões com correspondência nas letras assinaladas na Figura 4.23. As cores utilizadas para representar as tensões correspondem às cores utilizadas na Figura 4.23 para identificar os ciclos.

Como é possível observar na Figura 4.23, os deslocamentos em segunda carga são superiores aos deslocamentos em primeira carga, a partir do ponto $A^I$ (em que a fenda abre em segunda carga) e até ao ponto B≡C, correspondente à pressão máxima do primeiro ciclo. O mesmo acontece nos dois ciclos subsequentes. Os deslocamentos em descarga são superiores aos deslocamentos em carga do mesmo ciclo: vejam-se os pontos C e E e os respectivos diagramas de tensões (Figura 4.24), correspondentes à carga e à descarga do segundo ciclo.

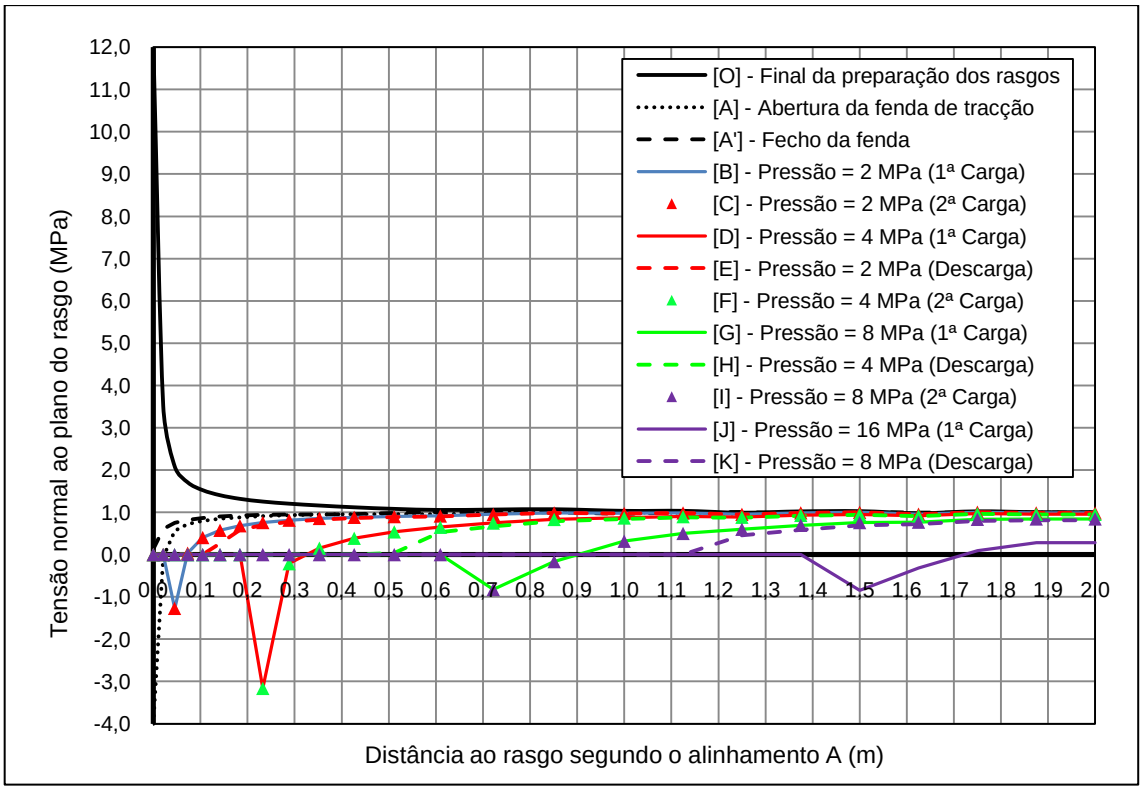



**Figura 4.24 – Tensão normal à interface para pressões do ramo de carga e de descarga nos quatro ciclos**

A Figura 4.25 ilustra, em todo o plano da interface, a diferença nas tensões normais, para a mesma pressão (neste caso 8 MPa), nos ramos de carga e de descarga, em que é possível visualizar a maior área da região fendilhada no ramo de descarga do que no ramo de carga.

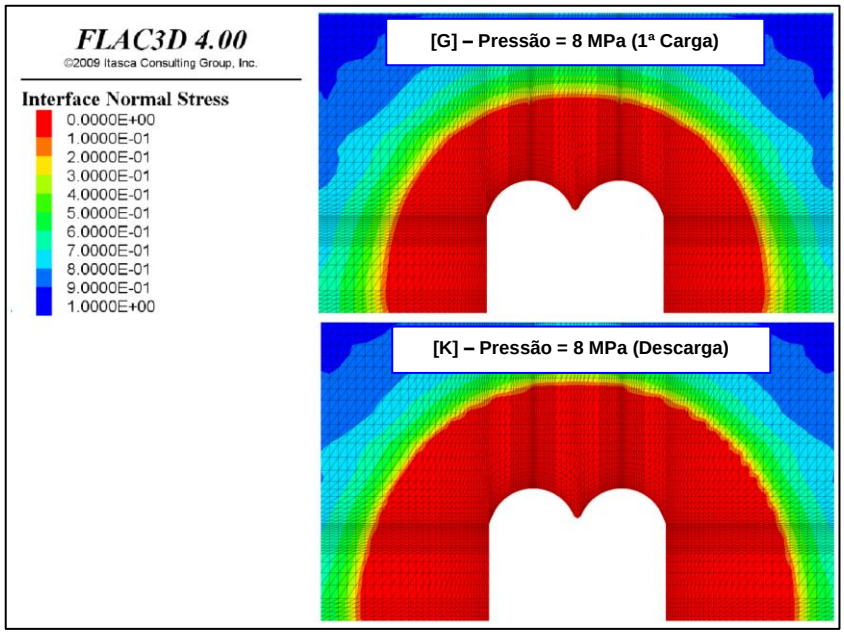



**Figura 4.25 – Comparação entre tensões normais de 1ª carga e de descarga**

### 4.3.4. Cálculo do módulo de elasticidade

Tal como referido anteriormente, o deslocamento $\delta_i$, normal ao plano do rasgo, medido nos defórmetros dos macacos planos para um incremento de pressão $\Delta p$, relaciona-se com o módulo de elasticidade E e o coeficiente de Poisson v, pela expressão:

$$E = \left(1 - v^2\right) \Delta p \ \frac{k_i}{\delta_i} \qquad (2)$$

Nesta expressão $k_i$ é uma constante que é função da geometria dos rasgos, do carregamento aplicado e da profundidade da fenda de tracção.

Como referido, a determinação da profundidade da fenda de tracção constitui a principal dificuldade na interpretação dos ensaios LFJ. Os cálculos efectuados para a simulação de um ensaio cíclico tomaram para o módulo de elasticidade o valor de 1 GPa e para o coeficiente de Poisson o valor de 0,2. Assim, é possível determinar os valores de $k_i$ para cada defórmetro a partir dos valores medidos de $\delta_i$ para os vários incrementos de pressão.

No próximo capítulo serão apresentados os cálculos efectuados para a determinação dos valores de $k_i$ para diversas situações. Nesta secção pretende-se apenas ilustrar a influência que a profundidade da fenda tem na determinação do módulo de elasticidade do maciço rochoso utilizando os dados provenientes da simulação do ensaio cíclico.

Uma vez que a profundidade da fenda não é conhecida à partida, se se utilizar a expressão (2) para uma fenda nula obtém-se um diagrama de variação do módulo de elasticidade secante, durante a primeira carga, com o incremento de pressão de ensaio, que se representa qualitativamente na Figura 4.26. Este diagrama apresenta nas ordenadas o módulo de elasticidade ($E_{real}$) calculado pela expressão (2), adimensionalizado mediante a divisão pelo módulo conhecido ($E_{medido}$) do maciço (neste caso 1 GPa), e nas abcissas representa-se o incremento de pressão de ensaio medido desde a pressão nula inicial.

O diagrama da Figura 4.26 mostra que a partir de uma determinada pressão (neste caso entre 1,5 e 2 MPa), observa-se uma diminuição do valor do módulo de elasticidade calculado, o que se deve à abertura da fenda. Para se obter o valor correcto do módulo de elasticidade, deverão ser utilizados os valores de $k_i$ (função da profundidade da fenda) que conduzem a valores unitários nas ordenadas.

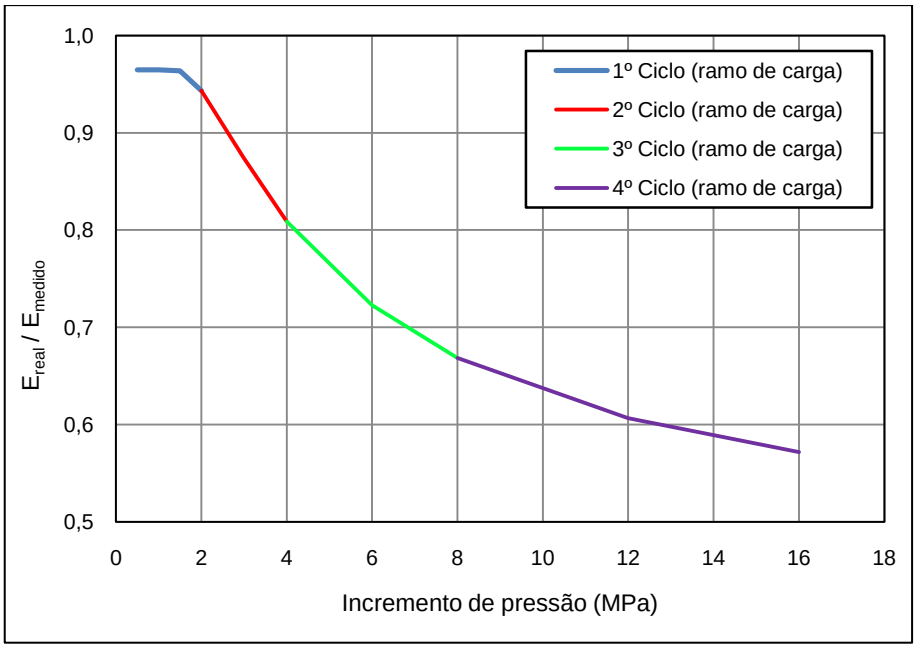



**Figura 4.26 – Variação do módulo de elasticidade calculado sem a correcção do efeito da fenda de tracção**

A metodologia c) apresentada na secção 3.6.2. para interpretação dos ensaios baseia-se numa análise semelhante à aqui apresentada, na qual se determina o desenvolvimento da fenda de tracção com base na evolução do módulo de elasticidade.

### 4.3.5. Cálculo da tensão inicial

Atendendo à importância da tensão inicial normal aos rasgos no desenvolvimento da fenda de tracção, e ao facto de ela constituir, em regra, uma incógnita, foi apresentada por Figueiredo *et al* [22] uma metodologia que permite estimar o seu valor a partir dos resultados do ensaio.

O princípio da metodologia proposta consiste na medição da pressão de ensaio, aplicada pelos macacos planos, que cancela o deslocamento de fecho verificado entre as marcas superficiais durante a escavação dos rasgos. A Figura 4.27 representa graficamente os resultados obtidos com o modelo de cálculo para a determinação da pressão de cancelamento, tendo sido aplicada uma tensão inicial normal de 1 MPa. Nas abcissas representam-se os deslocamentos entre pares de marcas superficiais. Na parte inferior das ordenadas estão representadas as diferentes fases de escavação dos rasgos e na parte superior as tensões de ensaio.

No trabalho referido, os autores concluíram que a pressão de cancelamento $p_c$ é pouco sensível ao valor da resistência à tracção do maciço. Assim, a tensão inicial normal $\sigma_{zz}$ pode ser determinada pelas seguintes relações:

$$\sigma_{zz} = \frac{p_c}{2{,}19}, \text{ para as marcas C1-C2} \qquad (7)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{p_c}{2{,}10}, \text{ para as marcas C3-C4} \qquad (8)$$

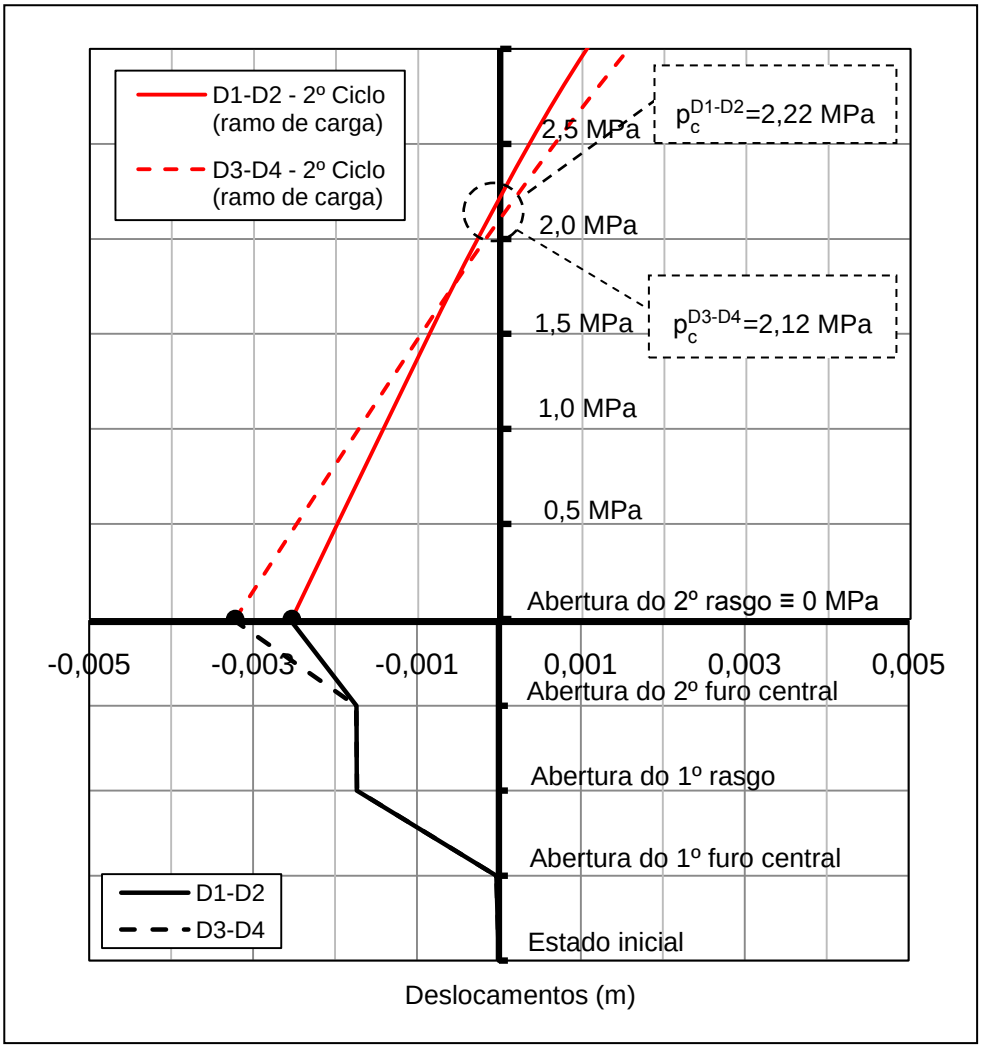



**Figura 4.27 – Deslocamentos nas marcas de um dos macacos planos durante a fase de escavação e pressurização**

# 5. APLICAÇÕES DO MODELO INTERPRETATIVO

## 5.1. Cálculos para interpretação dos ensaios

### 5.1.1. Influência da tensão inicial na profundidade da fenda

Como demonstrado no capítulo anterior, através da análise das tensões normais ao plano dos rasgos, durante a fase de escavação e durante a fase de pressurização, existe uma influência directa entre a grandeza dessas tensões, a resistência à tracção do maciço e a profundidade da fenda atingida durante a pressurização dos macacos planos. Com efeito, para conhecer a profundidade da fenda num ensaio LFJ, torna-se necessário estabelecer uma relação entre esta, a tensão inicial, a pressão aplicada e a resistência à tracção.

Para estabelecimento dos cálculos a executar e da metodologia de análise dos seus resultados, foram primeiramente analisadas as considerações apresentadas por Pinto [6] relativamente à relação existente entre aqueles quatro parâmetros.

Considerem-se as hipóteses simplificativas utilizadas na modelação do ensaio LFJ apresentadas no capítulo anterior, nomeadamente um maciço rochoso elástico linear com resistência à tracção $\sigma_t$.

Se o maciço rochoso apenas se encontrar sujeito a uma pressão p aplicada pelos macacos planos na direcção normal ao plano dos rasgos, a tensão $\sigma_1$ no bordo da fenda de profundidade h pode escrever-se como uma função f da profundidade h da fenda:

$$\sigma_1 = f(h)\, p \qquad (9)$$

Se a resistência à tracção do maciço for nula e existir uma tensão inicial $\sigma_{zz}$ normal ao plano dos rasgos, a tensão $\sigma_2$ no bordo da mesma fenda de profundidade h pode escrever-se como uma função g da profundidade h da fenda:

$$\sigma_2 = g(h)\, \sigma_{zz} \qquad (10)$$

Para que a profundidade da fenda atinja a profundidade h, é necessário que a tensão de tracção $\sigma_1$ devida à aplicação da pressão p pelos macacos planos seja igual à tensão de compressão $\sigma_2$, somada à resistência à tracção do maciço, ou seja:

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_t \qquad (11)$$

Substituindo (9) e (10) em (11), tem-se:

$$f(h)\, p = g(h)\, \sigma_{zz} + \sigma_t \qquad (12)$$

ou seja:

$$p = \frac{g(h)}{f(h)}\ \sigma_{zz} + \frac{1}{f(h)}\ \sigma_t = \psi(h)\ \sigma_{zz} + \varphi(h)\, \sigma_t \qquad (13)$$

ou ainda:

$$\frac{p}{\sigma_{zz}} = \psi(h) + \varphi(h)\frac{\sigma_t}{\sigma_{zz}} \qquad (14)$$

Esta última expressão mostra que, para cada valor de h, a relação $p/\sigma_{zz}$ varia linearmente com $\sigma_t/\sigma_{zz}$. Esta constatação permitiu programar os cálculos e efectuar a análise dos resultados, considerando os valores da pressão e da resistência à tracção adimensionalizados através da sua divisão pela tensão inicial $\sigma_{zz}$. Tal possibilitou realizar todos os cálculos com um valor unitário de tensão inicial.

### 5.1.2. Metodologia para análise de resultados

A cada combinação de macacos planos corresponde um determinado número de rasgos abertos, um determinado número de rasgos carregados e uma inclinação do plano dos rasgos. As combinações consideradas apresentam-se na secção seguinte. Para cada uma dessas combinações realizaram-se cálculos cujos resultados consistem nos valores estimados da profundidade h da fenda para uma dada resistência à tracção adimensionalizada $\sigma_t/\sigma_{zz}$ e uma dada pressão adimensionalizada $p/\sigma_{zz}$.

Para cada uma destas combinações procurou-se, por regressão múltipla, obter a equação da superfície mais provável que relacione estes três parâmetros. Para tal, considerou-se que tanto a função ψ(h) como a função φ(h) podem ser aproximadas por funções quadráticas de h, em que a, b, c, d, e, f são constantes:

$$\psi(h) = a + b\,h + c\,h^2 \qquad (15)$$

$$\varphi(h) = d + e\,h + f\,h^2 \qquad (16)$$

A equação (14) pode, então, ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{p}{\sigma_{zz}} = a + b\,h + c\,h^2 + d\,\frac{\sigma_t}{\sigma_{zz}} + e\,\frac{\sigma_t}{\sigma_{zz}}\,h + f\,\frac{\sigma_t}{\sigma_{zz}}\,h^2 \qquad (17)$$

Obtidas as seis constantes por regressão múltipla, a partir dos conjuntos de valores ($p/\sigma_{zz}$, $\sigma_t/\sigma_{zz}$, h), tem-se a equação que relaciona estes três parâmetros, a partir da qual é possível traçar diversos diagramas de interpretação dos resultados [27].

Finalmente, observa-se que no caso de a adimensionalização ser feita em relação a $\sigma_t$, em vez de $\sigma_{zz}$, a equação equivalente à equação (14) seria:

$$\frac{p}{\sigma_t} = \psi(h)\,\frac{\sigma_{zz}}{\sigma_t} + \varphi(h) \qquad (18)$$

Neste caso, a superfície que se obteria seria:

$$\frac{p}{\sigma_t} = a\,\frac{\sigma_{zz}}{\sigma_t} + b\,\frac{\sigma_{zz}}{\sigma_t}\,h + c\,\frac{\sigma_{zz}}{\sigma_t}\,h^2 + d + e\,h + f\,h^2 \qquad (19)$$

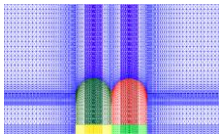
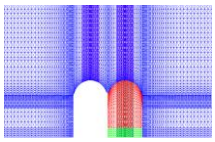
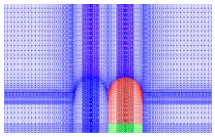
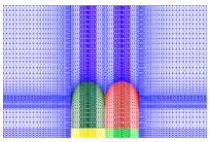
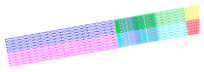
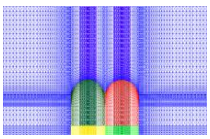
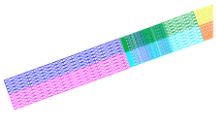
A utilização desta expressão é necessária nos casos em que $\sigma_{zz} = 0$, isto é, nos casos em que a equação (17) não é válida.

### 5.1.3. Determinação da profundidade da fenda

Com o modelo foram simuladas as diferentes combinações de macacos planos descritas no Quadro 5.1. A escolha destas combinações foi realizada seleccionando as mais utilizadas em ensaios reais. Assim, além da mais comum (dois macacos planos sem inclinação) foram calculadas outras em que existe variação da inclinação do plano dos rasgos, variação do número de rasgos abertos e variação do número de rasgos pressurizados. A necessidade do cálculo destas combinações está associada ao facto de, ocasionalmente, existirem limitações na escavação das câmaras de ensaio que impossibilitam a abertura de um dos rasgos ou que impedem a abertura do plano dos rasgos na perpendicular da superfície da câmara de ensaio. Existem, também, os casos em que

ocorre rotura de um dos macacos planos, limitando a continuação do ensaio à pressurização de apenas um dos macacos planos.

**Quadro 5.1 – Situações para as quais foram realizados cálculos**

| Combinação de macacos planos | Número de macacos planos pressurizados | Número de rasgos executados | Inclinação do plano dos rasgos | Número de incrementos de pressão aplicados |
|---|---|---|---|---|
|  | 2 | 2 | 0º | 68 |
|  | 1 | 2 | $0^0$ | 136 |
|  | 1 | 1 | $0^0$ | 94 |
|   | 2 | 2 | $10^0$ | 67 |
|   | 2 | 2 | $20^0$ | 67 |

Para desenvolver os diagramas que permitem estimar a profundidade da fenda (referidos na secção anterior), foram realizados cálculos com o modelo onde os parâmetros atribuídos se apresentam no Quadro 5.2. A escolha destes parâmetros procurou simular os casos mais comuns de ensaio e, assim, abranger o maior número de situações possíveis.

**Quadro 5.2 – Condições iniciais do modelo, utilizadas para a realização de cálculos para as diferentes combinações de macacos planos**

| Módulo de elasticidade | Coeficiente de Poisson | Tensão inicial | Resistência à tracção dos elementos da interface | Pressão aplicada pelos macacos planos |
|---|---|---|---|---|
| 1 GPa | 0,2 | 1 MPa | 0 MPa | Entre os 0,5 e os 32 MPa, geralmente até ser atingida uma fenda entre 1 e 1,8 m de profundidade |
| | | | 1 MPa | |
| | | | 2 MPa | |
| | | | 4 MPa | |
| | | | 8 MPa | |

Utilizando a metodologia apresentada na secção anterior desenvolveu-se, para a combinação de dois macacos planos sem inclinação, a representação tridimensional da expressão (17), em que a superfície se apresenta na Figura 5.1. Esta permite determinar a profundidade da fenda em função das relações $p/\sigma_{zz}$ e $\sigma_t/\sigma_{zz}$. As superfícies referentes às outras combinações de macacos planos encontram-se no Anexo A.

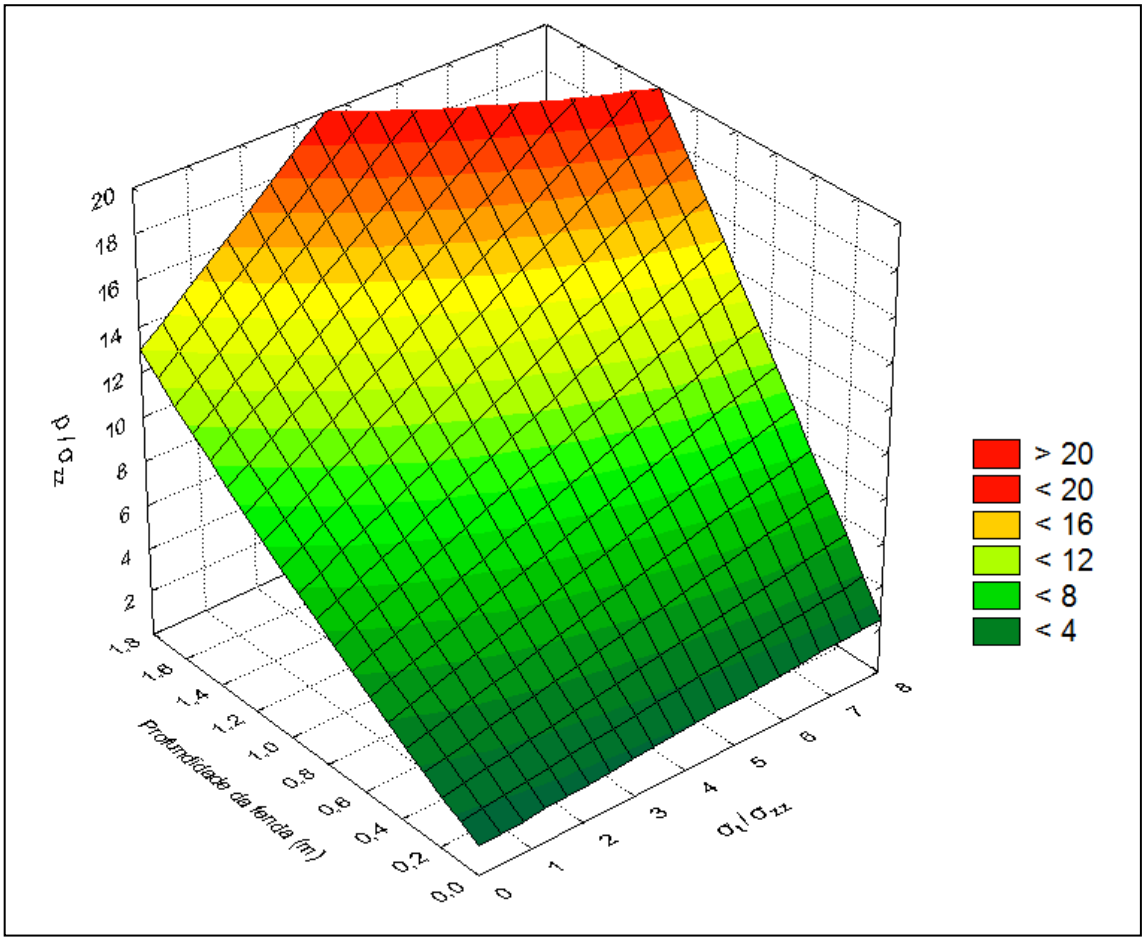



**Figura 5.1 – Superfície tridimensional de representação da expressão (17), para a combinação de dois macacos planos sem inclinação**

Ainda utilizando a expressão (17), foi possível desenvolver, para todas as combinações de macacos planos, diagramas do tipo dos apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3. Na Figura 5.2 apresenta-se, para a combinação de dois macacos planos sem inclinação, o diagrama que permite determinar a profundidade da fenda conhecendo $p/\sigma_{zz}$ e $\sigma_t/\sigma_{zz}$. A Figura 5.3 apresenta um diagrama que, também, permite determinar a profundidade da fenda conhecendo $p/\sigma_{zz}$ e $\sigma_t/\sigma_{zz}$, este, mais apropriado aos casos em que se conhece com maior precisão a relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$. No primeiro destes diagramas (Figura 5.2) indicam-se, com os pontos a vermelho, os resultados dos cálculos realizados com o modelo numérico.

Como já referido, o facto destes diagramas não contemplarem a situação em que a tensão inicial é nula, obrigou, utilizando a expressão (19), ao desenvolvimento de um diagrama que permitisse determinar a profundidade da fenda conhecendo $p/\sigma_{zz}$ e $\sigma_t/\sigma_{zz}$. Esse diagrama apresenta-se na Figura 5.4. Os diagramas respeitantes às outras combinações de macacos planos encontram-se no Anexo A.

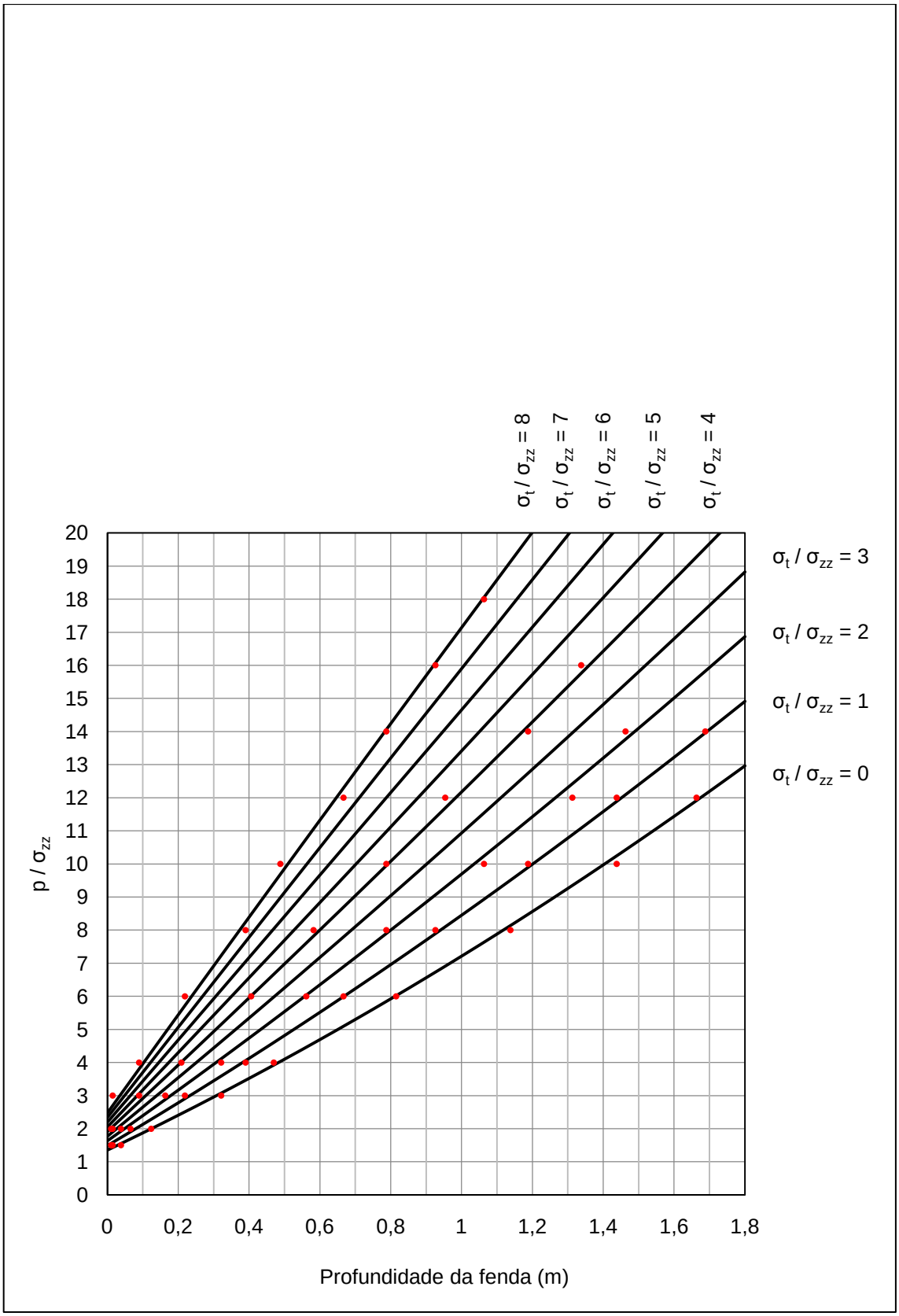



**Figura 5.2 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para a combinação de dois macacos planos sem inclinação**

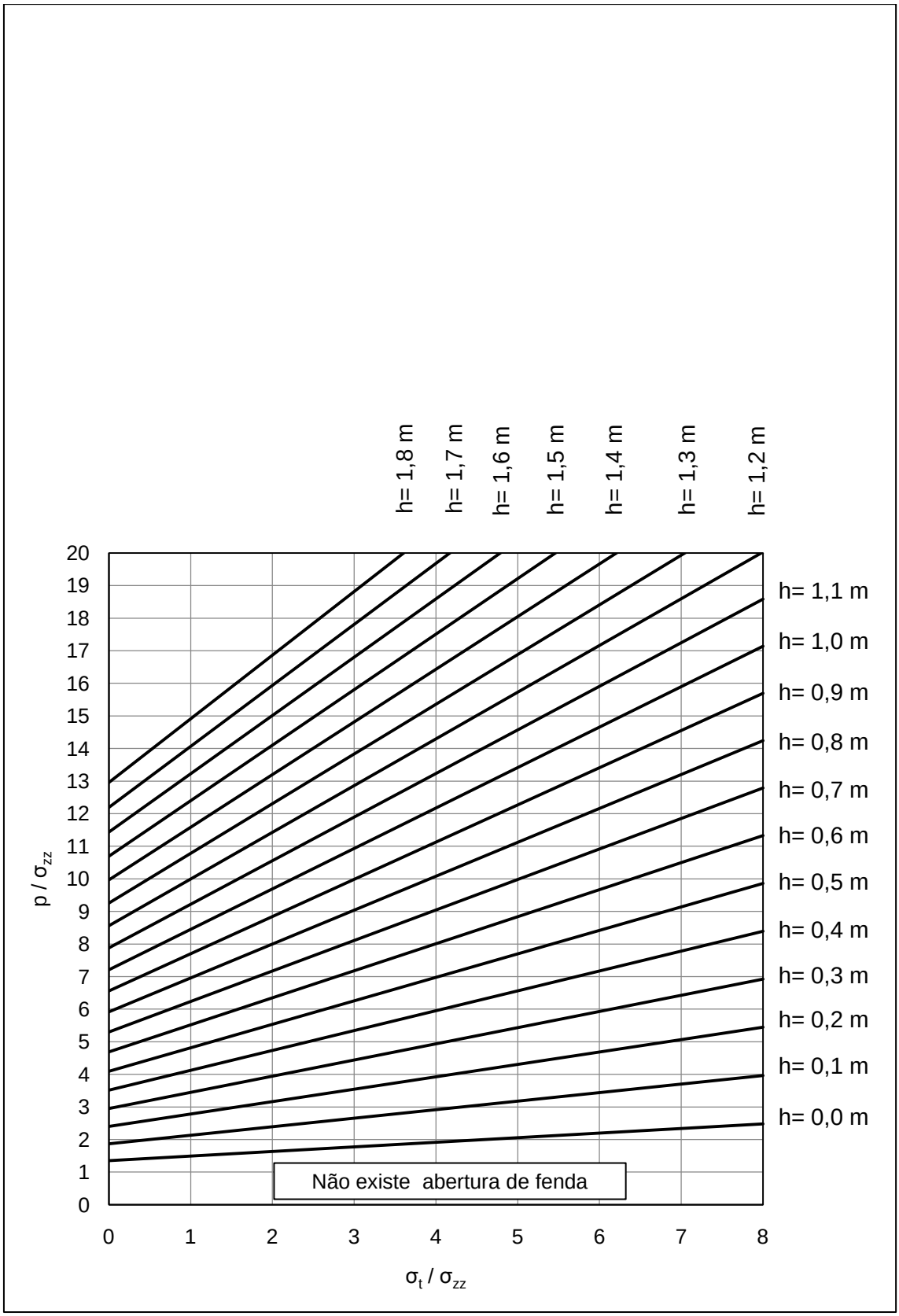



**Figura 5.3 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para várias profundidades de fenda, para a combinação de dois macacos planos sem inclinação**

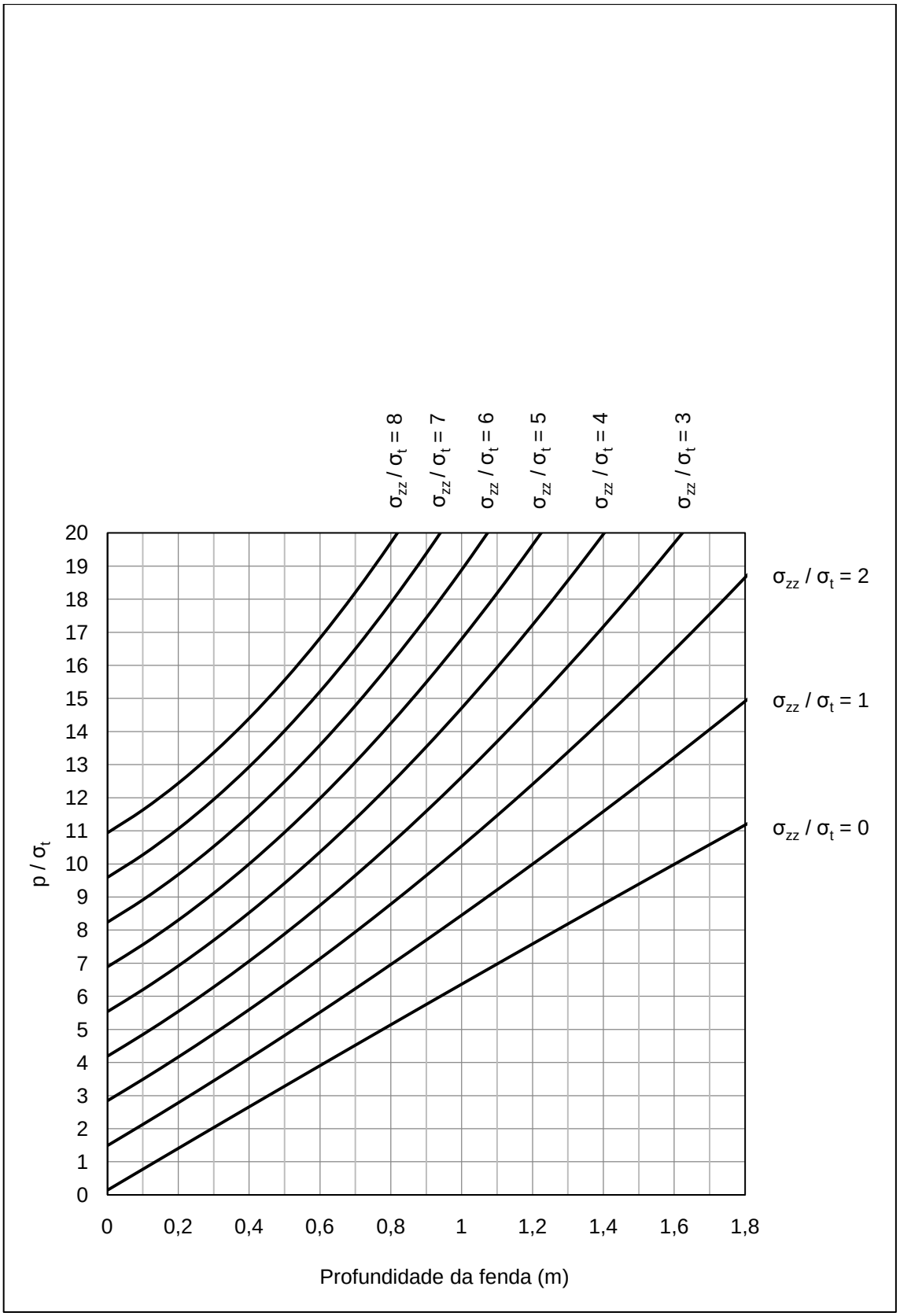



**Figura 5.4 – Diagrama $p/\sigma_t$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_{zz}/\sigma_t$ , para a combinação de dois macacos planos sem inclinação**

### 5.1.4. Determinação do módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade envolve a utilização da expressão:

$$E = \left(1 - v^2\right)\ \Delta p\ \frac{k_i}{\delta_i} \qquad (2)$$

Para a sua utilização é necessário conhecer as constantes $k_i$, que dependem da profundidade da fenda de tracção h. O modelo permitiu calcular estas constantes e apresentá-las sob a forma de ábaco, onde a função $k_i$ fornece o valor da constante em cada defórmetro ou elongâmetro i, para cada profundidade de fenda h.

Para a determinação da constante correspondente a cada profundidade de fenda e a cada local de medição dos deslocamentos foi aplicada a metodologia expressa pelo diagrama da Figura 5.5. Estas constantes podem ser utilizadas para a interpretação dos resultados dos ensaios LFJ independentemente dos parâmetros do maciço rochoso (módulo de elasticidade, resistência à tracção, tensão inicial, pressão aplicada ou coeficiente de Poisson).

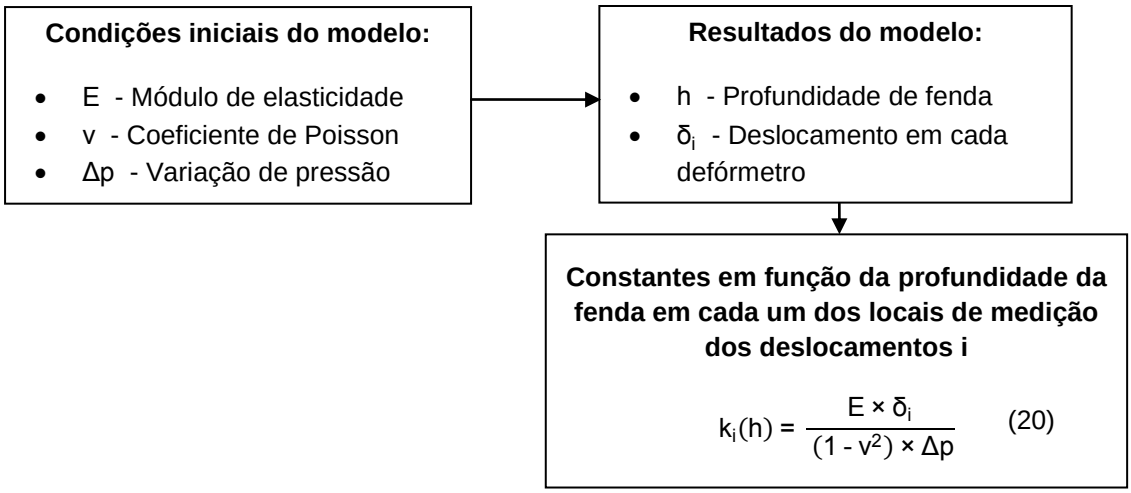



**Figura 5.5 – Metodologia de determinação das constantes a partir do modelo**

Cada curva $k_i$ representada nos ábacos (Figura 5.6) resulta de um ajuste a uma curva de segundo grau, que tende a estabilizar para um valor máximo de $k_i$. As curvas apresentam diferentes valores para a mesma profundidade de fenda pois a cada curva está associado um, diferente, local i de medição de deslocamentos.

Nos locais onde se localizam os defórmetros e os elongâmetros registam-se diferentes valores de deslocamentos para um mesmo valor de profundidade de fenda. Assim, as curvas com valores de $k_i$ superiores dizem respeito a locais de medição onde se verificou, para a mesma profundidade de fenda, maiores deslocamentos normais ao plano dos rasgos.

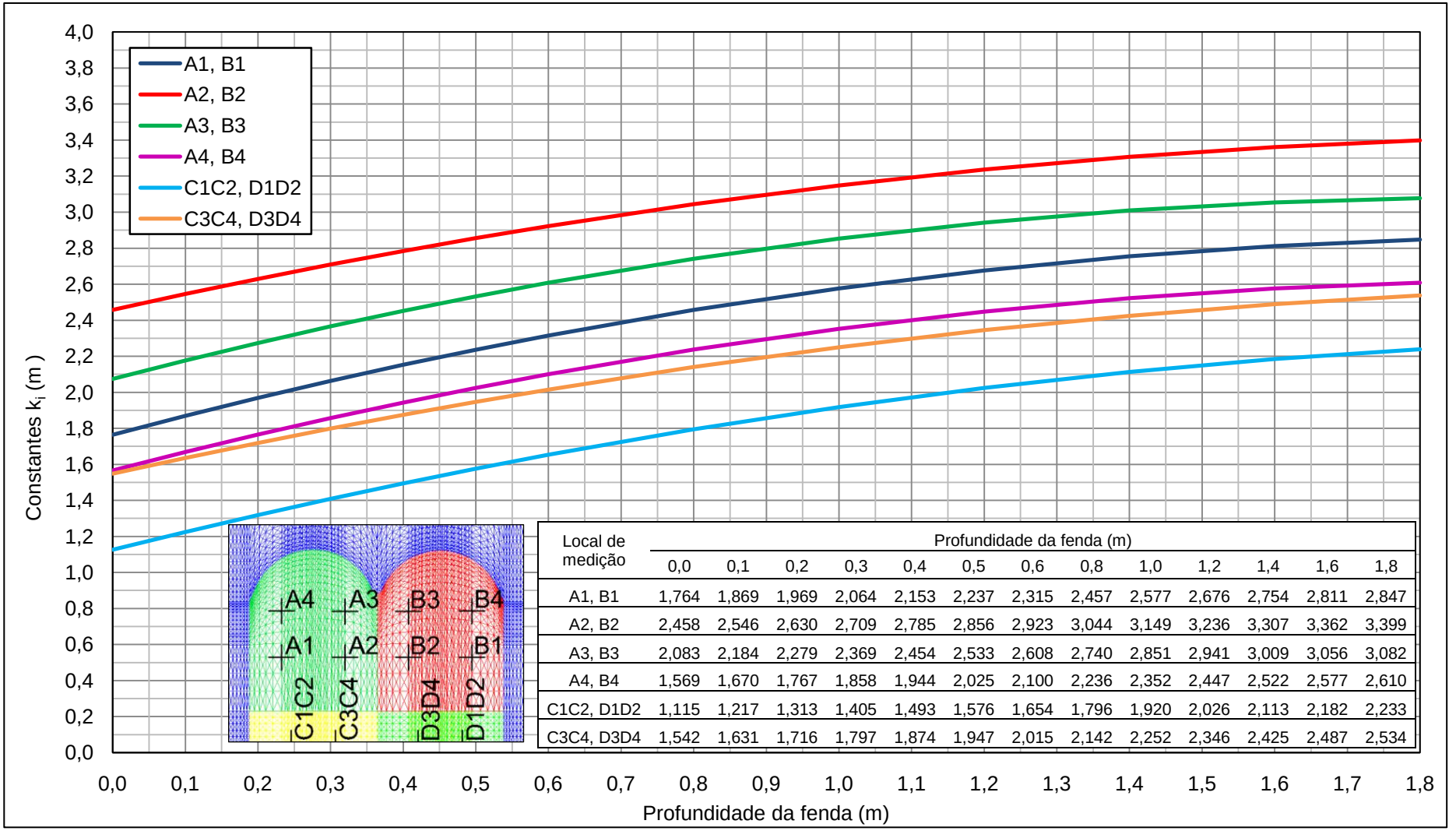
Em relação ao modelo original foi realizado, adicionalmente, o cálculo dos valores de $k_i$ nos locais onde se instalam os elongâmetros. Este cálculo permite que os deslocamentos aí medidos possam também ser utilizados para o cálculo do módulo de elasticidade e não apenas para a determinação da tensão inicial.

As curvas $k_i$ apresentam um andamento crescente, que se deve ao facto de à medida que a profundidade de fenda aumenta, aumentam igualmente os deslocamentos normais medidos, pelo que é necessário um maior valor de $k_i$ que os "corrija", compensando os efeitos decorrentes da geometria dos macacos planos e da abertura da fenda de tracção.

A existência de um patamar de estabilização para cada curva $k_i$ deve-se ao facto de existir uma profundidade de fenda a partir da qual os efeitos da geometria dos macacos planos e da abertura da fenda deixam de exercer influência sobre os locais de medição, deixando de justificar um aumento do valor de $k_i$ para os compensar.

Nos ábacos encontram-se representados, graficamente e em tabela, os resultados obtidos até uma profundidade de fenda de 1,8 m. Este limite deve-se ao facto da interface ter, segundo o alinhamento A, um comprimento livre para o desenvolvimento da fenda de tracção de 2 m.

O ábaco onde é possível realizar a consulta das constantes para a combinação de dois macacos planos apresenta-se na Figura 5.6. Neste ábaco é possível observar o maior valor das constantes para a curva que representa a posição dos defórmetros A2 e B2. Tal justifica-se pelo facto destes ocuparem simultaneamente a posição mais distante dos limites dos rasgos e, consequentemente, mais próxima da superfície livre, onde existe menor efeito de confinamento do maciço rochoso. Os ábacos para as restantes combinações de macacos planos encontram-se no Anexo B.




| Local de medição | Profundidade da fenda (m) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| A1, B1 | 1,764 | 1,869 | 1,969 | 2,064 | 2,153 | 2,237 | 2,315 | 2,457 | 2,577 | 2,676 | 2,754 | 2,811 | 2,847 |
| A2, B2 | 2,458 | 2,546 | 2,630 | 2,709 | 2,785 | 2,856 | 2,923 | 3,044 | 3,149 | 3,236 | 3,307 | 3,362 | 3,399 |
| A3, B3 | 2,083 | 2,184 | 2,279 | 2,369 | 2,454 | 2,533 | 2,608 | 2,740 | 2,851 | 2,941 | 3,009 | 3,056 | 3,082 |
| A4, B4 | 1,569 | 1,670 | 1,767 | 1,858 | 1,944 | 2,025 | 2,100 | 2,236 | 2,352 | 2,447 | 2,522 | 2,577 | 2,610 |
| C1C2, D1D2 | 1,115 | 1,217 | 1,313 | 1,405 | 1,493 | 1,576 | 1,654 | 1,796 | 1,920 | 2,026 | 2,113 | 2,182 | 2,233 |
| C3C4, D3D4 | 1,542 | 1,631 | 1,716 | 1,797 | 1,874 | 1,947 | 2,015 | 2,142 | 2,252 | 2,346 | 2,425 | 2,487 | 2,534 |

**Figura 5.6 – Evolução das constantes em cada defórmetro ou elongâmetro em função da profundidade da fenda de tracção para a combinação de dois macacos planos sem inclinação do plano dos rasgos**

## 5.2. Análise da influência da geometria dos rasgos e do carregamento

### 5.2.1. Influência do número de rasgos e do carregamento aplicado

A adopção de diferentes combinações de macacos planos impõe ao modelo do maciço rochoso diferentes condições de carregamento. Nesta secção pretende-se analisar a diferença na resposta do maciço rochoso para diferentes combinações de macacos planos.

Para observar a evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$ aplicada e da relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$ adoptada, desenvolveram-se as Figuras 5.7 a 5.11.

As Figuras 5.7 a 5.11 permitem visualizar que as combinações de um macaco plano com um rasgo e com dois rasgos, apresentam uma evolução da profundidade da fenda idêntica, e que a combinação de dois macacos planos requer, comparativamente com as outras duas, um menor incremento da relação $p/\sigma_{zz}$ para atingir igual profundidade da fenda. Também é possível verificar que o aumento da relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$ diminui a diferença entre as curvas correspondentes a cada uma das combinações de macacos planos

Para comparar a geometria da região fendilhada da combinação de um macaco plano e um rasgo, com a a geometria da região fendilhada da combinação de um macaco plano e dois rasgos, desenvolveram-se, para a mesma relação $p/\sigma_{zz}$ aplicada e para a mesma relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$ adoptada, as Figuras 5.12 e 5.13.

A observação da Figuras 5.12 e 5.13 possibilita visualizar a maior área fendilhada provocada pela pressurização de um macaco plano e um rasgo, quando comparada com a área fendilhada de um macaco plano e dois rasgos.

Para comparar as tensões verticais, no interior do maciço rochoso (segundo o alinhamento A), provocadas pela pressurização de um macaco plano e um rasgo com as provocadas pela pressurização de dois macacos planos, desenvolveram-se, para a mesma relação $p/\sigma_{zz}$ aplicada e para a mesma relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$ adoptada, as Figuras 5.14 e 5.15.

A análise das Figuras 5.14 e 5.15 permite visualizar as superiores tensões verticais de compressão no maciço (a azul) e as mais profundas tensões de tracção, no limite da fenda (a vermelho), provocadas pela combinação de dois macacos planos.

Para analisar os diferentes volumes solicitados pela combinação de dois macacos planos e pela combinação de um macaco plano e um rasgo, desenvolveram-se, para a mesma relação de $p/\sigma_{zz}$ aplicada e para a mesma relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$ adoptada, as Figuras 5.16 e

5.17. Nestas, apresenta-se uma perspectiva do interior da malha global do modelo, onde, a azul, se assinalam os elementos da malha do modelo em que a tensão principal mínima excedeu em 20% a tensão inicial do modelo.

Nas Figuras 5.16 e 5.17 verifica-se que a utilização de dois macacos planos permite solicitar um maior volume de maciço do que a utilização de apenas um macaco plano.

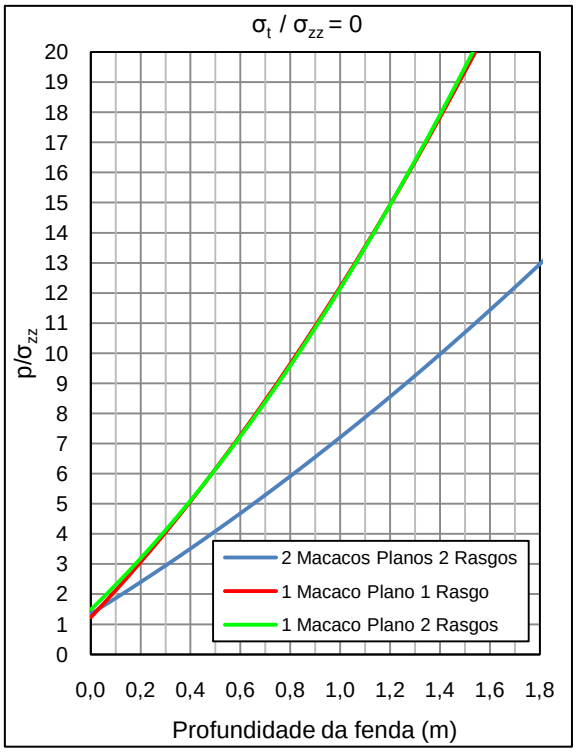



**Figura 5.7 – Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 0$ para algumas das combinações calculadas**

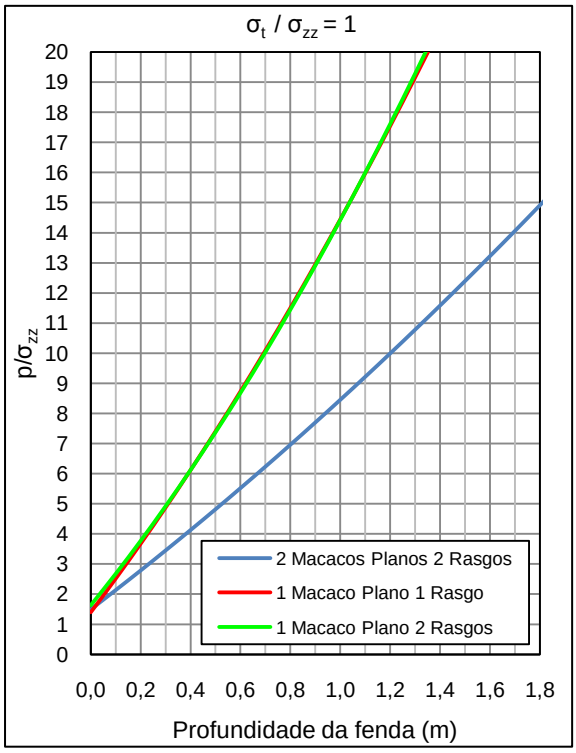



**Figura 5.8 – Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 1$ para algumas das combinações calculadas**

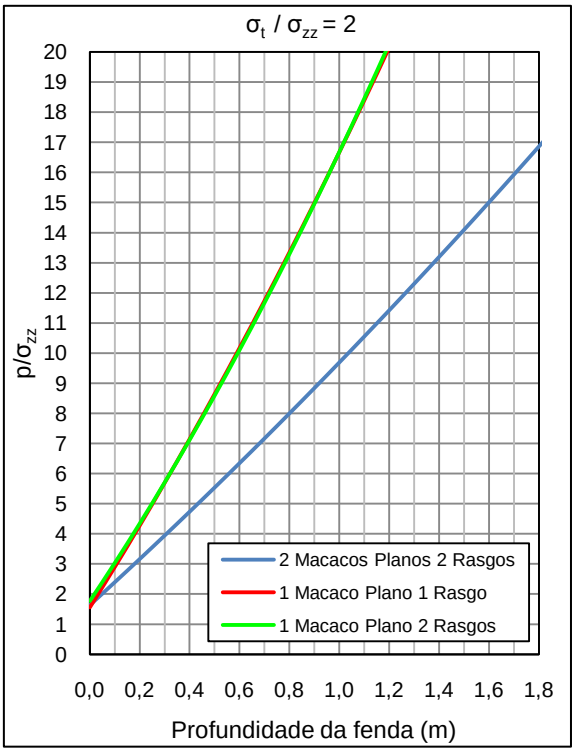



**Figura 5.9 – Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 2$ para algumas das combinações calculadas**

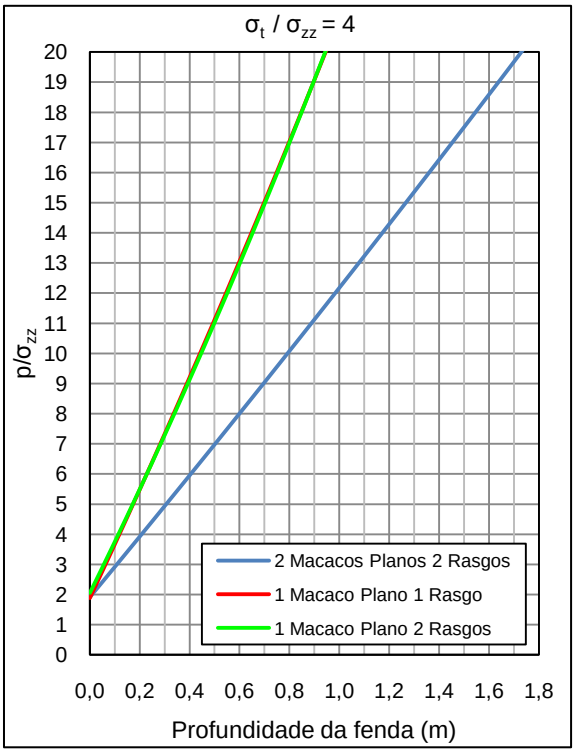



**Figura 5.10 – Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 4$ para algumas das combinações calculadas**

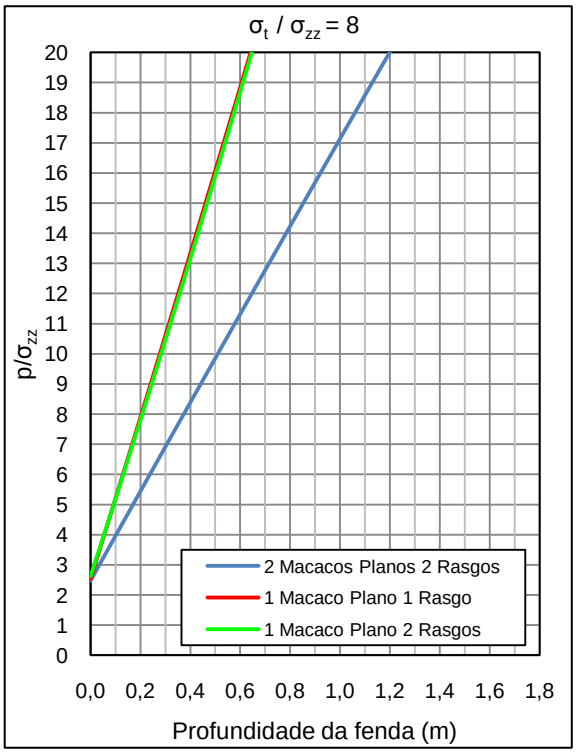



**Figura 5.11 – Diagrama da evolução da profundidade da fenda em função da relação $p/\sigma_{zz}$, considerando $\sigma_t/\sigma_{zz} = 8$ para algumas das combinações calculadas**

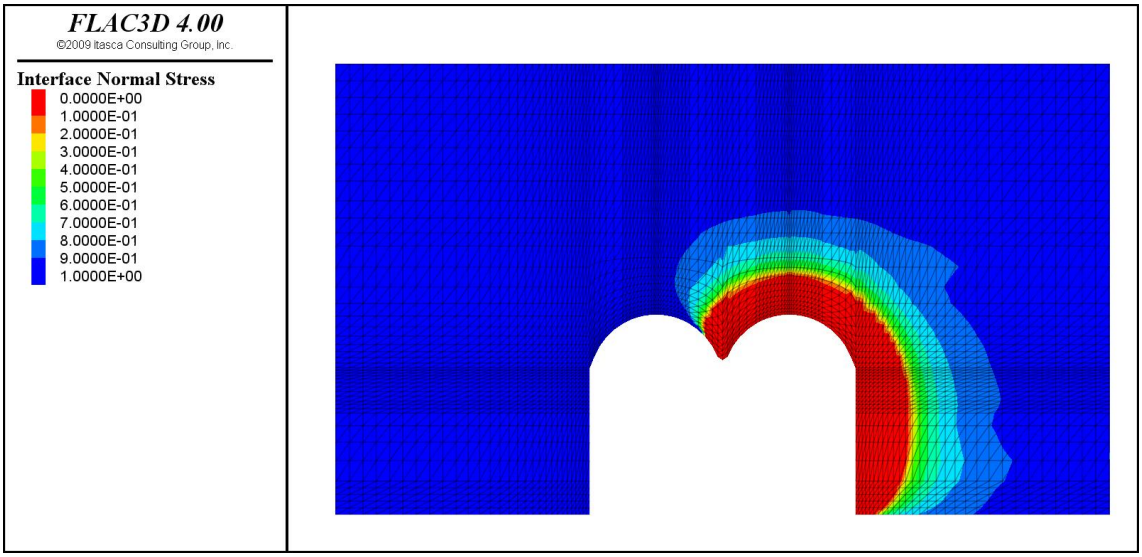



**Figura 5.12 – Tensões normais à interface para uma relação de $p/\sigma_{zz}$ = 4 e $\sigma_t/\sigma_{zz}$ = 0, para a combinação de um macaco plano e dois rasgos**

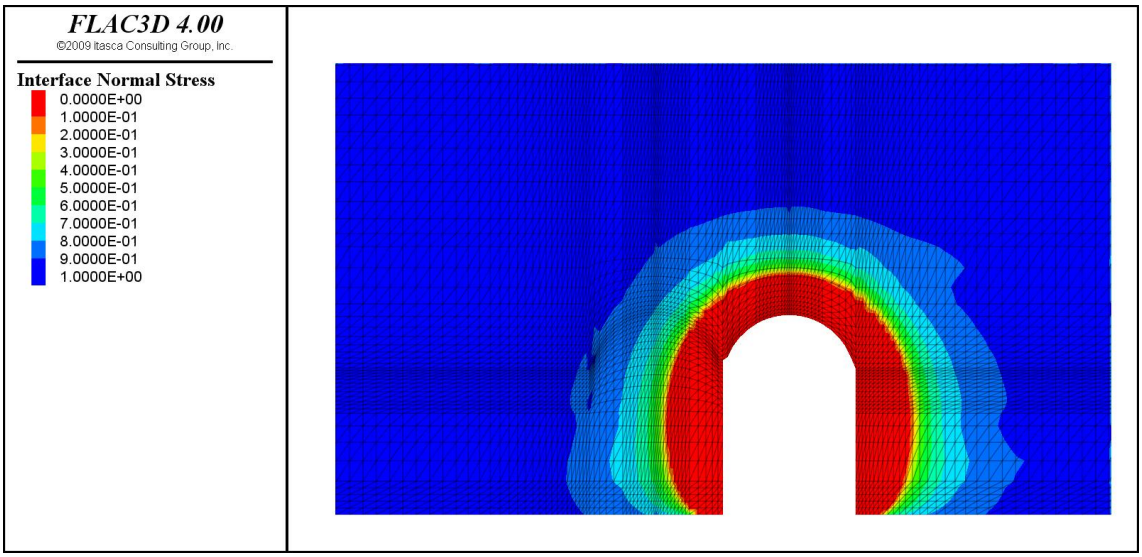



**Figura 5.13 – Tensões normais à interface para uma relação de $p/\sigma_{zz}$ = 4 e $\sigma_t/\sigma_{zz}$ = 0, para a combinação de um macaco plano e um rasgo**

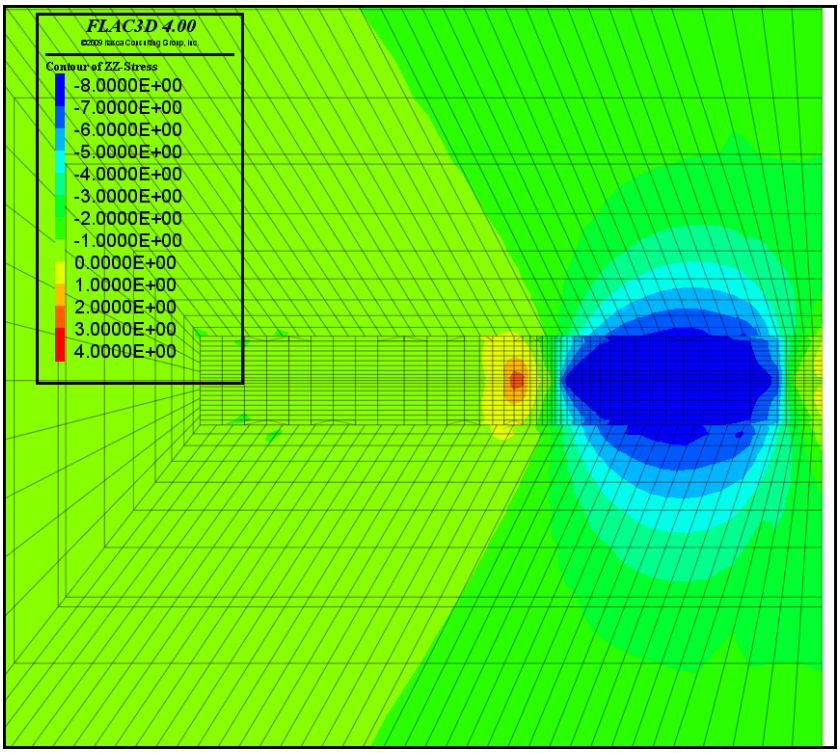



**Figura 5.14 – Tensões verticais para a combinação de um macaco plano e um rasgo**

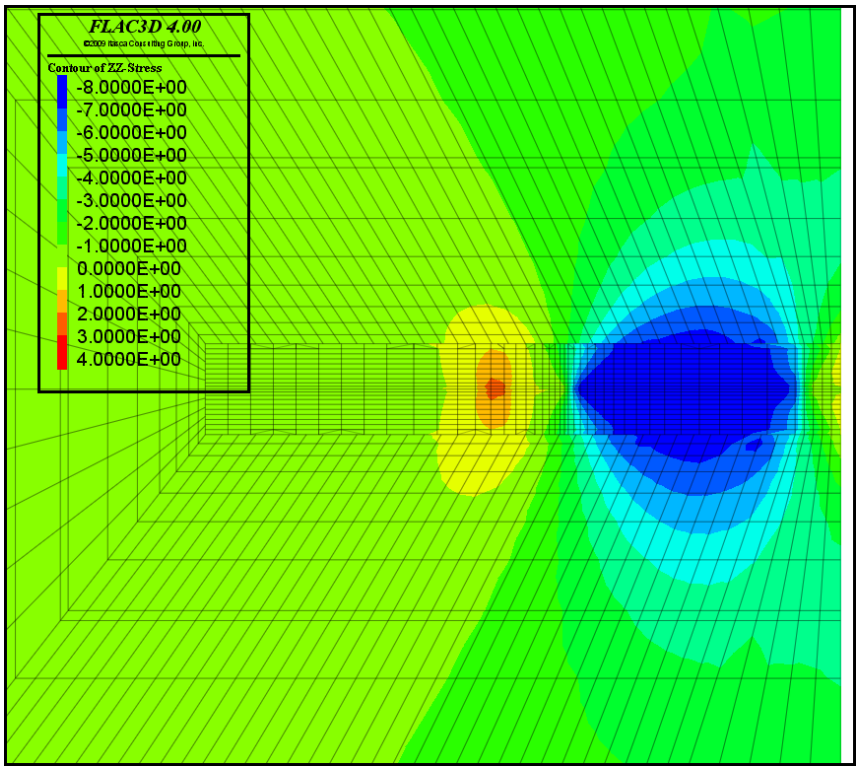



**Figura 5.15 – Tensões verticais para a combinação de dois macacos planos**

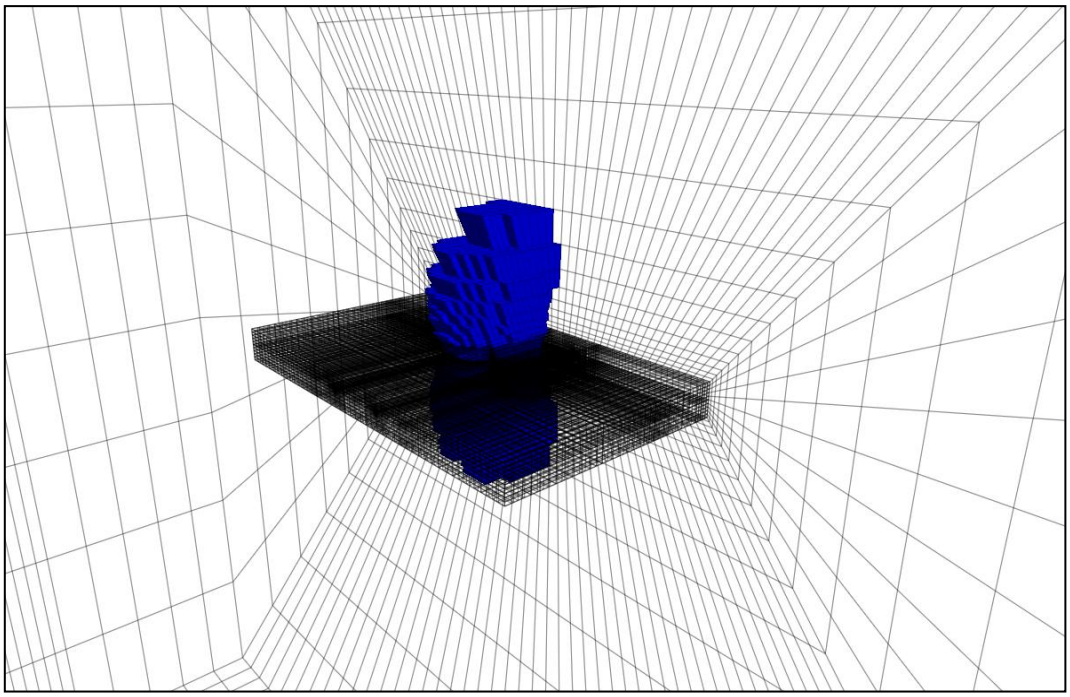


**Figura 5.16 – Perspectiva do interior da malha do modelo, com a representação do volume onde a tensão principal mínima excedeu em 20% a tensão inicial, para a combinação de um macaco plano e um rasgo**

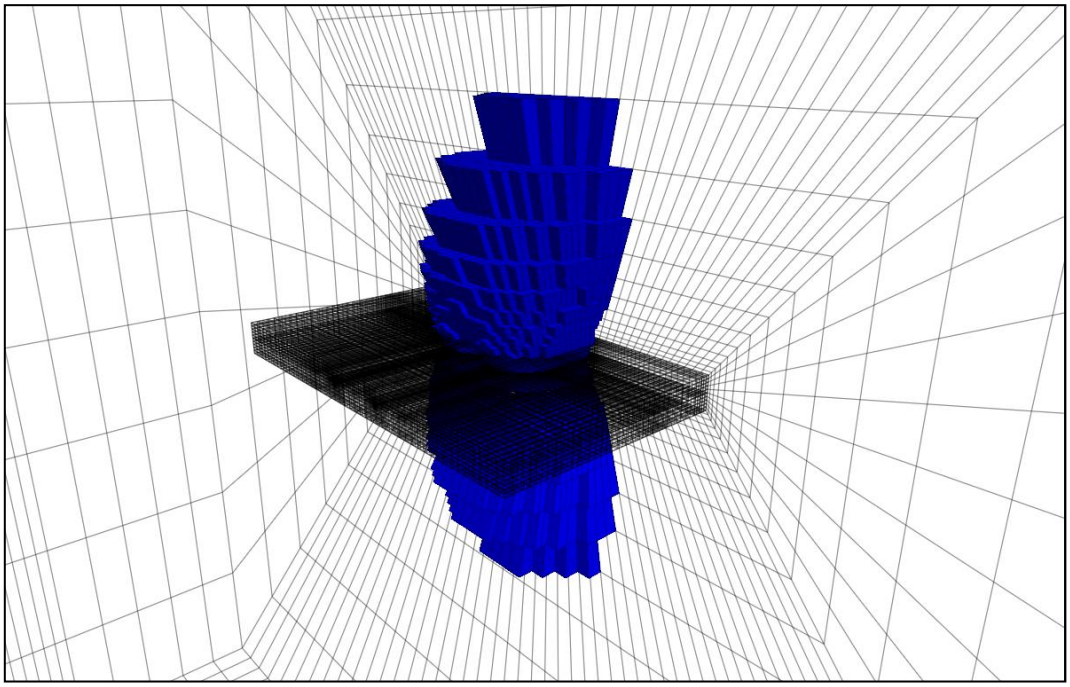


**Figura 5.17 – Perspectiva do interior da malha do modelo, com a representação do volume onde a tensão principal mínima excedeu em 20% a tensão inicial, para a combinação de dois macacos planos**

Destas figuras pode concluir-se que:

- A pressurização de um macaco plano e dois rasgos, comparativamente com a pressurização de um macaco plano e um rasgo, não implica diferenças significativas na evolução da profundidade da fenda de tracção, qualquer que seja a relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$ adoptada. Esta conclusão é suportada pela coincidência das curvas de evolução da fenda de tracção de ambas as combinações. Com efeito, a existência de uma região livre, a que corresponde o rasgo contíguo não pressurizado, não apresenta, neste modelo, influência significativa na evolução da fenda de tracção.

- A pressurização de dois macacos planos, aplicando a mesma relação $p/\sigma_{zz}$, impõe ao maciço rochoso tensões verticais mais elevadas do que os restantes casos analisados. Esta conclusão baseia-se no andamento das curvas respeitantes a esta combinação, indicadas nas Figuras 5.7 a 5.11. Esta conclusão é reforçada pelas Figuras 5.14 e 5.15, onde é possível visualizar a maior concentração de tensões que a combinação de dois macacos planos provoca quando comparada com a combinação de um macaco plano, através de uma maior concentração de tensões verticais de compressão, a azul, sobre a região dos rasgos e de uma mais distante concentração das tensões de tracção, a vermelho, sobre a região correspondente ao limite da fenda de tracção.

- A utilização de dois macacos planos ao invés de apenas um, permite solicitar maiores volumes de maciço rochoso.

### 5.2.2. Influência da inclinação dos rasgos

Uma das potencialidades do modelo tridimensional é possibilitar o estudo do ensaio LFJ quando este é efectuado em planos não perpendiculares à superfície da câmara de ensaio. A realização deste tipo de ensaios surge quando é necessário inclinar o plano dos rasgos de modo a que este se torne perpendicular às maiores tensões de compressão que virão a solicitar o maciço rochoso.

Nesta secção pretende-se analisar os resultados provenientes da pressurização de dois macacos planos inclinados a 10º e 20º, com o objectivo de compreender quais as alterações que a inclinação do plano dos rasgos acarreta para o modelo interpretativo.

Para a análise dos deslocamentos verticais, desenvolveu-se a Figura 5.18. Esta figura permite visualizar os deslocamentos verticais segundo um plano transversal coincidente com o alinhamento A, para dois macacos planos não-inclinados e inclinados a 10º e 20º, para uma relação de $p/\sigma_{zz} = 12$ e para mesma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz}$ adoptada.

A análise da Figura 5.18 permite visualizar, no caso dos rasgos inclinados a $20^0$, que o menor volume solicitado pela face inferior do macaco plano origina maiores deslocamentos do que o maior volume solicitado pela face superior. Esta figura também permite observar que os deslocamentos na face inferior aumentam com a proximidade à superfície livre da malha.

Para visualizar a direcção de todos os deslocamentos desenvolveram-se as Figuras 5.19 a 5.22, nas quais é possível observar e comparar, para a mesma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz}$ adoptada, os deslocamentos dos elementos da malha do modelo que envolvem os rasgos não-inclinados e os rasgos inclinados a 20º. As Figuras 5.19 e 5.20 correspondem aos deslocamentos medidos segundo o alinhamento A e as Figuras 5.21 e 5.22 aos deslocamentos medidos segundo o plano perpendicular ao alinhamento A e coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2.

A observação das Figuras 5.19 a 5.22 permite visualizar os diferentes deslocamentos dos elementos superiores e inferiores, assim como os deslocamentos tangenciais resultantes da inclinação do plano dos rasgos.

Para compreender as implicações resultantes da inclinação dos rasgos nas constantes dos macacos planos, referidas na secção 5.1.4., desenvolveram-se as Figuras 5.23 e 5.24. Nestas apresenta-se a variação das constantes com a profundidade da fenda, comparando, em cada local de medição e para cada profundidade de fenda, o valor da constante para a combinação em que os rasgos não possuem inclinação com o valor da constante para a combinação em que os rasgos possuem inclinação.

A observação das Figuras 5.23 e 5.24 permite dizer que a inclinação do plano dos rasgos também acarreta um aumento do valor das constantes. Este aumento é decorrente do aumento dos deslocamentos normais e amplifica-se com o aumento da profundidade da fenda, em particular nos defórmetros A1, B1, A2 e B2 que devido à sua posição registam, habitualmente, os maiores deslocamentos. Estas alterações também se verificam nos diagramas de interpretação do ensaio LFJ (Anexo A).

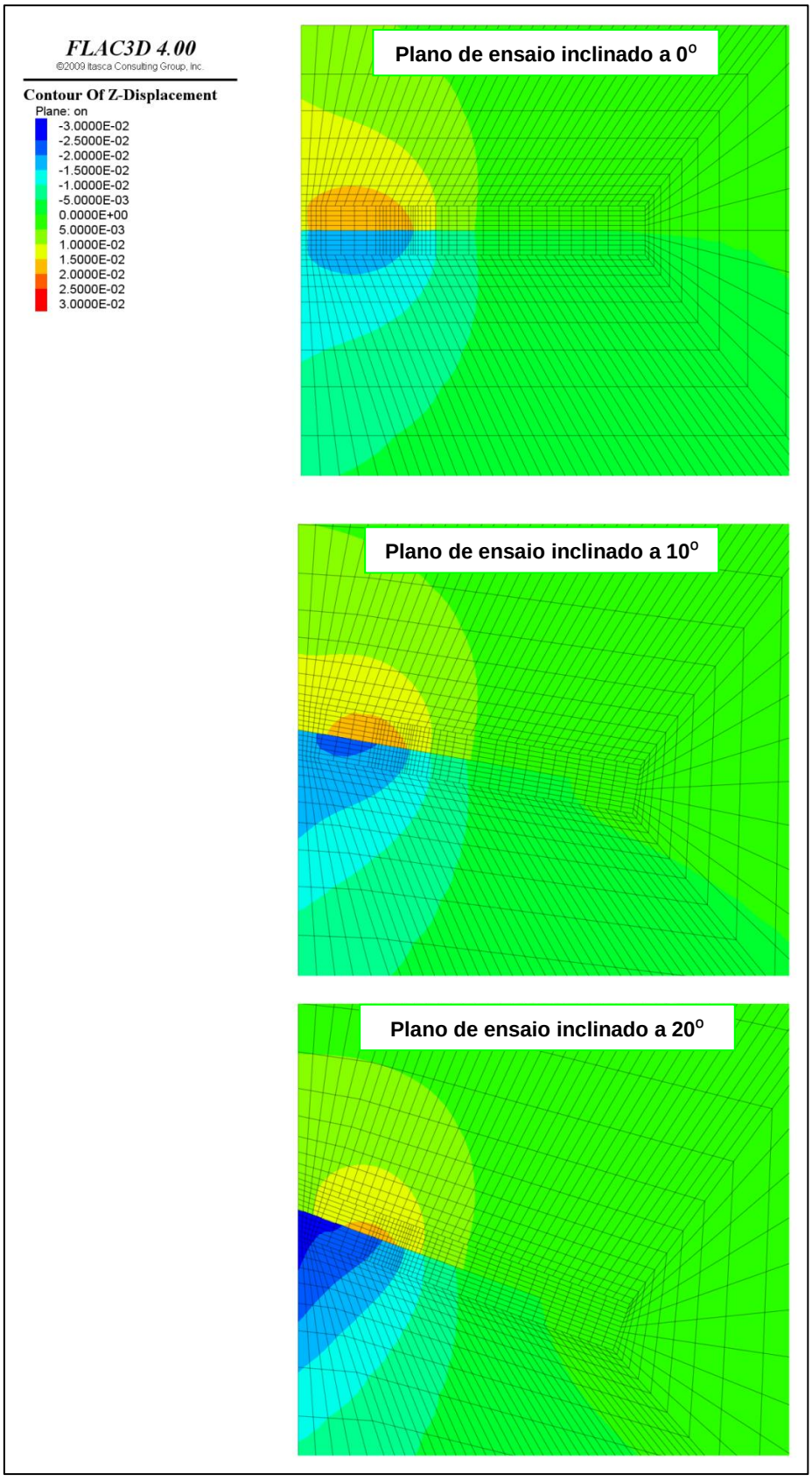



**Figura 5.18 – Deslocamentos verticais em rasgos inclinados a 0º, 10º e 20º**

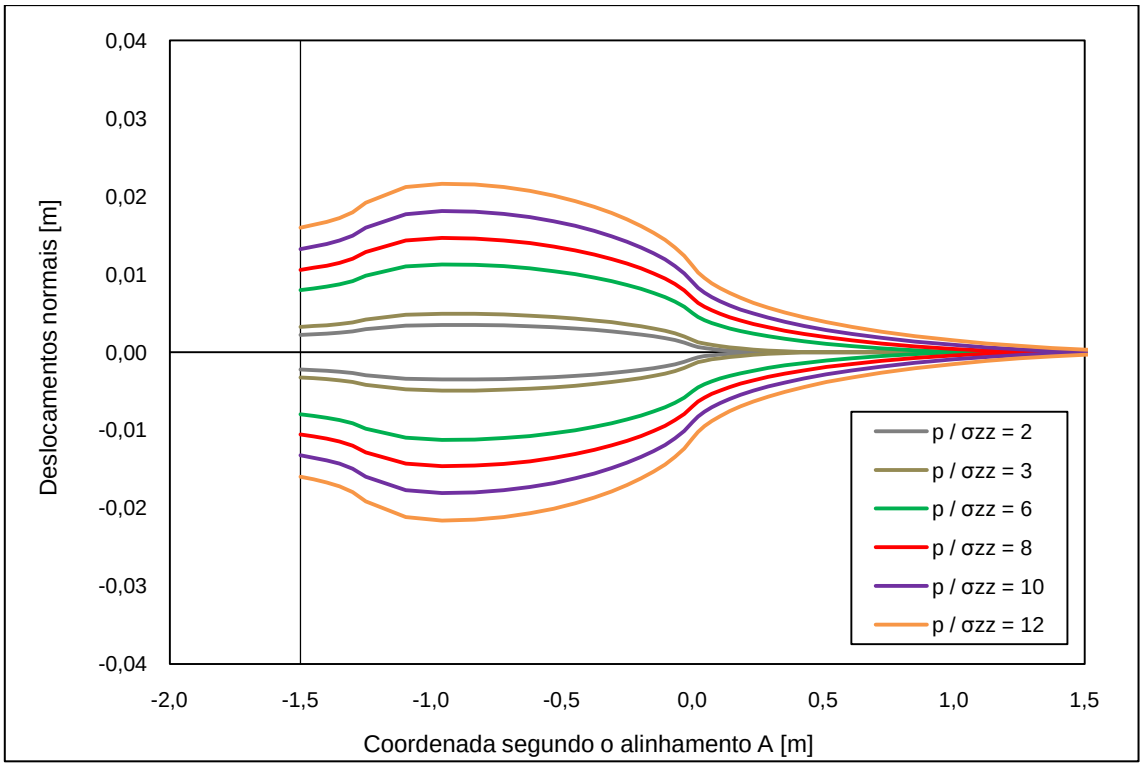



**Figura 5.19 – Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos sem inclinação e segundo o alinhamento A**

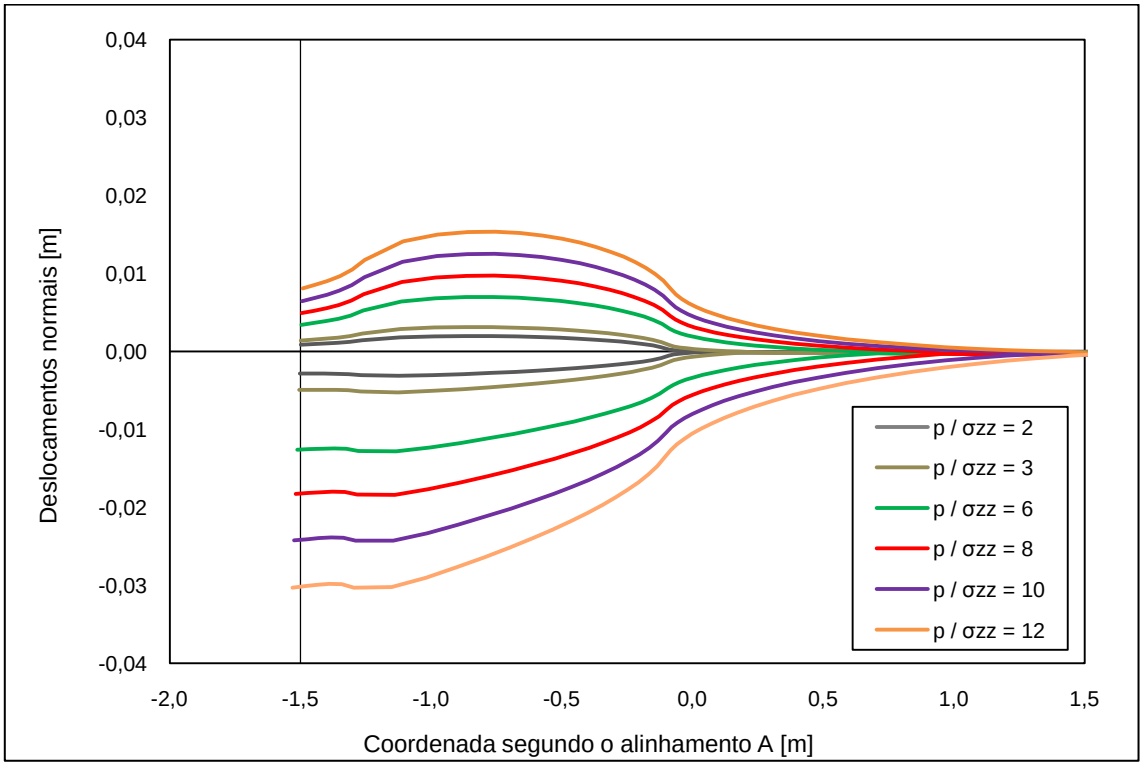



**Figura 5.20 – Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos inclinados a 20º e segundo o alinhamento A**

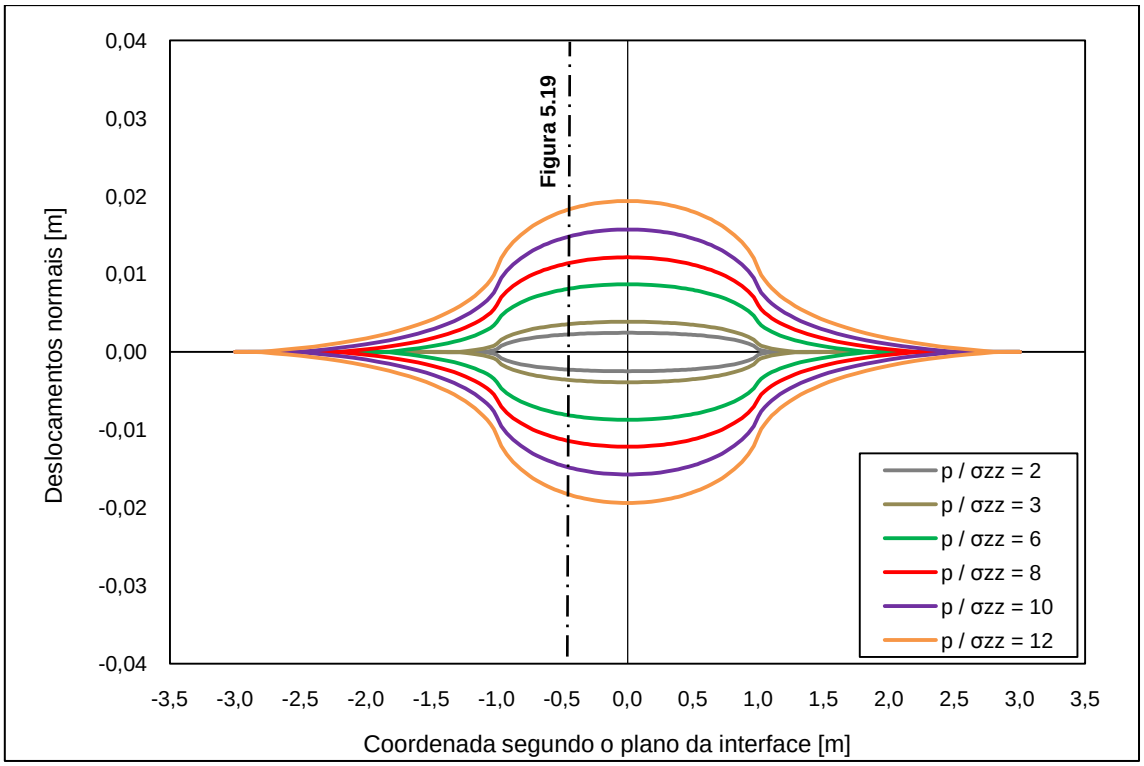



**Figura 5.21 – Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos sem inclinação, segundo um plano perpendicular ao alinhamento A e coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2**

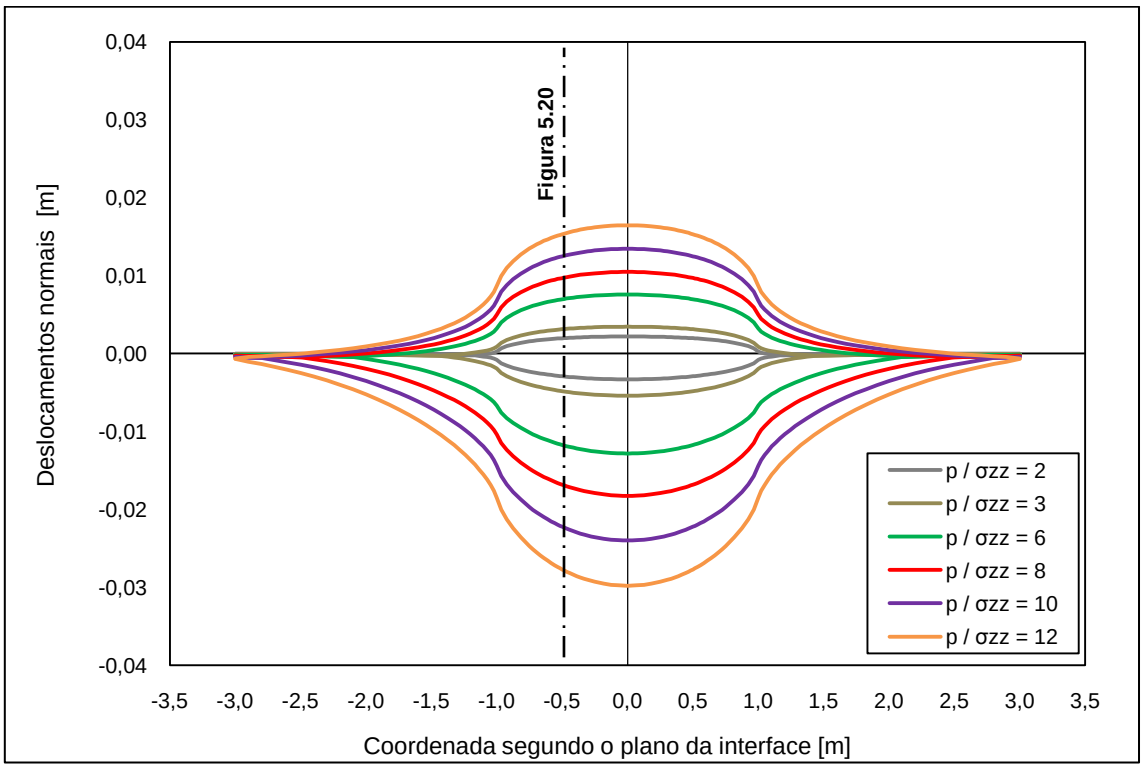



**Figura 5.22 – Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos inclinados a 20º, segundo um plano perpendicular ao alinhamento A e coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2**

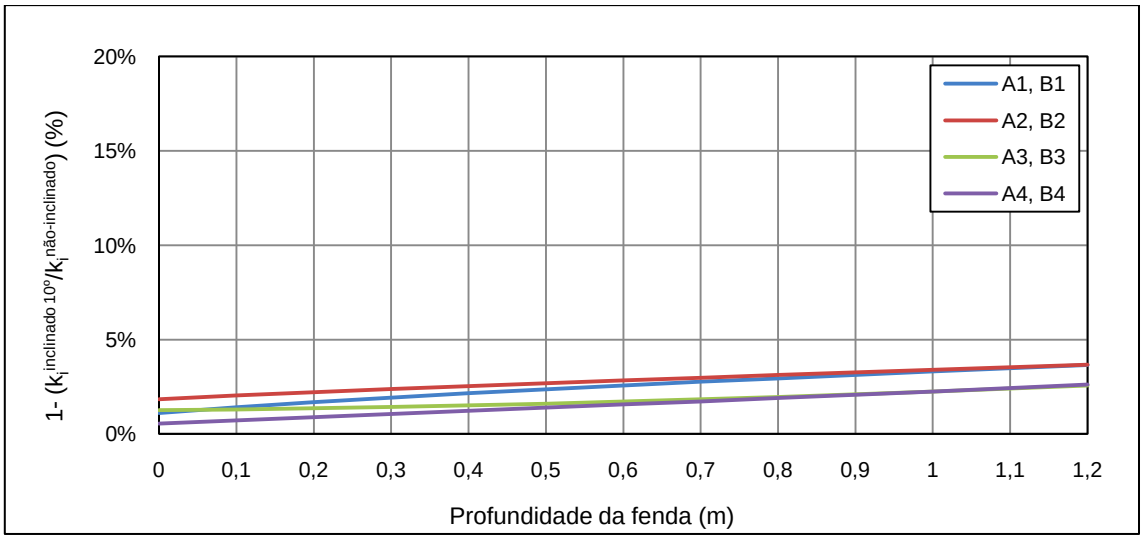



**Figura 5.23 – Variação das constantes com a inclinação do plano dos rasgos (0º *versus* 10º)**

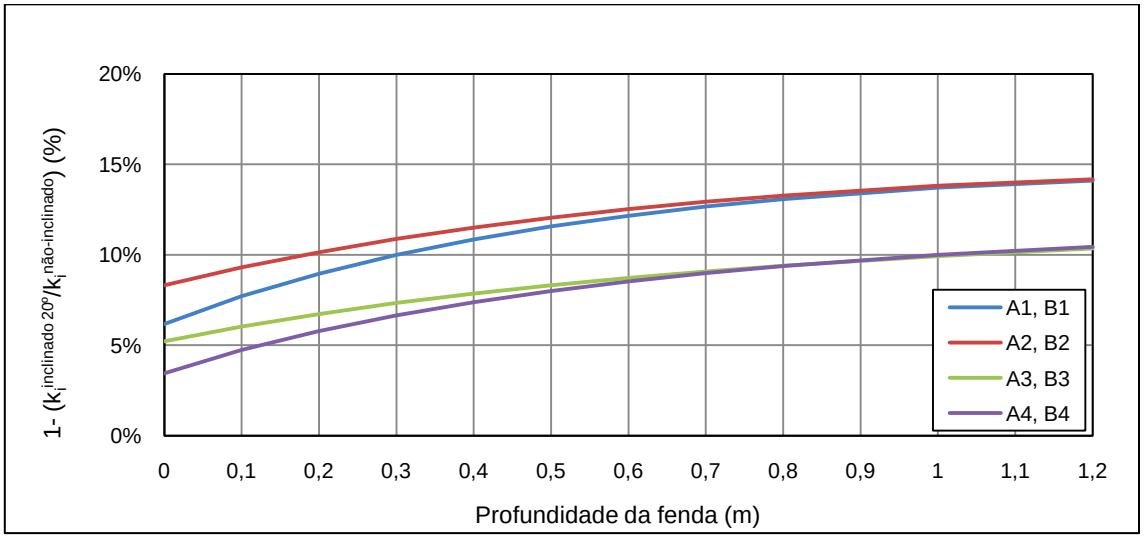



**Figura 5.24 – Variação das constantes com a inclinação do plano dos rasgos (0º *versus* 20º)**

Uma vez que a inclinação do plano de ensaio implica diferentes deslocamentos nas faces dos macacos planos que, como foi possível visualizar nas Figuras 5.23 e 5.24, originaram alterações nas constantes do macacos planos, existe a necessidade de estudar a influência da inclinação na progressão da fenda de tracção.

A análise da progressão da fenda de tracção com a variação da inclinação dos rasgos, para as diferentes relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$ consideradas, pode ser visualizada nas Figuras 5.25 a 5.29.

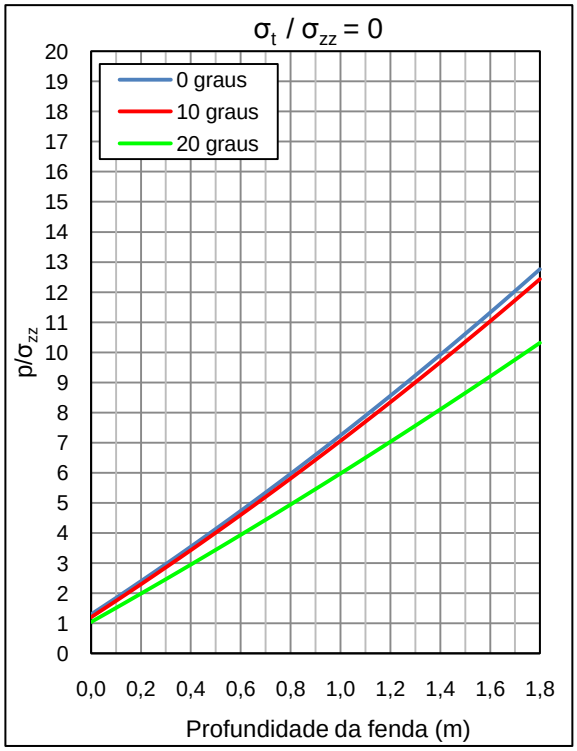



**Figura 5.25 – Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 0$**

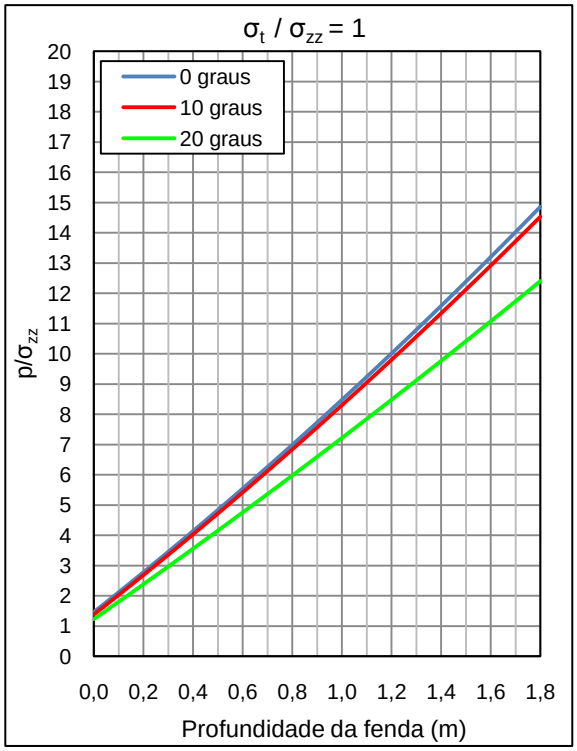



**Figura 5.26 – Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 1$**

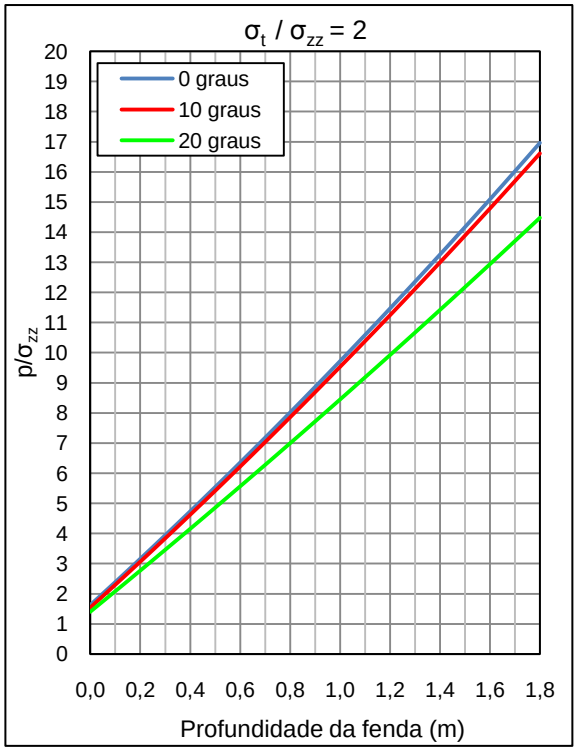



**Figura 5.27 – Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 2$**

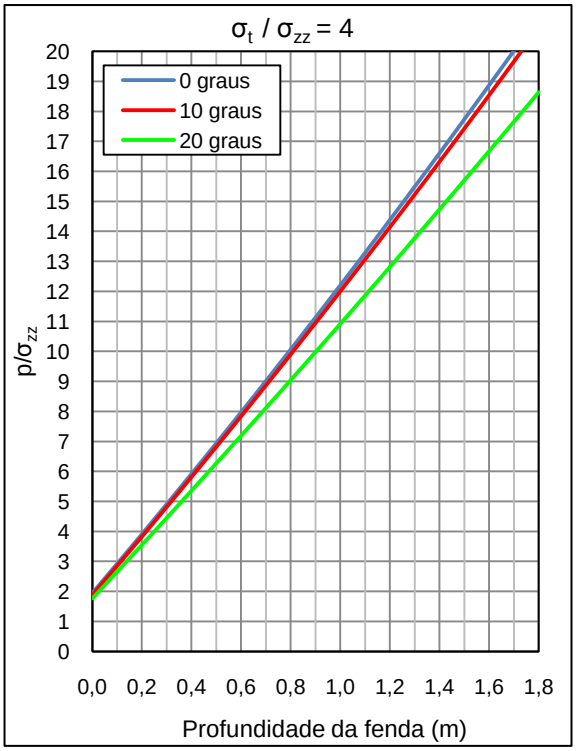



**Figura 5.28 – Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 4$**

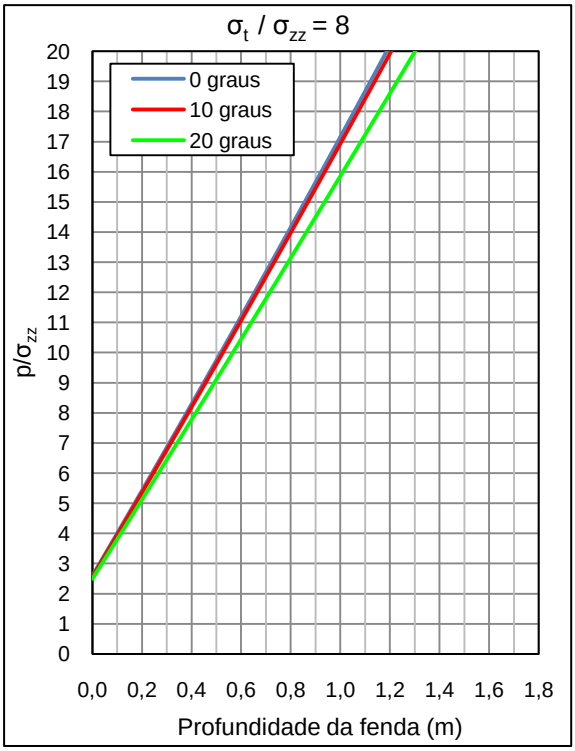



**Figura 5.29 – Evolução da fenda para diferentes inclinações do plano dos rasgos, considerando uma relação de $\sigma_t/\sigma_{zz} = 8$**

A análise das Figuras 5.25 a 5.29 permite dizer que, independentemente da relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$ adoptada, a combinação com uma inclinação de 20º apresenta um maior aumento da profundidade de fenda para o mesmo incremento da relação $p/\sigma_{zz}$ aplicada do que a combinação sem inclinação. Esta observação esbate-se ligeiramente com o incremento da relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$.

Pode concluir-se que:

- A inclinação do plano dos rasgos contribui para um aumento significativo dos deslocamentos normais ao plano dos rasgos. Este aumento é explicado pelo menor volume de maciço que reage contra a acção do carregamento dos macacos planos e pela diferente proximidade desses volumes à superfície da galeria. Os maiores deslocamentos têm implicações nos diagramas de interpretação do ensaio e nas constantes dos macacos planos, que no caso de rasgos inclinados a 20º podem resultar em constantes 14% superiores às de rasgos não-inclinados.

- Independentemente da relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$ considerada, quanto maior for a inclinação dos rasgos menor é o incremento da relação $p/\sigma_{zz}$ necessário para aumentar a profundidade da fenda. A existência de um menor volume de reacção de um dos lados do macaco plano aumenta a tensão nos limites na fenda, o que conduz à

necessidade de menores incrementos de $p/\sigma_{zz}$ para se atingir a mesma profundidade de fenda. Este efeito atenua-se com o aumento da relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$. Tal deve-se a ser possível mobilizar maiores tensões no limite da fenda, esbatendo-se o efeito que a inclinação do plano dos rasgos provoca no aumento da profundidade da fenda para igual incremento de $p/\sigma_{zz}$.

## 5.3. Análise da influência das condições de fronteira

### 5.3.1. Situações consideradas

Como referido nas conclusões da secção anterior, a maior proximidade à superfície livre do volume de maciço rochoso solicitado pela face inferior dos macacos planos resulta em maiores deslocamentos verticais. Uma vez que o ensaio LFJ é frequentemente realizado em galerias de observação, onde o pé direito geralmente não excede 3 m de altura, importa perceber quais as implicações de considerar, no modelo tridimensional, a superfície frontal da malha livre (permite todos os deslocamentos) ou parcialmente restringida (apenas permite os deslocamentos numa faixa de 3 m de altura), onde a restrição representa o confinamento do maciço envolvente à galeria de observação. A Figura 5.30 mostra as condições de apoio no caso em que apenas se considerou livre uma faixa de 3 m de largura, com 1 m abaixo e 2 m acima do plano médio dos rasgos.

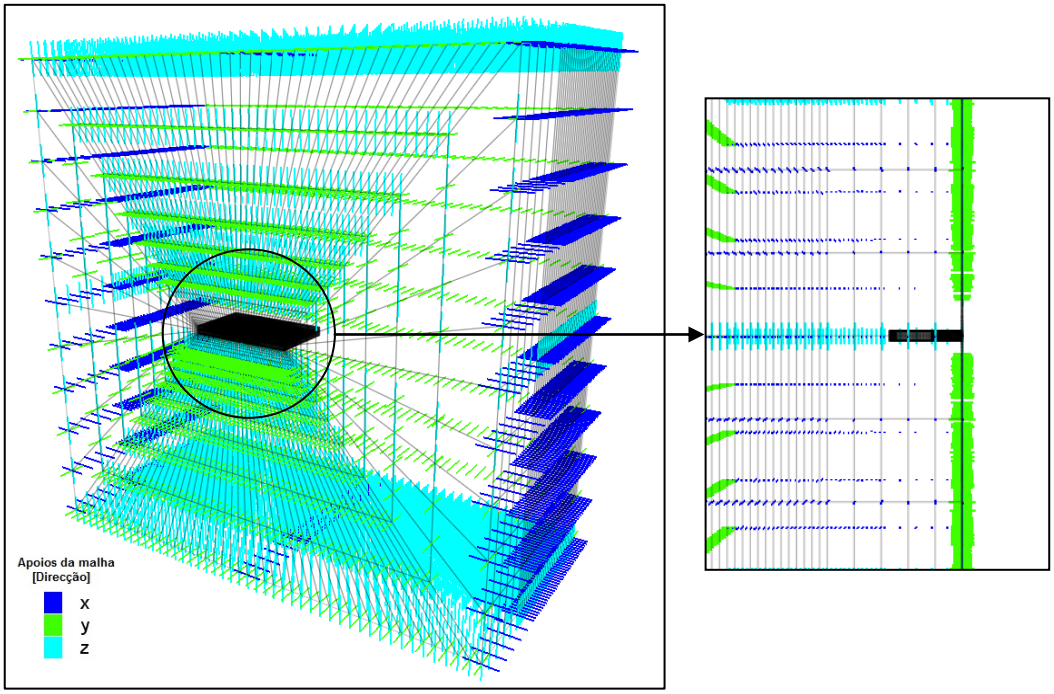



**Figura 5.30 – Condições de apoio na superfície frontal do modelo, considerando apenas uma faixa de 3 m livres**

Para realizar o estudo das implicações que a alteração das condições de fronteira na superfície frontal acarreta, foram realizados cálculos para a combinação de dois macacos planos com rasgos inclinados a 0º, 10º e 20º, admitindo como parâmetros um módulo de elasticidade de 1 GPa, um coeficiente de Poisson de 0,2, uma tensão inicial vertical de 1 MPa e uma resistência à tracção entre 0 e 8 MPa.

### 5.3.2. Influência nos deslocamentos verticais

O estudo da influência da introdução da restrição dos deslocamentos segundo a superfície da malha foi realizado para rasgos não-inclinados e inclinados. Esta distinção permite compreender, separadamente, a influência da introdução da referida restrição de deslocamentos.

A restrição dos deslocamentos normais e verticais em parte da superfície da malha, provoca alterações visíveis nos deslocamentos calculados pelo modelo em rasgos não-inclinados. A Figura 5.31 mostra os deslocamentos verticais para a combinação de dois macacos não-inclinados sem restrição dos deslocamentos, segundo um plano transversal coincidente com o alinhamento A. A Figura 5.32 mostra, no mesmo plano, os deslocamentos verticais para a mesma combinação de macacos planos com restrição dos deslocamentos. Em ambas as figuras a relação $\sigma_t/\sigma_{zz}$ adoptada para os cálculos é igual.

A observação das Figuras 5.31 e 5.32, permite dizer que a introdução da restrição dos deslocamentos normais e verticais na superfície da malha provoca uma diminuição dos deslocamentos segundo o alinhamento A. Estas figuras permitem, igualmente, perceber que a adopção de uma faixa mais estreita abaixo do plano dos rasgos (1 m abaixo e 2 m acima), se traduz numa maior redução dos deslocamentos abaixo do plano dos rasgos.

Para estudar os deslocamentos dos elementos da malha segundo o alinhamento A e segundo o plano perpendicular ao alinhamento A coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2, desenvolveram-se as Figuras 5.33 e 5.34. Estas figuras mostram, para a mesma situação que a Figura 5.32, os deslocamentos dos elementos da malha em contacto com o plano dos rasgos. Os deslocamentos da situação representada na Figura 5.31 podem ser vistos nas Figuras 5.19 e 5.21.

A análise das Figuras 5.33 e 5.34 reforça a conclusão extraída das Figuras 5.31 e 5.32, ao mostrar uma diminuição dos deslocamentos com a introdução da restrição dos deslocamentos.

Para estudar as implicações nas constantes dos macacos planos, decorrentes da restrição dos deslocamentos na combinação de dois macacos, desenvolveu-se a Figura 5.35, onde se ilustra a variação das constantes em função da profundidade da fenda.

Através da Figura 5.35 é possível concluir que a introdução da restrição de deslocamentos, em rasgos não-inclinados, resulta numa diminuição do valor das constantes de até 20%. O local onde esta variação é mais acentuada corresponde à posição dos defórmetros A1, B1, A2 e B2.

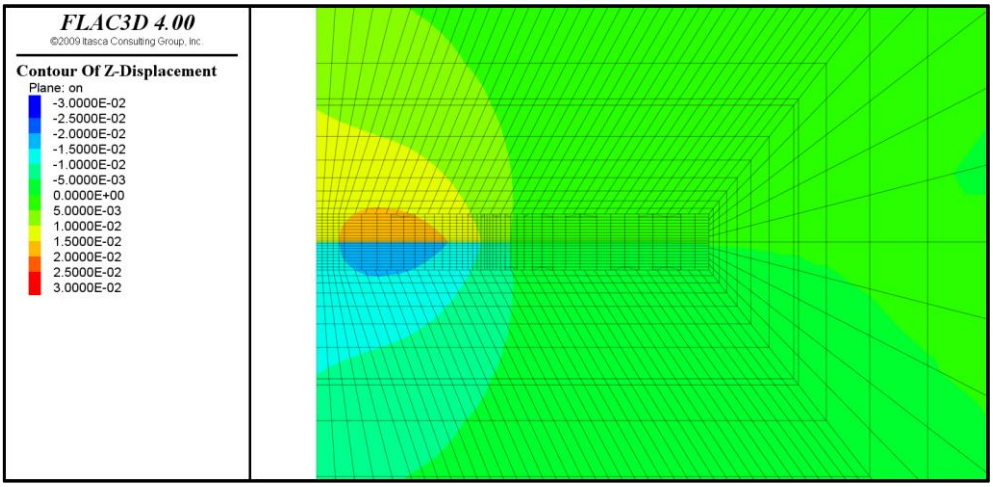



**Figura 5.31 – Deslocamentos verticais no modelo sem inclinação dos rasgos e sem restrição de deslocamentos normais e verticais no plano frontal**

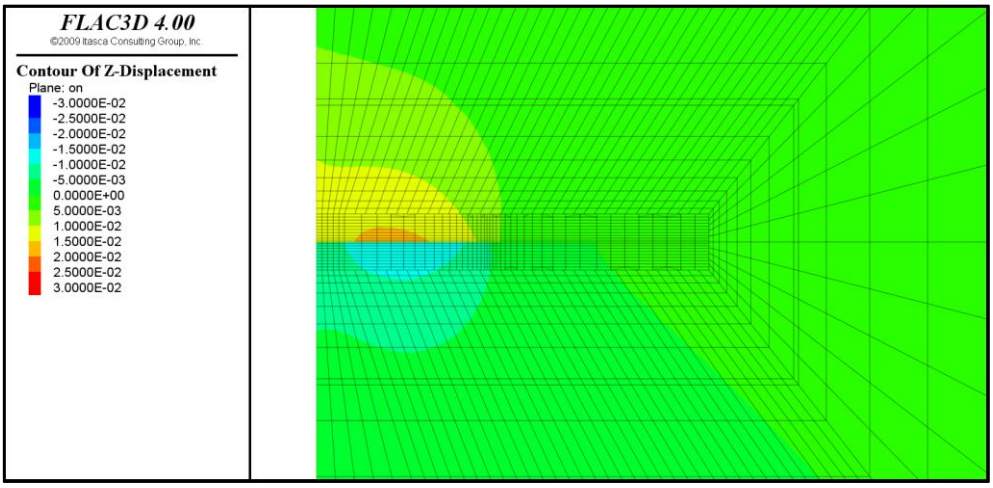



**Figura 5.32 – Deslocamentos verticais no modelo sem inclinação dos rasgos e com restrição de deslocamentos normais e verticais no plano frontal**

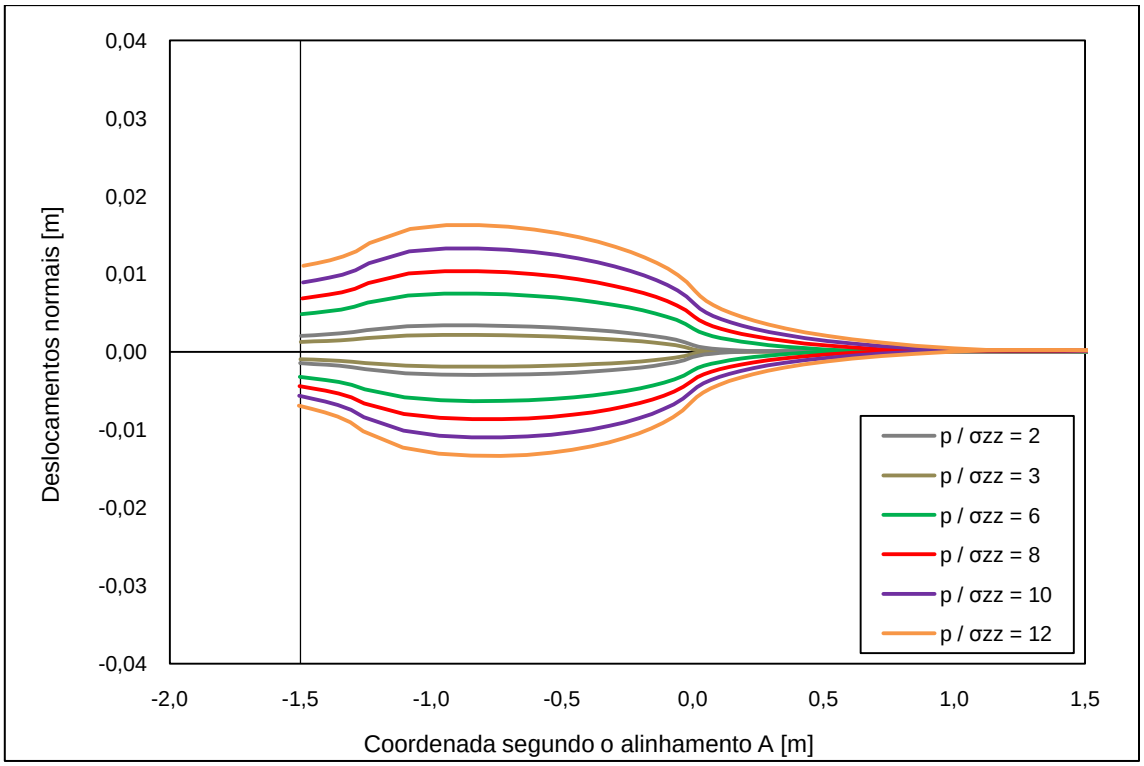



**Figura 5.33 – Deslocamentos segundo o alinhamento A dos elementos da superfície da malha para a combinação de dois macacos planos sem inclinação com restrição dos deslocamentos na superfície da malha**

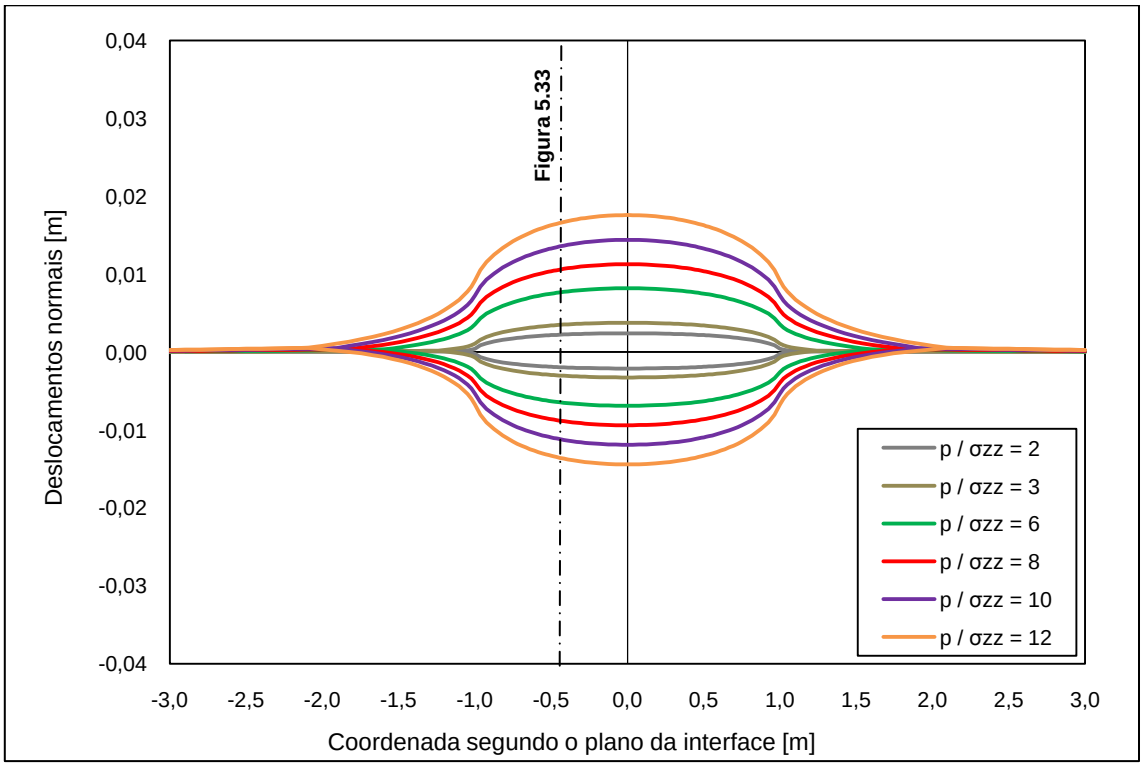



**Figura 5.34 – Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos sem inclinação e com restrição dos deslocamentos na superfície da malha, segundo um plano perpendicular ao alinhamento A coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2**

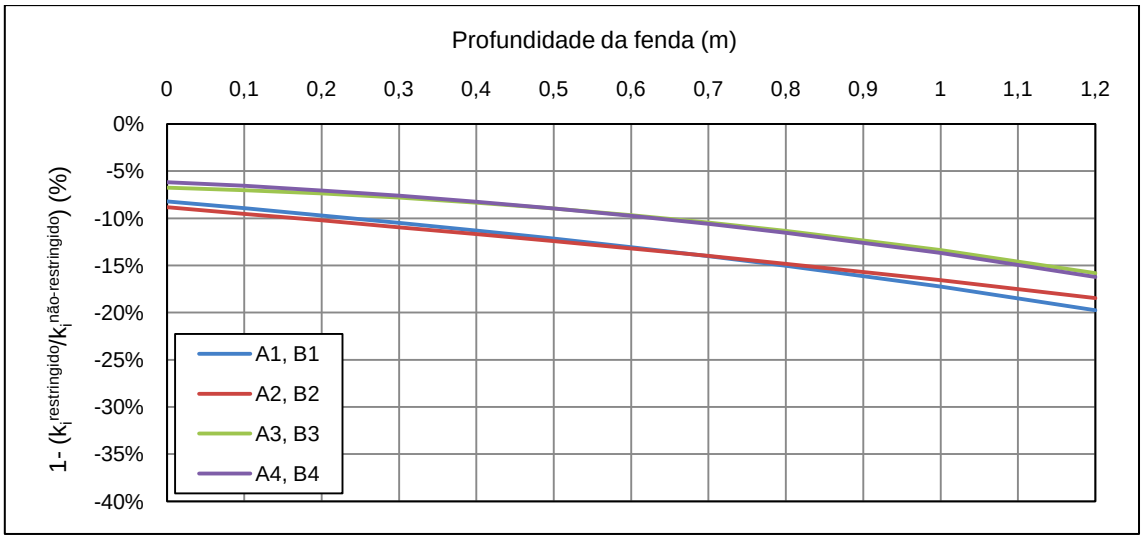



**Figura 5.35 – Variação das constantes com a aplicação da restrição de deslocamentos no plano frontal em rasgos não-inclinados**

A restrição de deslocamentos em rasgos inclinados provoca alterações mais significativas nos deslocamentos, comparativamente com rasgos não-inclinados. A Figura 5.36 mostra os deslocamentos verticais para a combinação de dois macacos inclinados a $20^0$ sem restrição dos deslocamentos em parte da superfície da malha, segundo um plano transversal coincidente com o alinhamento A. A Figura 5.37 mostra os deslocamentos verticais para a combinação de dois macacos inclinados a $20^0$ com restrição dos deslocamentos, segundo um plano transversal coincidente com o alinhamento A.

As Figuras 5.38 e 5.39 mostram, para a mesma situação que a Figura 5.37, os deslocamentos dos elementos da malha em contacto com o plano dos rasgos. A Figura 5.38 mostra os deslocamentos verticais, segundo um plano coincidente com o alinhamento A, para várias relações $p/\sigma_{zz}$. A Figura 5.39 mostra os deslocamentos verticais, segundo um plano perpendicular ao alinhamento A e coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2, para várias relações $p/\sigma_{zz}$. Os deslocamentos da situação representada na Figura 5.36 podem ser vistos nas Figuras 5.20 e 5.22.

A observação do conjunto de Figuras de 5.36 a 5.39, permite dizer que os deslocamentos verticais em rasgos inclinados sofrem uma elevada diminuição com a introdução da restrição dos deslocamentos sobre a superfície da malha.

Nas Figuras 5.40 e 5.41 apresenta-se a variação das constantes para cada profundidade com a introdução da restrição nos deslocamentos normais e verticais em rasgos inclinados, respectivamente a $10^0$ e $20^0$. Quanto a estas, também se verifica uma diminuição do valor das constantes com a introdução da restrição dos deslocamentos.

Verifica-se, também, que o aumento da inclinação do plano dos rasgos amplifica ainda mais o efeito de diminuição das constantes decorrente da introdução da restrição.

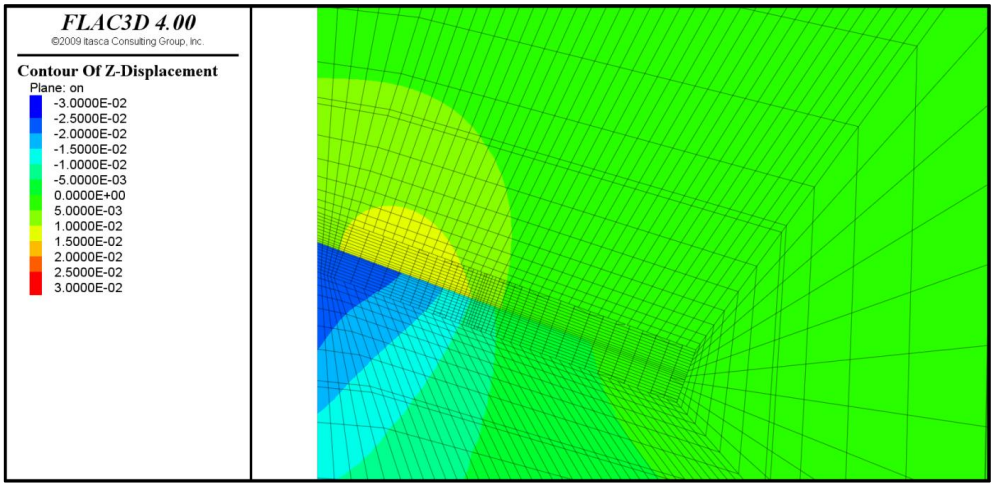



**Figura 5.36 – Deslocamentos verticais no modelo com inclinação dos rasgos e sem restrição de deslocamentos normais e verticais no plano frontal**

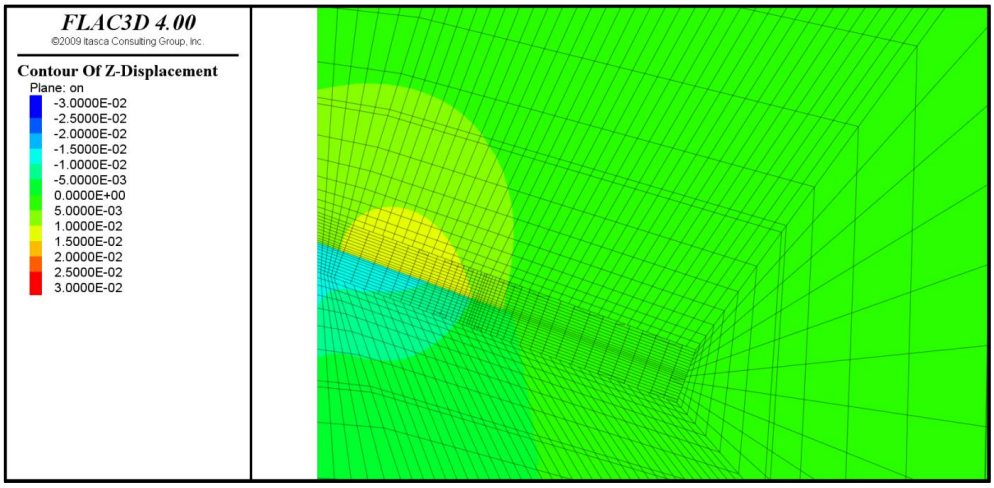



**Figura 5.37 – Deslocamentos verticais no modelo com inclinação dos rasgos, com restrição de deslocamentos normais e verticais no plano frontal**

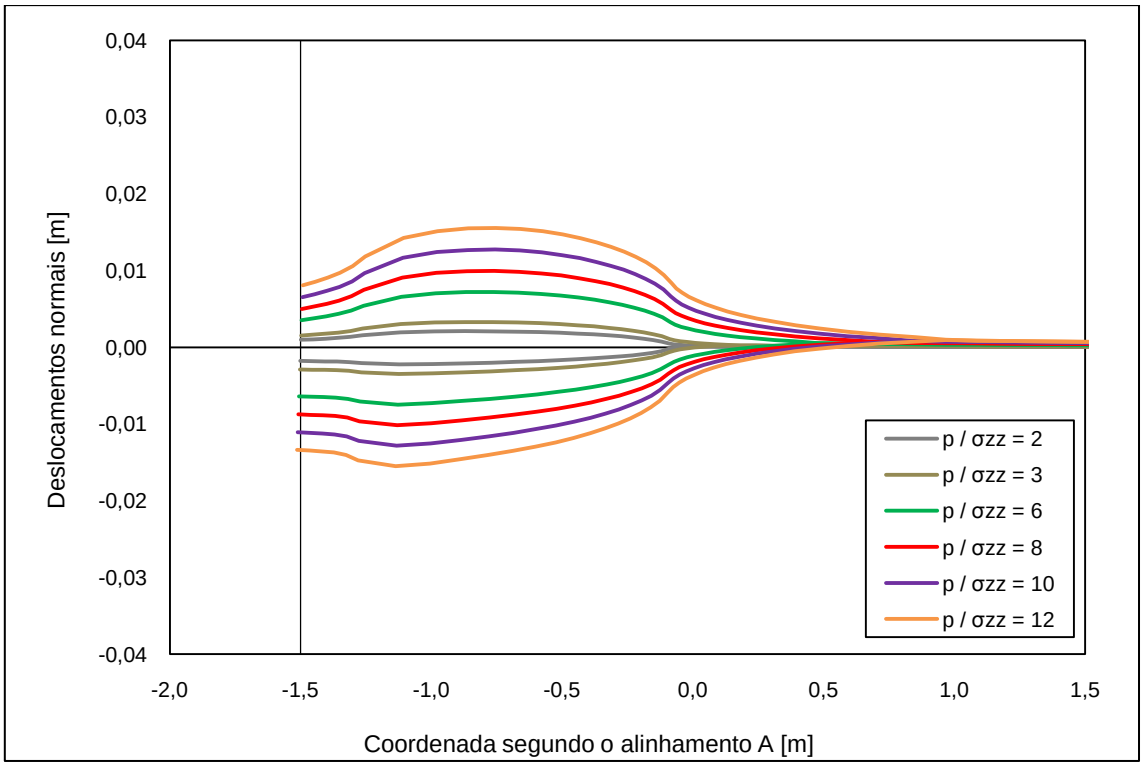



**Figura 5.38 – Deslocamentos segundo o alinhamento A dos elementos da superfície da malha para a combinação de dois macacos planos, com inclinação de 20º e com restrição dos deslocamentos na superfície da malha**

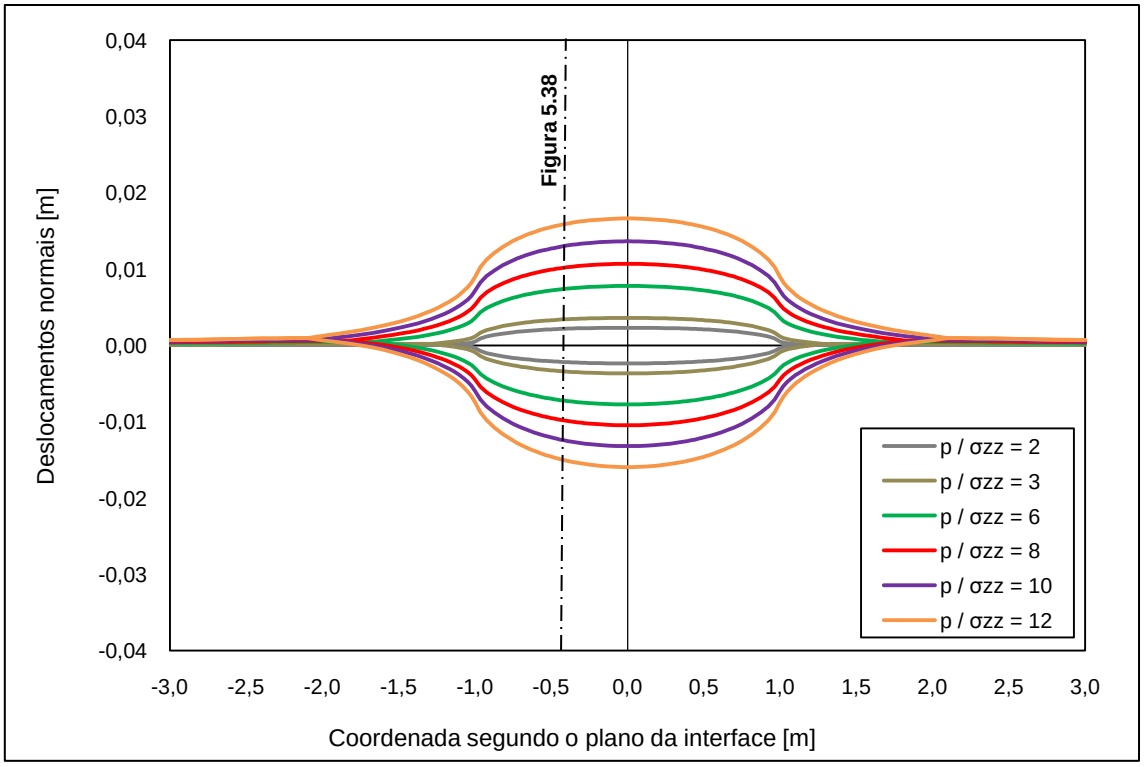



**Figura 5.39 – Deslocamentos dos elementos da superfície da malha sobre os rasgos com inclinação de 20º e com restrição dos deslocamentos na superfície da malha, segundo um plano perpendicular ao alinhamento A coincidente com os defórmetros A1, B1, A2 e B2**

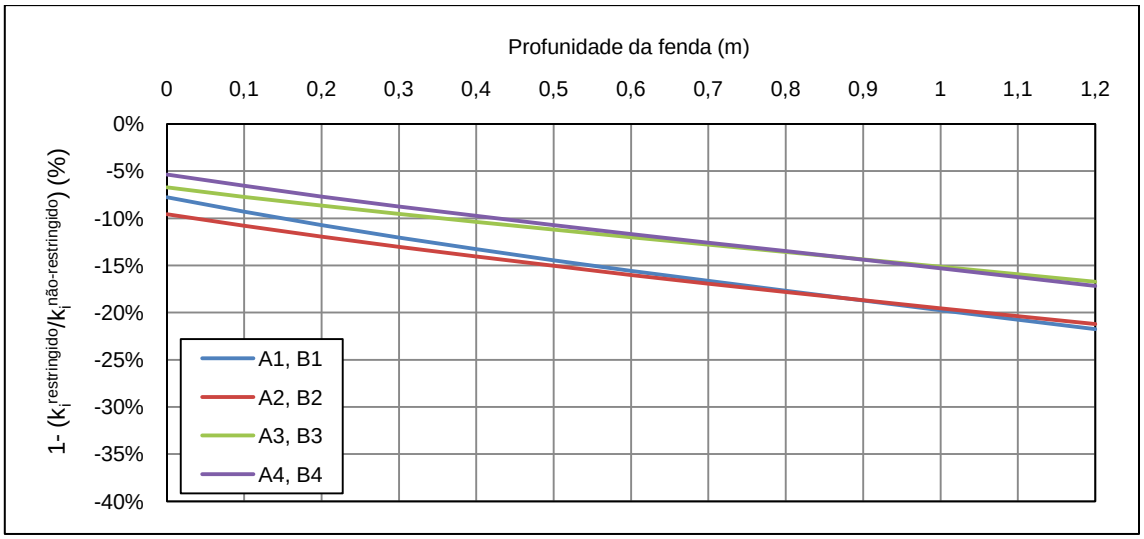



**Figura 5.40 – Variação das constantes com a aplicação da restrição de deslocamentos no plano frontal para o caso de rasgos inclinados a 10º**

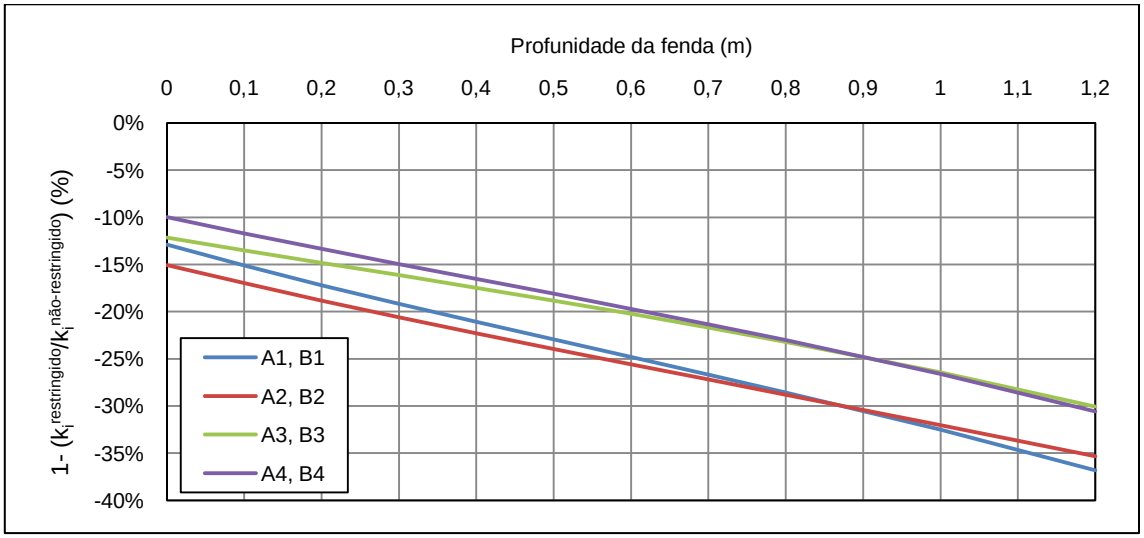



**Figura 5.41 – Variação das constantes com a aplicação da restrição de deslocamentos no plano frontal para o caso de rasgos inclinados a 20º**

Deste conjunto de resultados, conclui-se que a introdução da restrição de deslocamentos sobre a superfície da malha provoca diminuição dos deslocamentos normais aos rasgos, tanto em rasgos não-inclinados como em rasgos inclinados. Esta diminuição traduz-se nas constantes dos macacos planos calculadas para ambas as situações. Tendo sido verificada uma diminuição substancial do valor das constantes com a introdução da restrição, nomeadamente de 20% em rasgos não-inclinados, de 24% em rasgos inclinados a 10º e de 37% em rasgos inclinados a 20º. Em ambas as combinações a maior diminuição registou-se nos locais dos defórmetros A1 e B1.

### 5.3.3. Influência na profundidade da fenda

Como foi possível observar na secção anterior, a introdução da restrição dos deslocamentos normais e verticais na superfície da malha originou uma forte diminuição dos deslocamentos. Para analisar as implicações da introdução desta restrição na progressão da fenda de tracção, ilustram-se nas Figuras 5.42 e 5.43 as curvas representativas da evolução da profundidade da fenda de tracção com a evolução da relação $p/\sigma_{zz}$ e para $\sigma_t/\sigma_{zz} = 1$, calculadas em modelos sem e com a restrição dos deslocamentos.

A Figura 5.42 permite comparar duas curvas em que se representa a evolução da profundidade da fenda de tracção, com e sem a introdução da restrição dos deslocamentos.

A observação da Figura 5.42 permite afirmar que se for introduzida a restrição dos deslocamentos em rasgos sem inclinação, a progressão da profundidade da fenda requer um maior aumento da relação $p/\sigma_{zz}$ do que se não for introduzida a restrição.

Para compreender as implicações para o caso de rasgos inclinados desenvolveu-se a Figura 5.43, onde, para o caso de rasgos inclinados a $20^0$, se podem observar as curvas representativas da evolução da profundidade da fenda de tracção, com e sem a introdução da restrição dos deslocamentos.

A análise da Figura 5.43 permite afirmar que a introdução da restrição dos deslocamentos em rasgos inclinados também requer um aumento da relação $p/\sigma_{zz}$ para igual progressão da profundidade da fenda.

Ao introduzir no mesmo gráfico a informação relativa às Figuras 5.42 e 5.43, e ao adicionar os dados relativos ao caso de rasgos inclinados a 10º, desenvolveu-se a Figura 5.44, a qual permite estudar a influência na progressão da fenda de tracção da introdução da restrição de deslocamentos em função da inclinação do plano dos rasgos.

A observação da Figura 5.44 permite afirmar que a introdução da restrição dos deslocamentos anula o efeito da inclinação dos rasgos na progressão da fenda de tracção, concluído na secção 5.2.2.. Ou seja, para efeitos de análise da progressão da fenda de tracção, a introdução da restrição de deslocamentos torna indiferente considerar rasgos inclinados ou não-inclinados. Este facto está patente na coincidência entre as curvas respeitantes a rasgos inclinados e a rasgos não-inclinados em modelos restringidos.

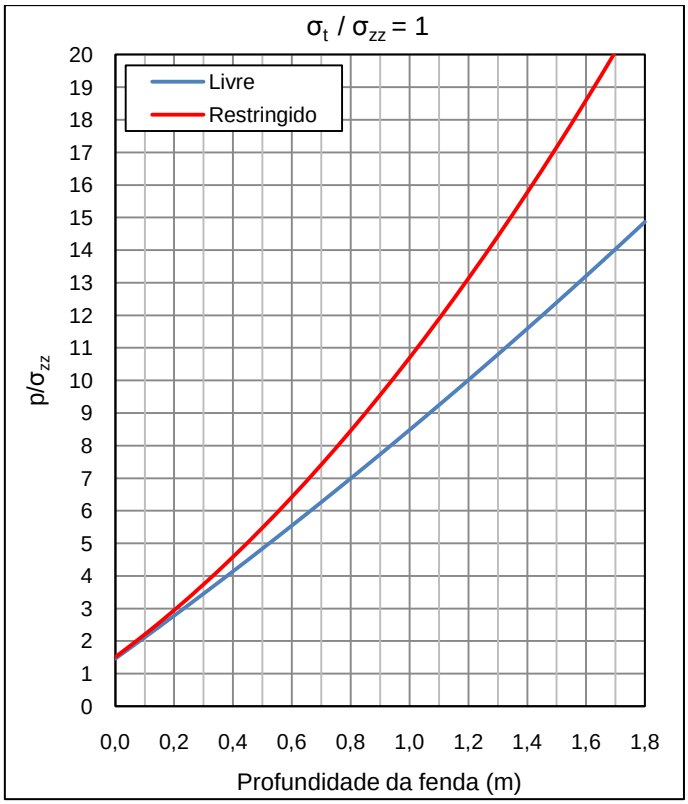



**Figura 5.42 – Progressão da fenda de tracção para a combinação de dois macacos não-inclinados com e sem restrição dos deslocamentos**

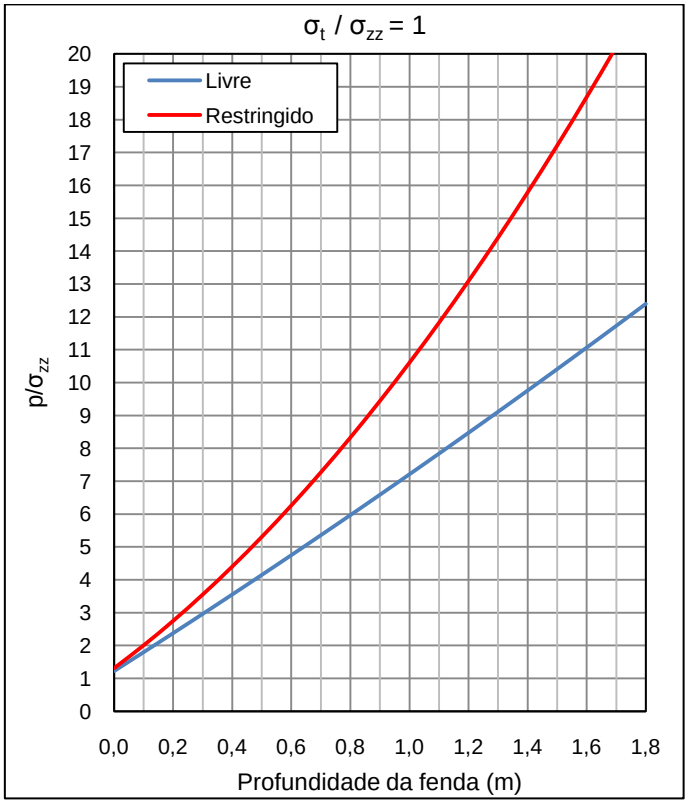



**Figura 5.43 – Progressão da fenda de tracção para a combinação de dois macacos planos com inclinação de 20º, com e sem restrição dos deslocamentos**

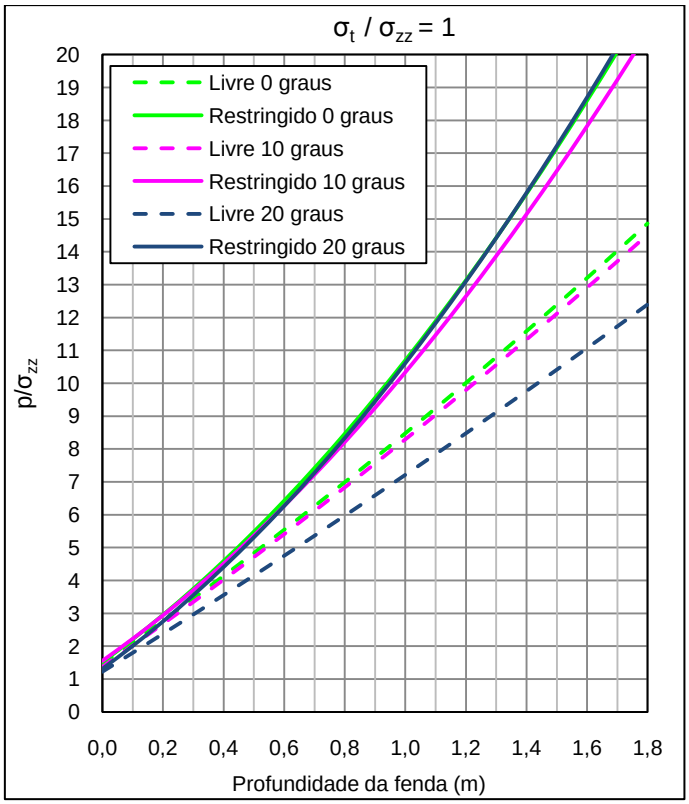



**Figura 5.44 – Progressão da fenda de tracção em modelos com e sem restrição dos deslocamentos**

A análise das três figuras desta secção permite concluir que:

- A introdução da restrição de deslocamentos em rasgos não-inclinados e em rasgos inclinados, resulta num aumento da relação de $p/\sigma_{zz}$ necessária para atingir a mesma profundidade de fenda em modelos não-restringidos.
- A introdução da restrição de deslocamentos anula o efeito da inclinação do plano dos rasgos, concluído na secção 5.2.2., enquanto factor amplificador do aumento da profundidade da fenda de tracção.

## 5.4. Comparação com os resultados do modelo original

Conhecendo as condições do modelo de Pinto e Appleton [24] e tendo sido este o utilizado até hoje para a interpretação dos resultados do ensaio LFJ, importa comparar os seus resultados com os do modelo tridimensional sobre o qual incide este trabalho.

A Figura 5.45 apresenta, no mesmo diagrama, as curvas representativas da evolução de $p/\sigma_{zz}$ em função da profundidade da fenda, calculadas com o modelo original e com o

novo modelo tridimensional, para a combinação de dois macacos planos não-inclinados e considerando uma resistência à tracção nula.

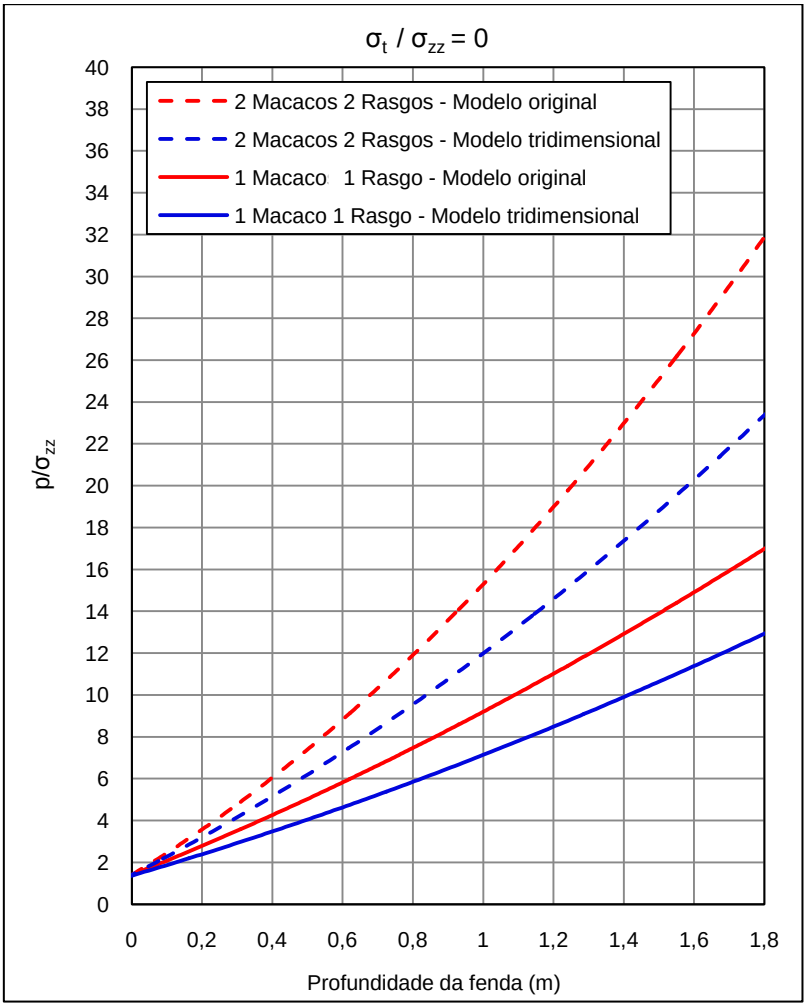



**Figura 5.45 – Diagrama comparativo de resultados de $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade para o modelo original e para o modelo tridimensional, para a combinação de dois e um macacos planos sem inclinação**

A análise da Figura 5.45 permite concluir que, no caso da resistência à tracção ser nula e para qualquer valor de $p/\sigma_{zz}$, o modelo original apresenta uma profundidade de fenda inferior à do modelo tridimensional, tanto na combinação de dois macacos planos como na combinação de apenas um macaco plano.

As Figuras 5.46 e 5.47 apresentam, respectivamente, para a combinação de dois e um macacos planos, as curvas representativas da evolução das constantes, calculadas com o modelo original e com o modelo tridimensional no local de cada defórmetro.

A observação das Figuras 5.46 e 5.47 mostra que as constantes dos macacos planos calculadas, respectivamente, para a combinação de dois e um macacos planos, através do modelo original são inferiores às calculadas através do modelo tridimensional.

A Figura 5.48 ilustra, em cima, as condições de fronteira consideradas no modelo tridimensional e em baixo as condições de fronteira consideradas no modelo original.

A análise da Figura 5.48 permite compreender as diferenças existentes nas condições de ambos os modelos, dado que, como condições de fronteira, o modelo original considera a existência de uma câmara de ensaio com 2 m de largura por 3,5 m de comprimento e altura infinita, enquanto o modelo tridimensional não considera a existência da câmara de ensaio.

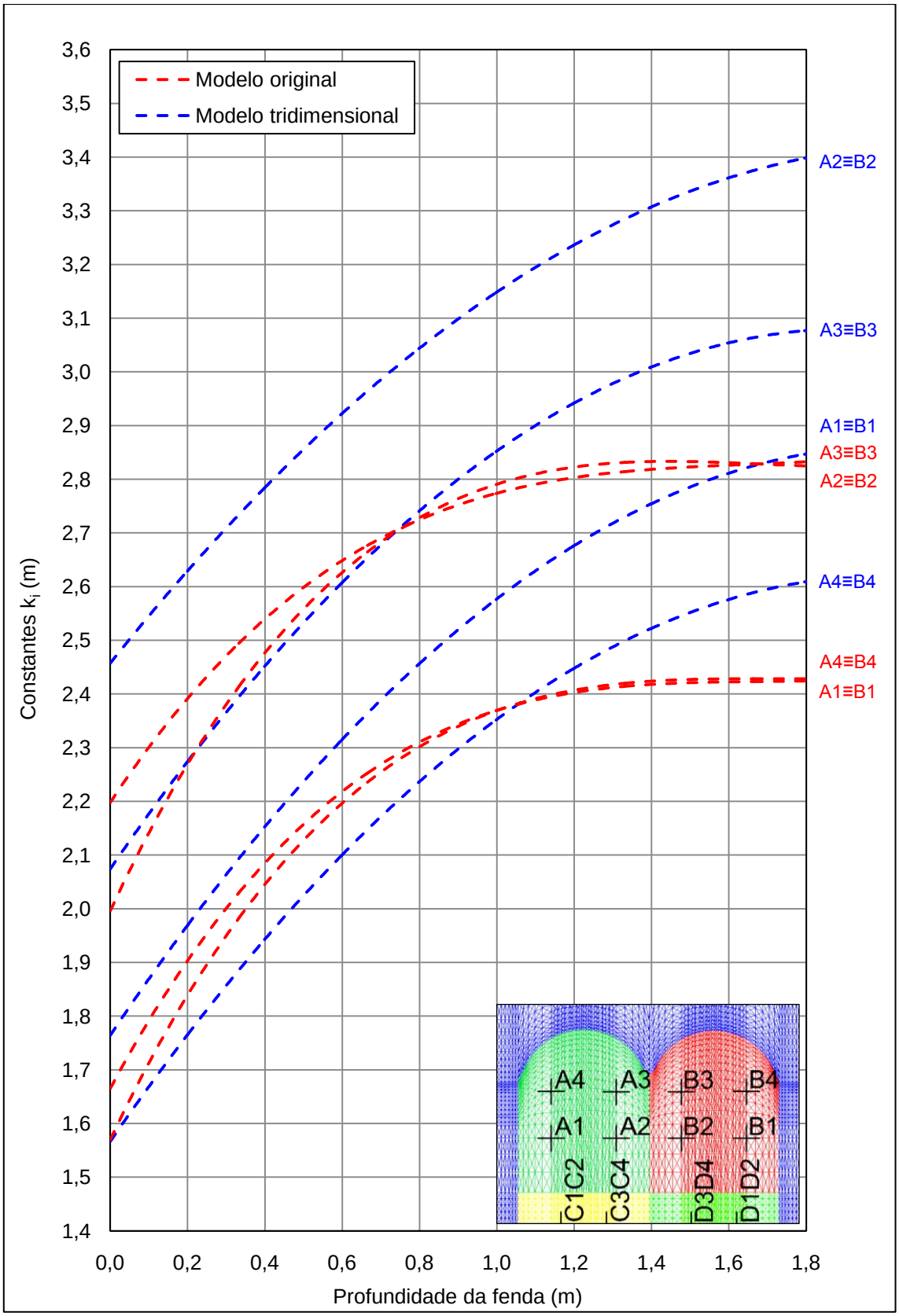



**Figura 5.46 – Diagrama comparativo da evolução das constantes utilizando o modelo original e o modelo tridimensional para a combinação de dois macacos planos sem inclinação**

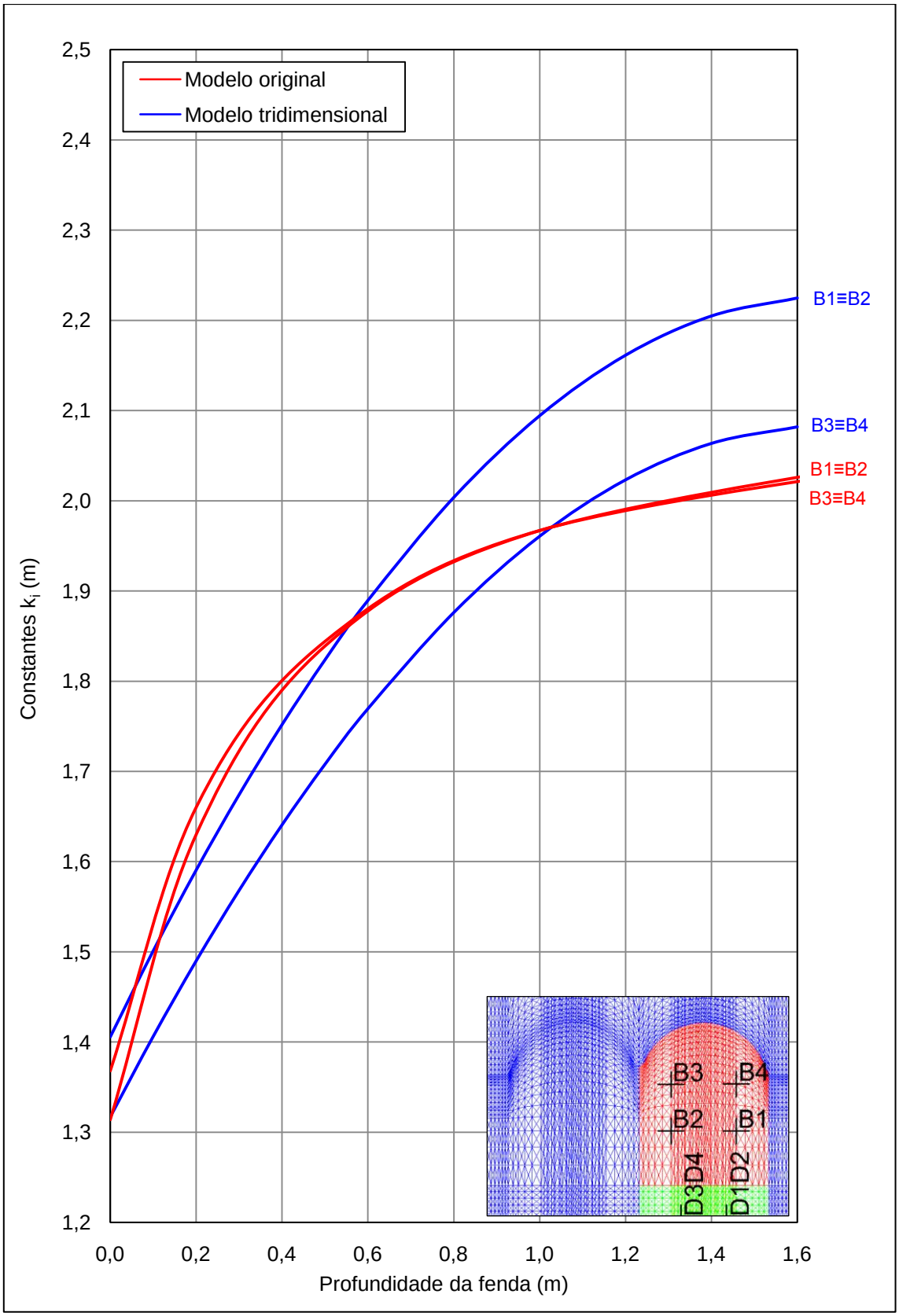



**Figura 5.47 – Diagrama comparativo da evolução das constantes utilizando o modelo original e o modelo tridimensional para a combinação de um macaco plano sem inclinação**

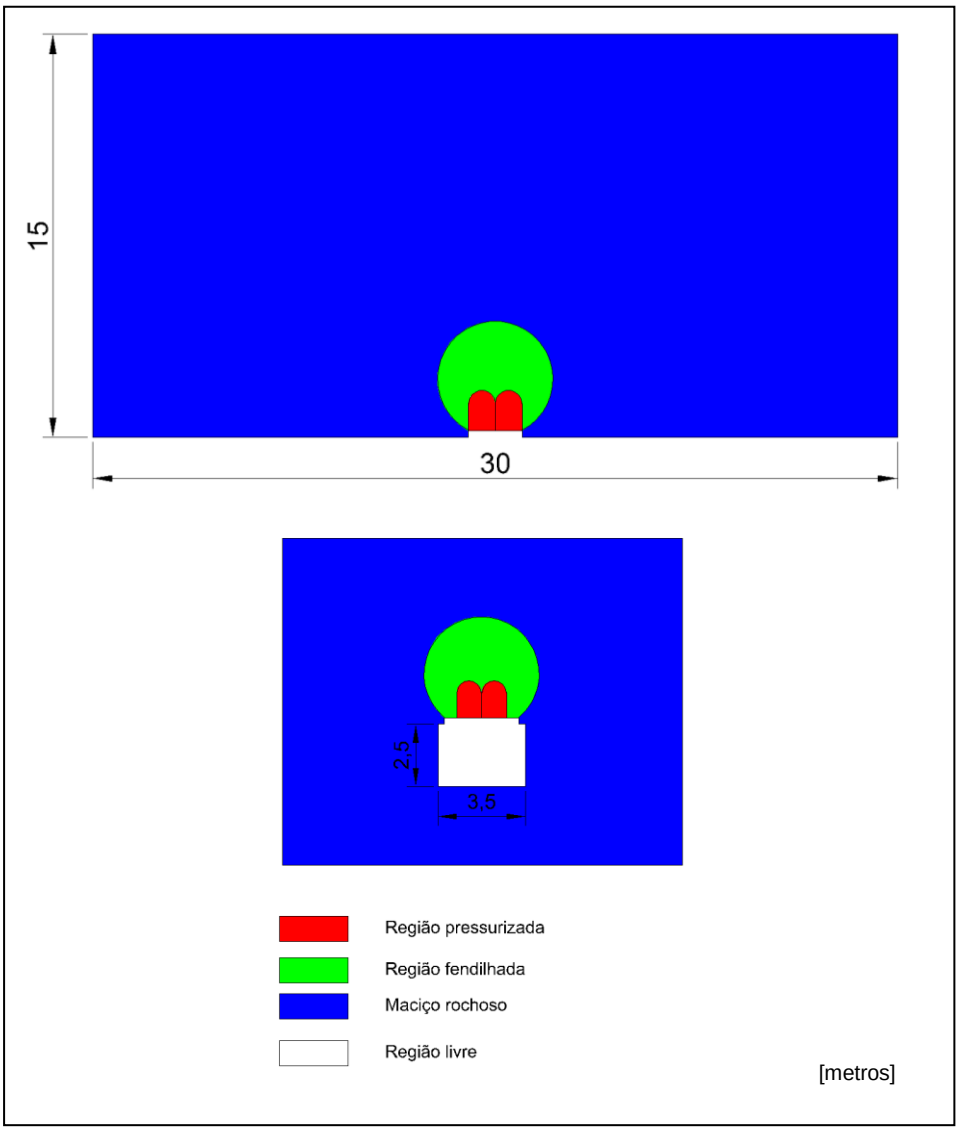



**Figura 5.48 – Condições de fronteira consideradas no modelo tridimensional e no modelo original**

A análise das figuras desta secção permite concluir que no modelo tridimensional se verificam maiores deslocamentos normais nos locais de medição e uma profundidade de fenda superior para o mesmo incremento da relação $p/\sigma_{zz}$, quando comparados com o modelo original.

As diferenças entre os resultados provenientes de ambos os modelos residem no método de cálculo utilizado e nas condições de fronteira. Estas últimas, tal como a secção 5.3. o demonstrou, resultam em significativas diferenças nos resultados provenientes deste tipo de modelos.

# 6. CONCLUSÕES

## 6.1. Conclusões e contribuições

O objectivo principal desta dissertação consistiu na exploração de um modelo numérico tridimensional recentemente desenvolvido com a finalidade de melhorar a compreensão do comportamento do maciço rochoso durante a execução de ensaios *in situ* de macacos planos de grande área. A exploração das potencialidades do novo modelo numérico permitiu chegar às seguintes conclusões e contribuições:

- Efectuou-se a simulação completa e detalhada das várias fases de ensaio, desde o processo de escavação dos rasgos até à pressurização, contribuindo para a melhoria dos conhecimentos sobre este ensaio.

- Desenvolveu-se uma análise detalhada dos resultados da simulação de um ensaio cíclico, permitindo evidenciar o mecanismo de desenvolvimento da fenda de tracção e assim melhorar a compreensão das causas que levam ao comportamento não-linear e histerético observado nos resultados do ensaio.

- Demonstrou-se a influência da profundidade da fenda na determinação do módulo de elasticidade do maciço, utilizando os dados da simulação do ensaio cíclico, o que permitiu validar a metodologia indirecta de determinação da profundidade da fenda de tracção.

- Visualizaram-se os campos de tensões e de deslocamentos existentes no maciço rochoso ao longo do plano de desenvolvimento da fenda e durante as várias fases de ensaio, permitindo uma análise mais correcta do comportamento do maciço rochoso.

- Obtiveram-se os ábacos de interpretação do ensaio para cinco combinações de macacos planos considerando, em duas delas, a inclinação do plano dos rasgos, utilizando uma metodologia baseada nas hipóteses simplificativas dos autores do modelo original.

- Obtiveram-se as constantes de cálculo para sete combinações de macacos planos que permitem a interpretação do ensaio e, consequentemente, a determinação do módulo de elasticidade do maciço rochoso para diversas situações de geometria dos rasgos e do carregamento.

- Confirmou-se a influência da inclinação dos rasgos, bem como das condições de confinamento conferidas pela galeria de ensaios, na interpretação dos resultados do ensaio.

## 6.2. Desenvolvimentos futuros

Com base nas conclusões e contribuições deste trabalho enumeram-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Tendo ficado demonstrado neste trabalho que a alteração das condições de ensaio, em particular as condições de fronteira e a inclinação do plano dos rasgos, introduzem modificações na interpretação dos resultados do ensaio, alguns dos desenvolvimentos futuros passarão pela adaptação do modelo a diferentes situações, nomeadamente adaptações à geometria das galerias onde o ensaio venha a ser realizado.

- A análise dos resultados provenientes da simulação do ensaio cíclico demonstrou que o grau de não-linearidade e histerese observado nos resultados dos ensaios é superior ao que pode ser justificado pelo desenvolvimento da fenda de tracção, pelo que deverá, também, ser estudada a possibilidade de integração no modelo numérico de modelos constitutivos mais complexos que permitam simular a influência das superfícies de descontinuidade vizinhas da zona de ensaio.

# BIBLIOGRAFIA


[1] – ROGERS, J. - *Physical attributes of rock joints*. *Missouri, Missouri University of Science and Technology.* 2009. http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge341/online_lectures/rock_mechanics (25/1/ 2011).

[2] – MOLNIA, B. - *Metamorphism and metamorphic rocks. GeologyClass.org*. s/d http://www.geologyclass.org/Metamorphism%20Concepts_files/image008.jpg (03/5/2011)

[3] – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). **-** *ISRM Slide Collection*. s/d. http://www.isrm.net/fotos/slide_col/1_stru/grandes/273.JPG (03/5/2011)

[4] – NICHOLAS, M. - *Remote Sensing Tutorial*, *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. 2010. http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect2/Sect2_1a.html (03/5/2011)

[5] – HOEK, E. - *Practical Rock Engineering.* North Vancouver, Rocscience, 2007.

[6] – ROCHA, M. - *Mecânica das Rochas.* Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1981.

[7] – WITTKE, W. - *Rock Mechanics.* New York, Springer-Verlag, 1990.

[8] – PINTO, J.L. - *Deformabilidade dos maciços rochosos.* Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1983.

[9] – GOMES, A. - *EstratoBlog.* 2010. http://estratoblog.blogspot.com (25 /1/2011)

[10] – DREYER, W. - *Die Festigkeitseigenschaften natürlicher gesteine.* Berlin : Clausthalars Helft zur lagerstattenkunde, 1967.

[11] – GOODMAN, R. - *Introduction to Rock Mechanics*. Nova Iorque : Jonh Wiley & Sons, 1980.

[12] – CUNHA, A; MURALHA, J. - *About LNEC experience on scale effects in rock masses*. Internacional workshop on scale effects in rock masses, págs: 219 – 229. Loen Ed.Balkema, 1990.

[13] – NÚCLEO DE FUNDAÇÕES E OBRAS SUBTERRÂNEAS (NFOS)**.** *Ensaios Dilatométricos em maciços rochosos realizados com o equipamento BHD do LNEC.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009.

[14] – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) - *prEN ISO 22476-5 Geotechnical Investigation and Testing, Field testing - Part 5 - Flexible dilatometer test.* Geneva : CEN, 2009.

[15] – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) - *prEN ISO 22476-7 Geotechnical Investigation and Testing, Field testing - Part 7 - Borehole jack test.* Geneva : CEN, 2009.

[16] – DURHAM GEO SLOPE. *Durham Geo Slope indicator*. 2008. http://www.slopeindicator.com/. (26/1/2011)

[17] – ROCHA, M. - *A New Method for the Determination of Deformability in Rock Masses.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1970.

[18] – HOEK, E.; DIEDERICHS, M.S. - *Empirical estimation of rock mass modulus.* International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, págs: 203 – 215. 2006.

[19] – GROSSMANN, N.; CÂMARA, R. - *About Measuring in situ Stresses using the large flat jack technique (LFJ).* Proceedings of the International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurement. págs:375 – 383 , 1986.

[20] – VRKJAN, I.*;* KAVUR, B. - *Experience gained in rock mass deformability testing by large flat jacks.* Proceedings of the ISRM Regional Symposium, págs:191 – 196, 2001.

[21] – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM)**.** *Suggested Method for Deformability Determination Using a Large Flat Jack Technique.* International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 23, págs:131 – 140. 1986.

[22] – FIGUEIREDO, B.; LAMAS, L.; MURALHA, J. - *Determination of In Situ Stresses Using Large Flat Jack Tests*. Proceedings of the ISRM International Symposium and 6th Asian Rock Mechanics Symposium on Advances in Rock Engineering, Abstracts volume, pág: 27 . 2010.

[23] – PINTO, J.L. - *Determination of deformability modulus of weak rock masses.* Proceedings of the International Symposium on Weak Rock. págs:447 – 452 , 1981.

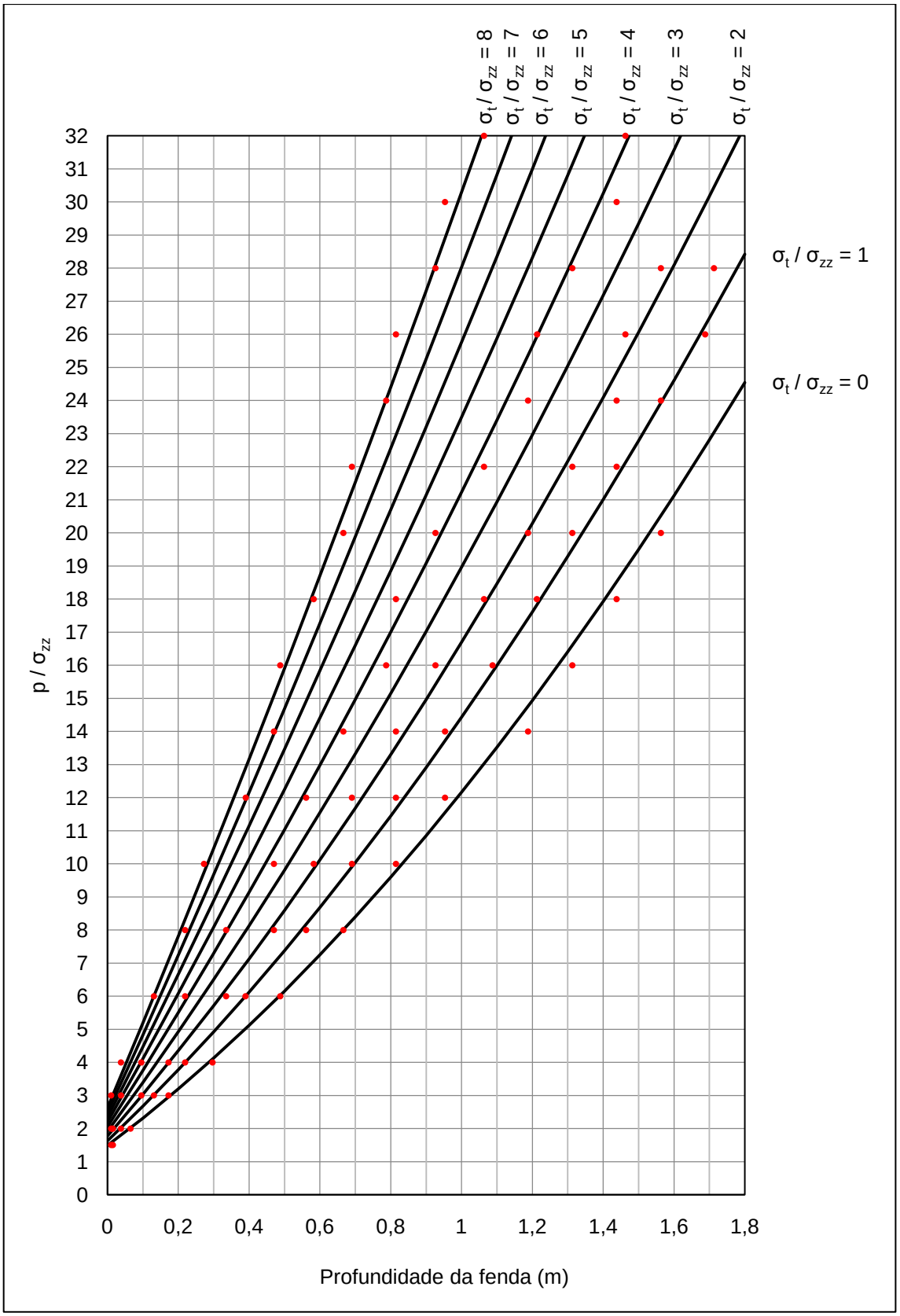
[24] – PINTO, J.L.; APPLETON, J. - *Determinação da deformabilidade de maciços rochosos utilizando a técnica dos macacos planos de grande área.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1976.

[25] – ITASCA**.** *FLAC3D, Version 4.0, User's manual.* Minneapolis : Itasca Consulting Group, 2009.

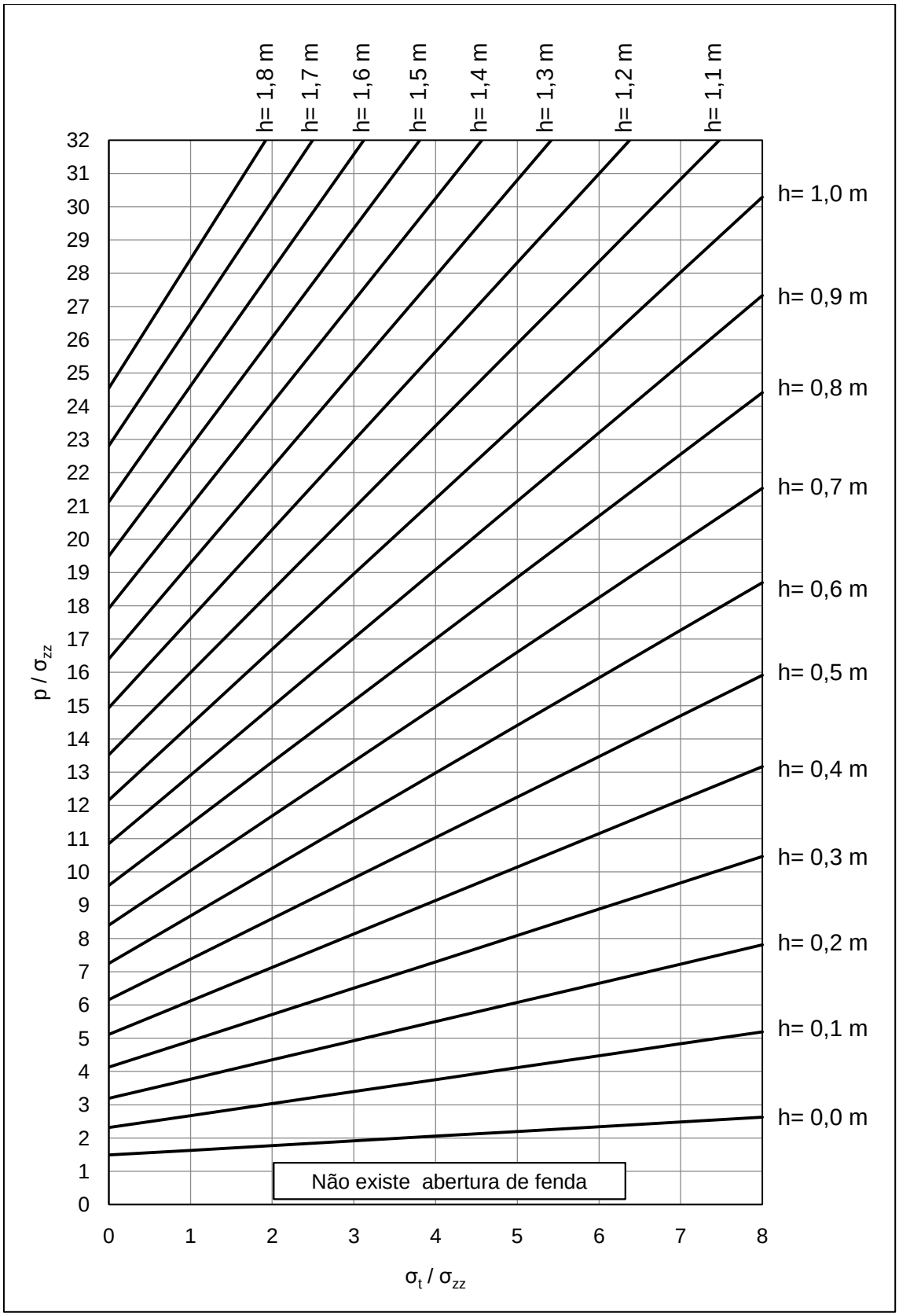
[26] – RESENDE, R. - *Um modelo para o estudo de cenários de rotura de fundações rochosas de barragens*. Tese de Mestrado no Instituto Superior Técnico. Edição LNEC TM13, 2003.

[27] – STATSOFT. *STATISTICA, Version 8.0, Electronic manual*. Tulsa (USA): Statsoft Inc., 2007.

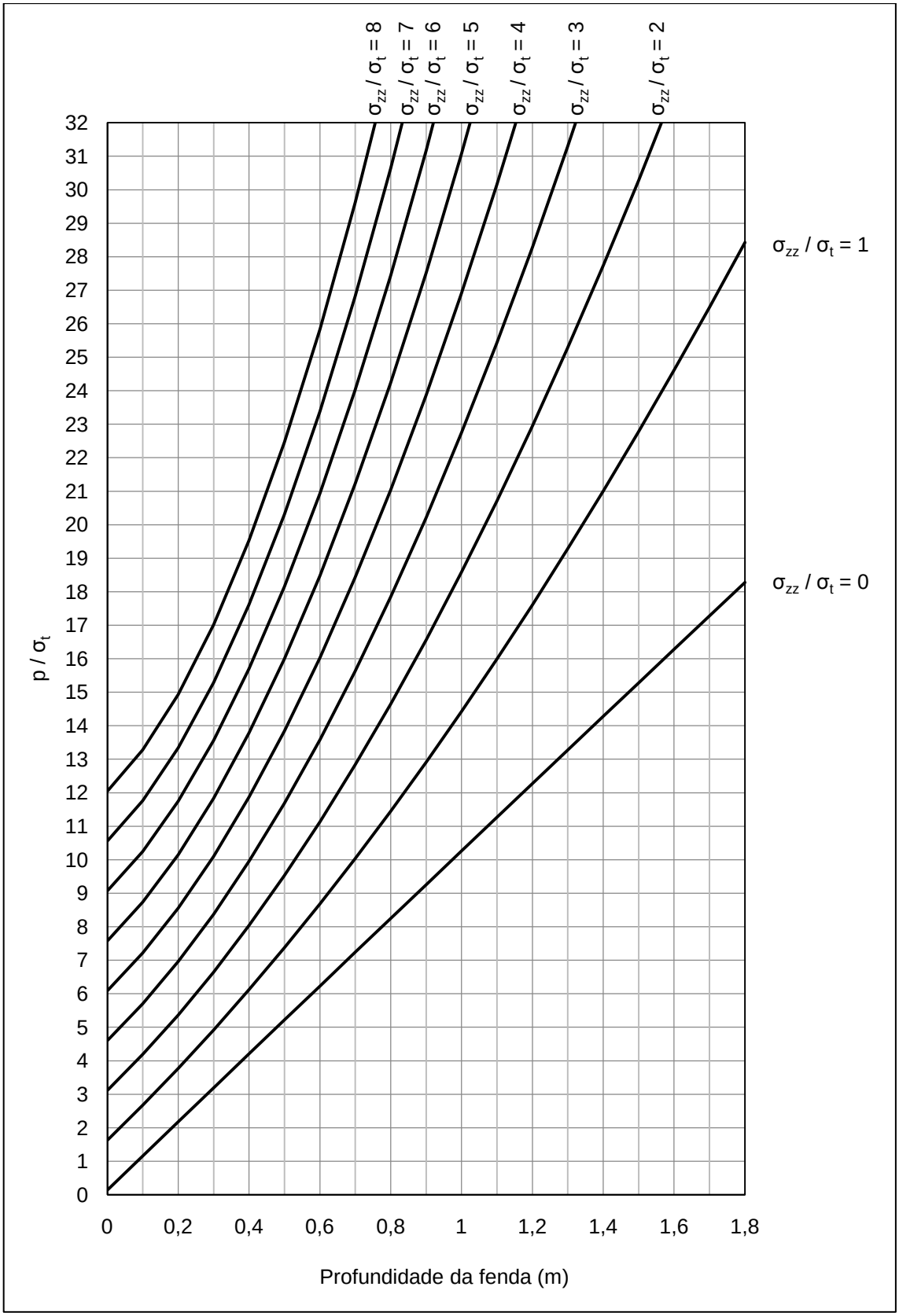
# ANEXO A – Ábacos



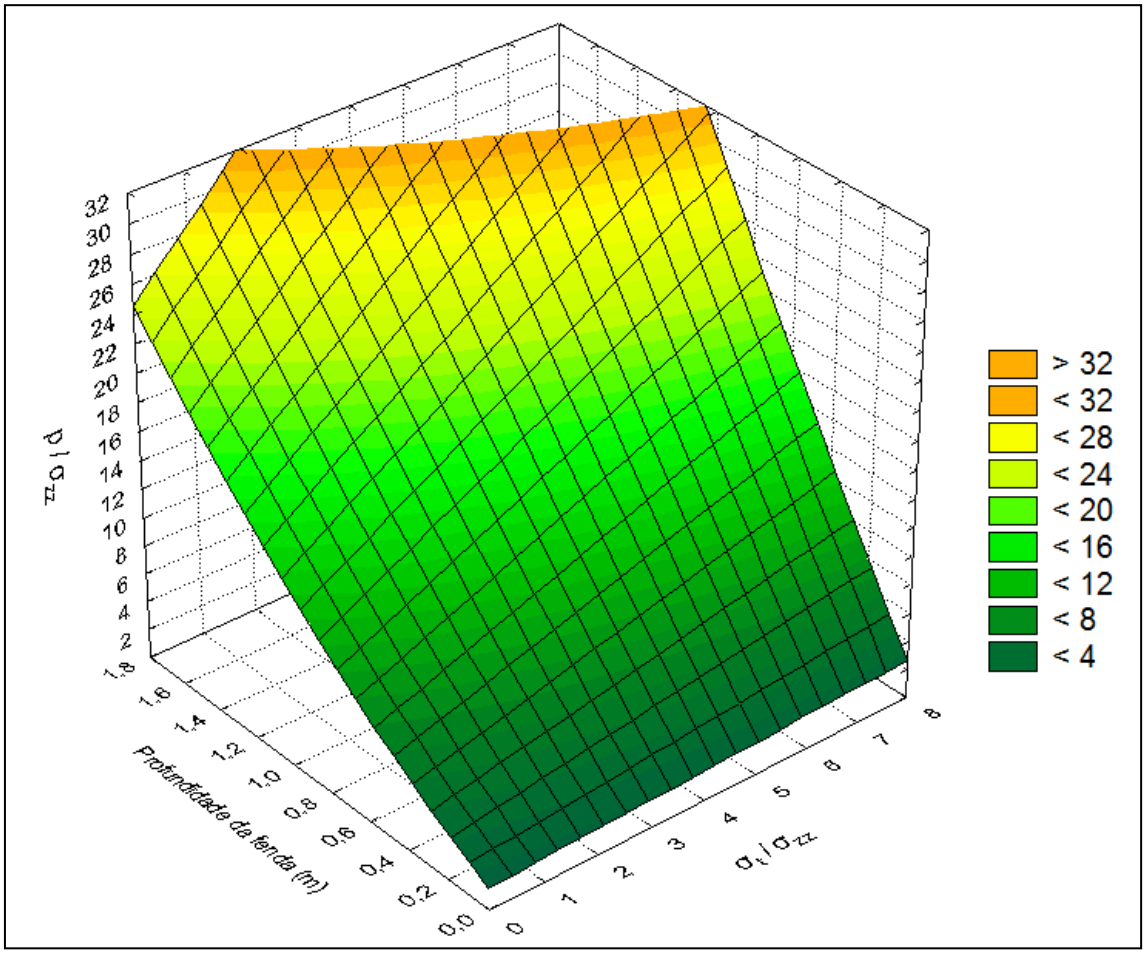

**A 1 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$ , para a combinação de um macaco plano e dois rasgos**



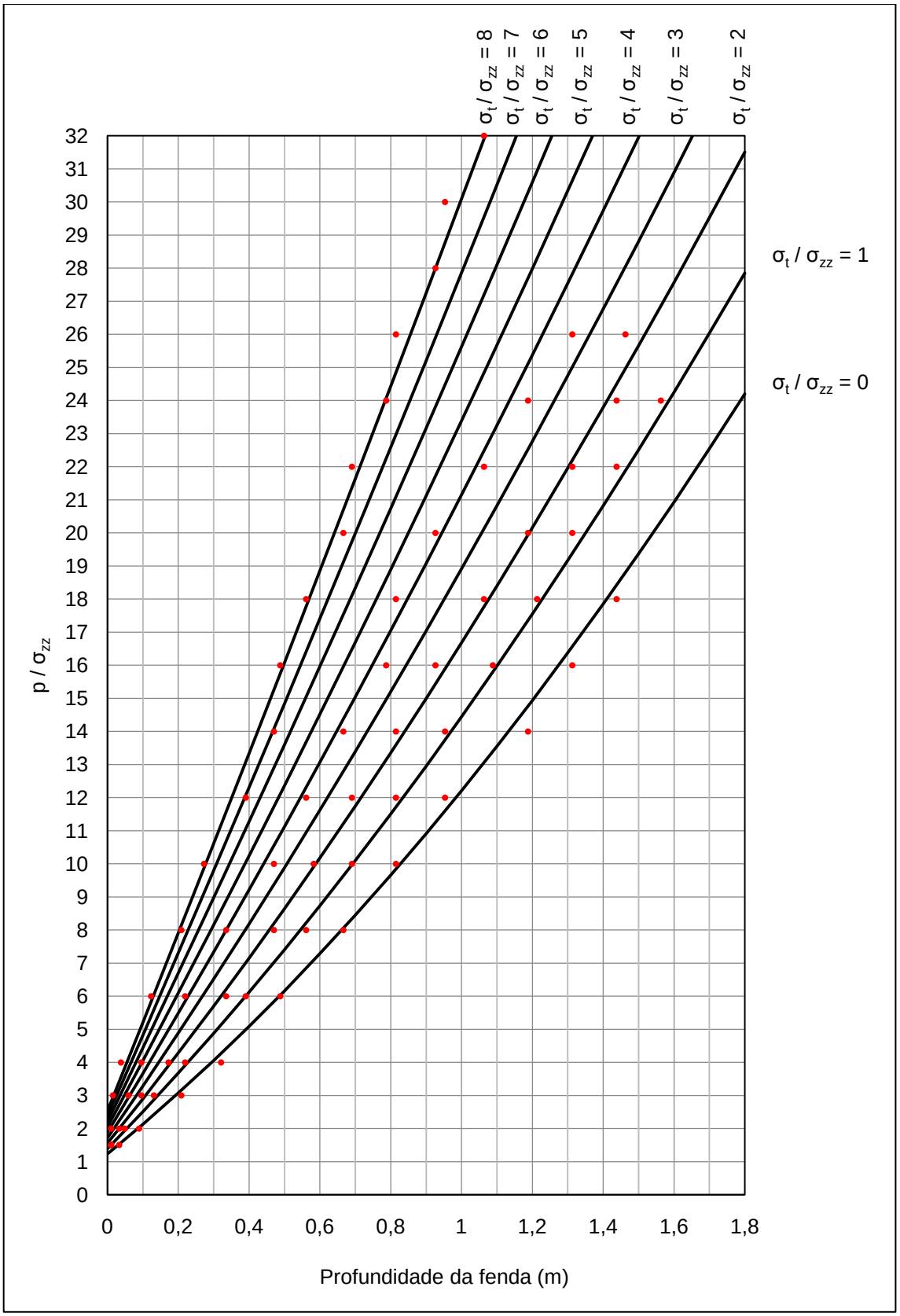

**A 2 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para várias profundidades de fenda, para a combinação de um macaco plano e dois rasgos**



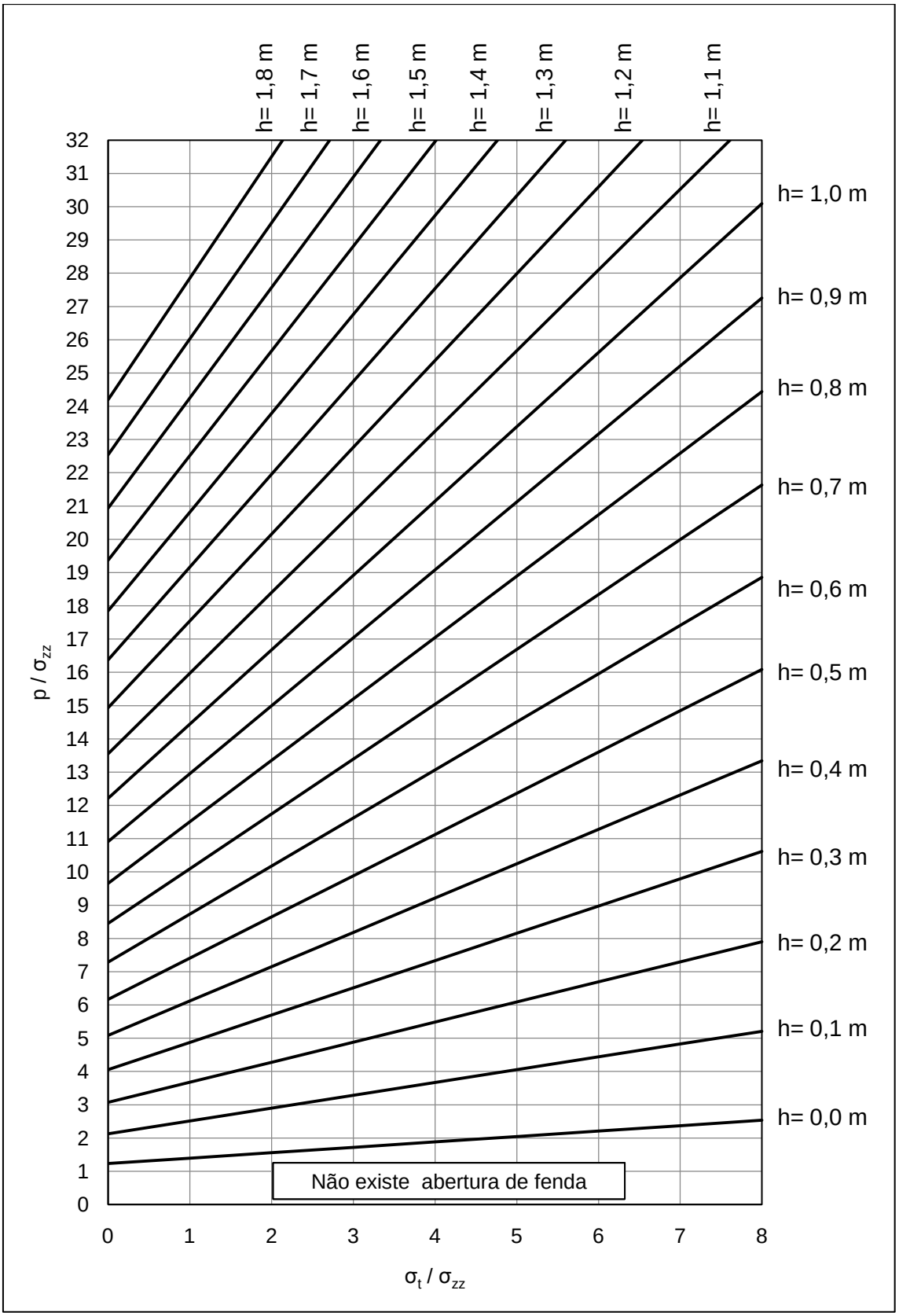

**A 3 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para a combinação de um macaco plano e dois rasgos**



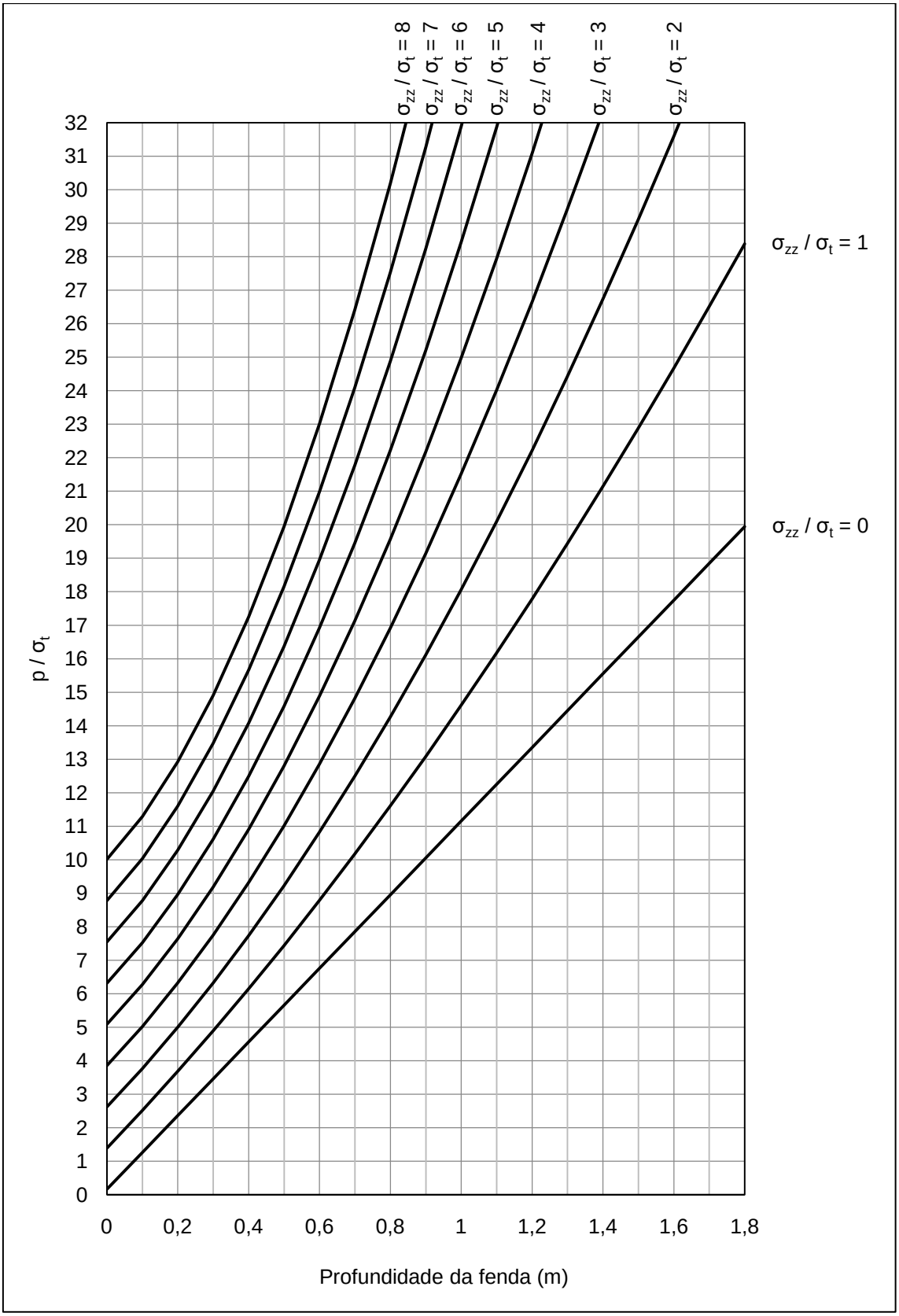

**A 4 – Superfície tridimensional de representação da expressão (17), para a combinação de um macaco plano e dois rasgos**



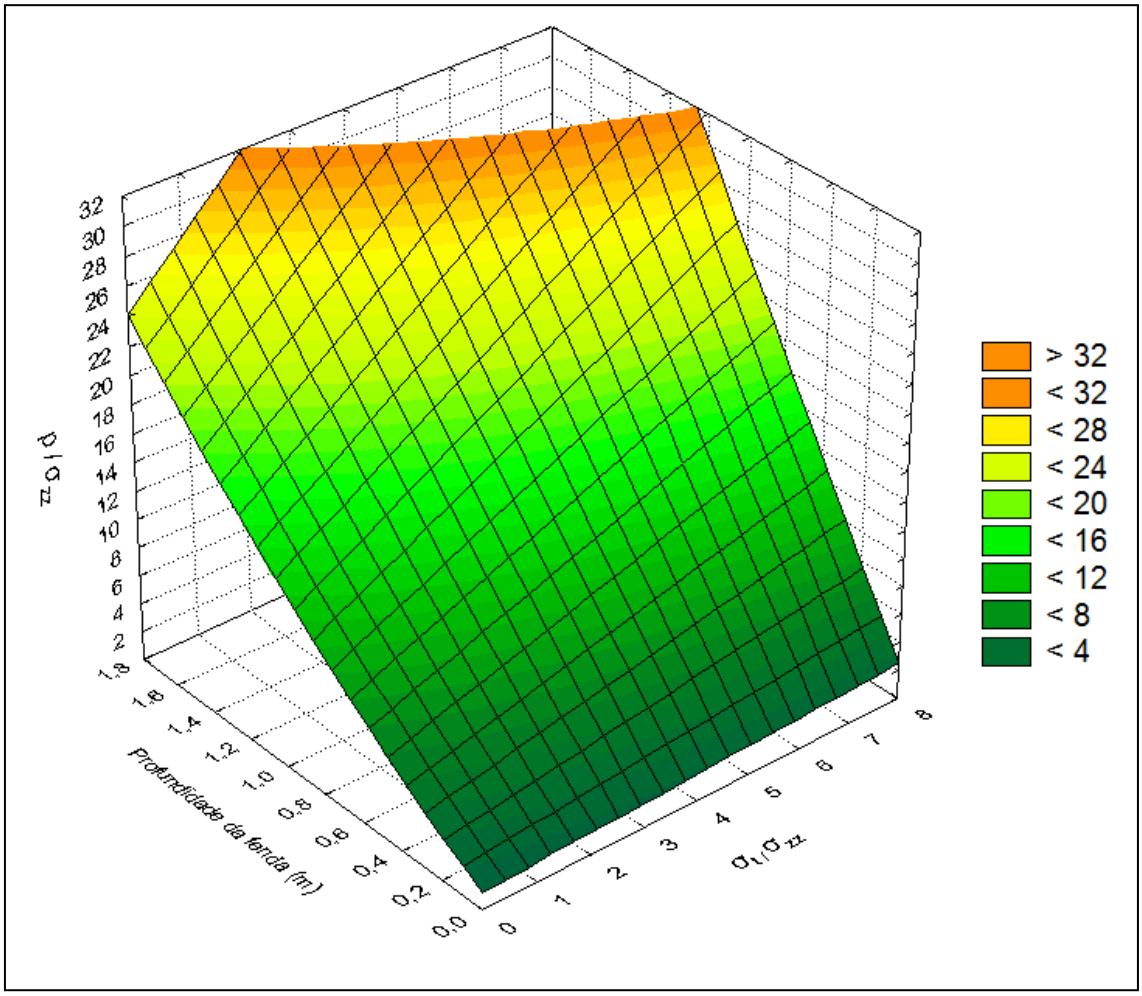

**A 5 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para a combinação de um macaco plano**



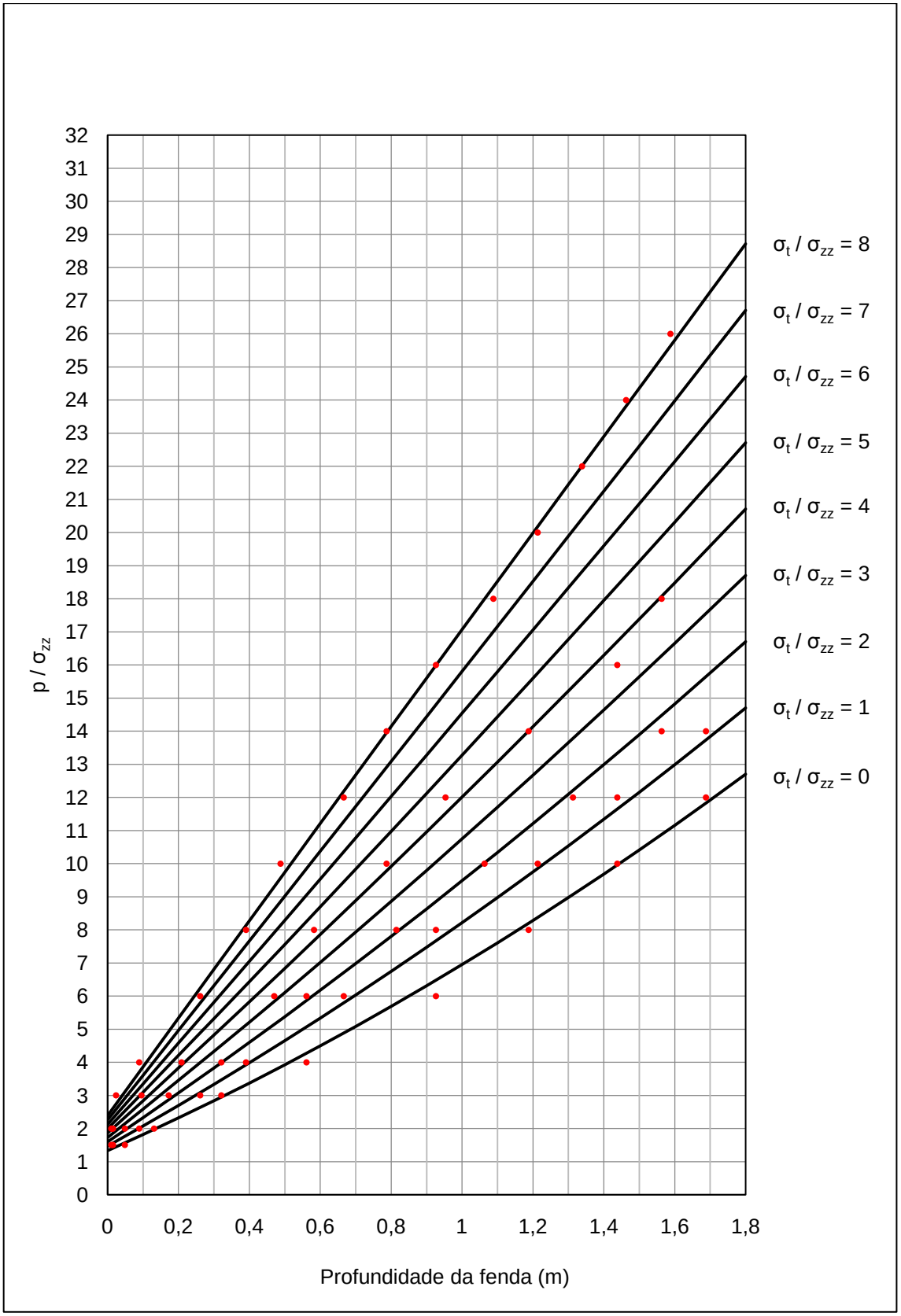

**A 6 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para várias profundidades de fenda, para a combinação de um macaco plano**



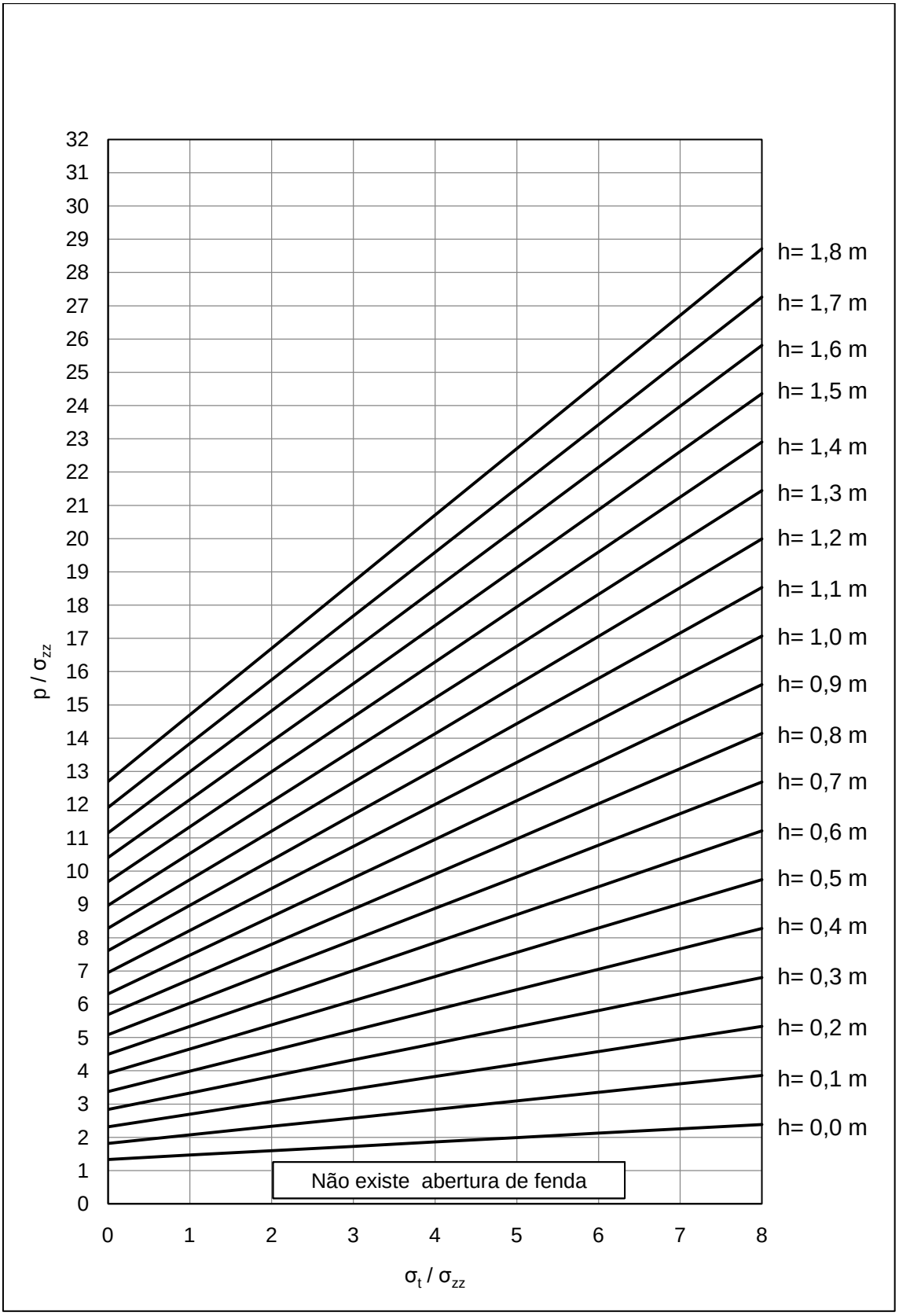

**A 7 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, , para a combinação de um macaco plano**



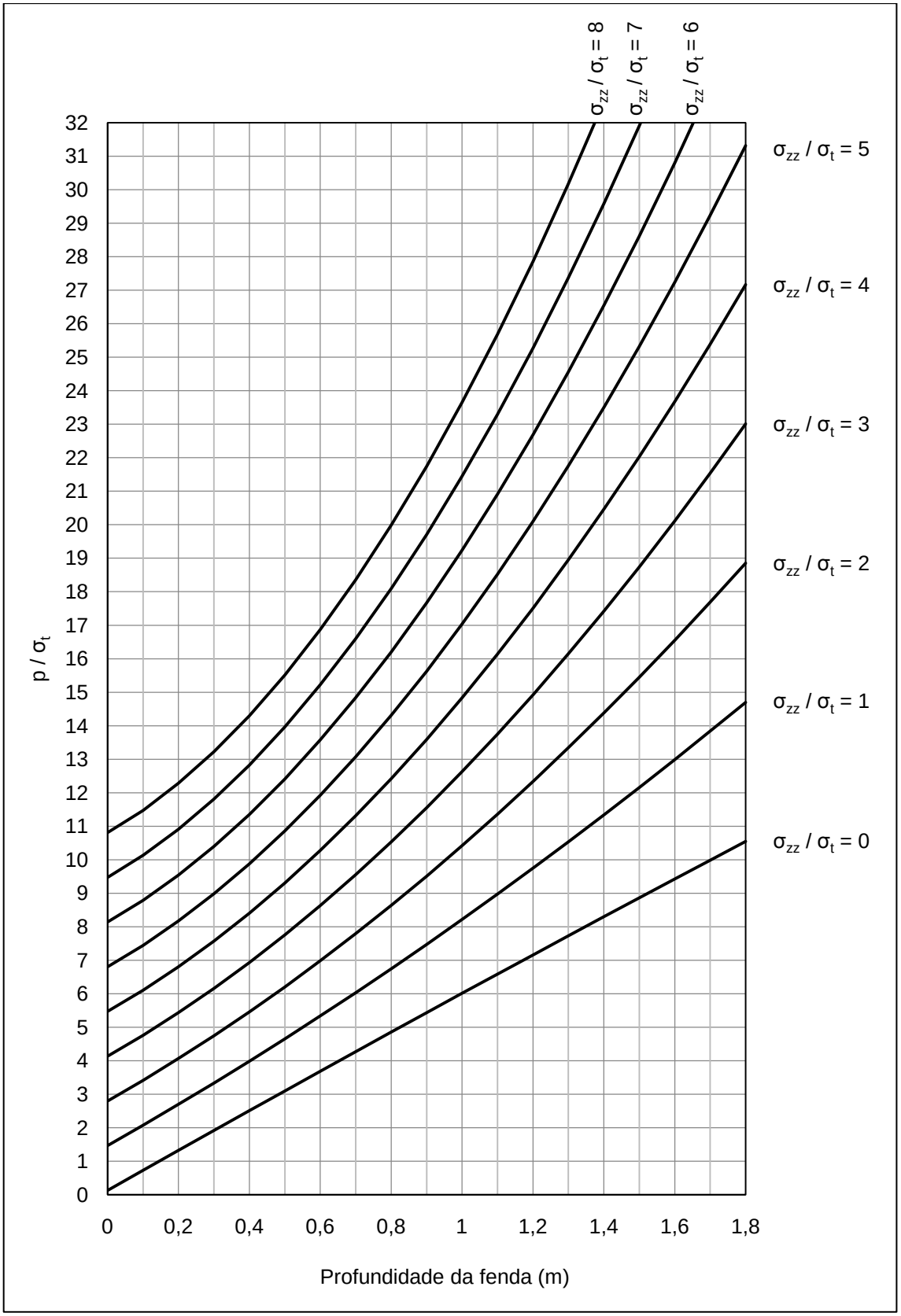

**A 8 – Superfície tridimensional de representação da expressão (17), para a combinação de um macaco plano**



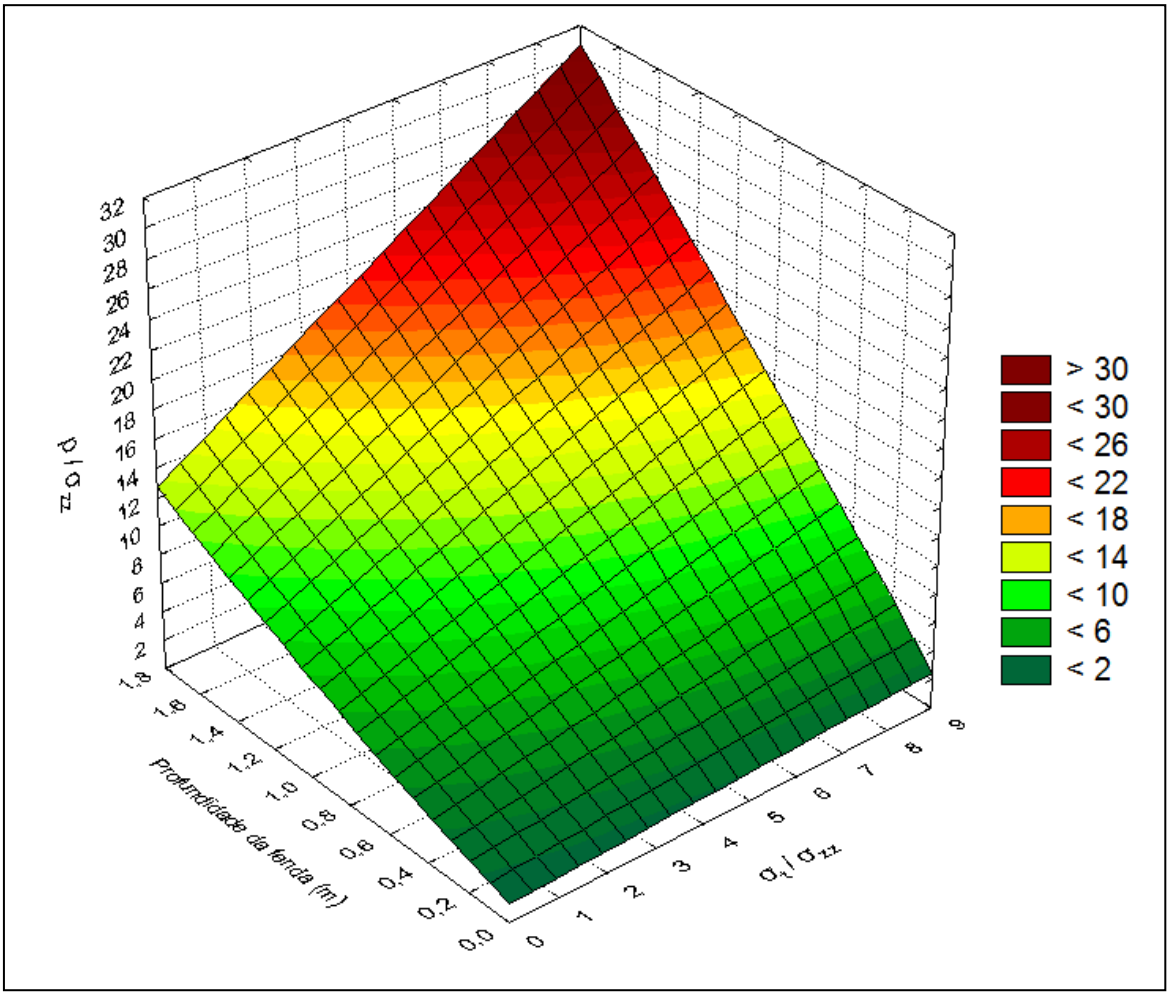

**A 9 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para a combinação de dois macacos planos inclinados a 10º**



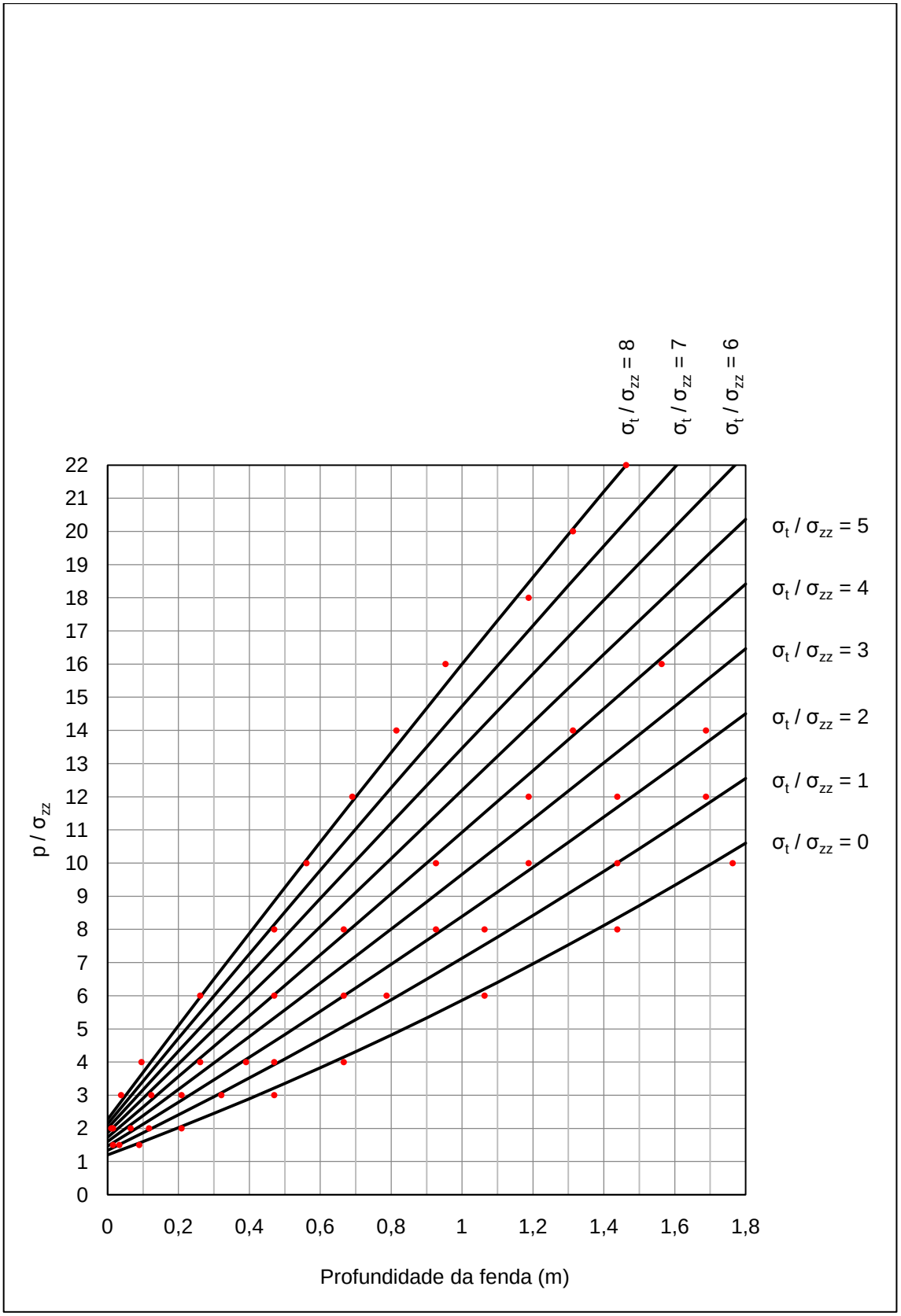

**A 10 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para várias profundidades de fenda, para a combinação de dois macacos planos a 10º**



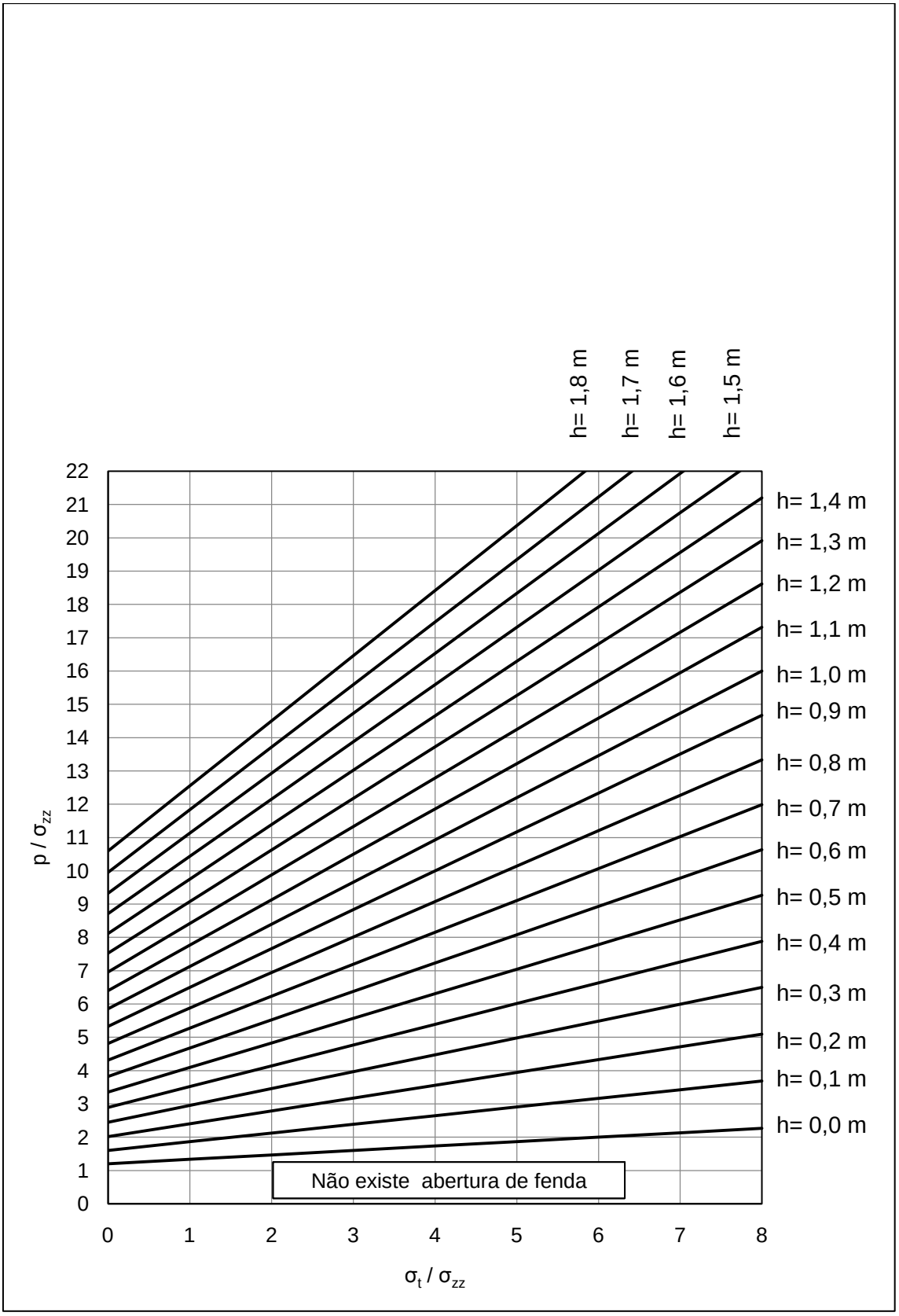

**A 11 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para a combinação de dois macacos planos inclinados a 10º**



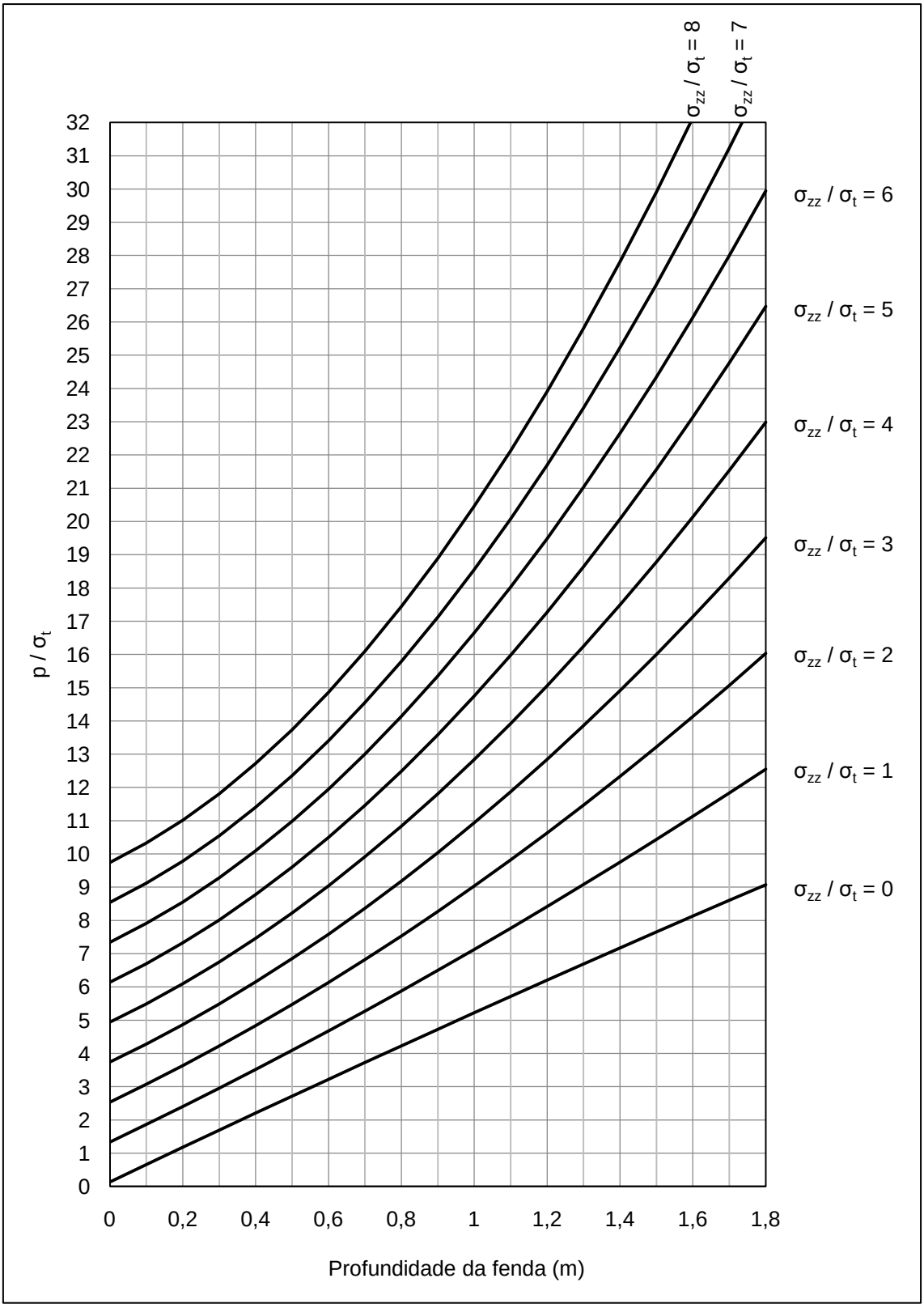

**A 12 – Superfície tridimensional de representação da expressão (17), para a combinação de dois macacos planos inclinados a 10º**



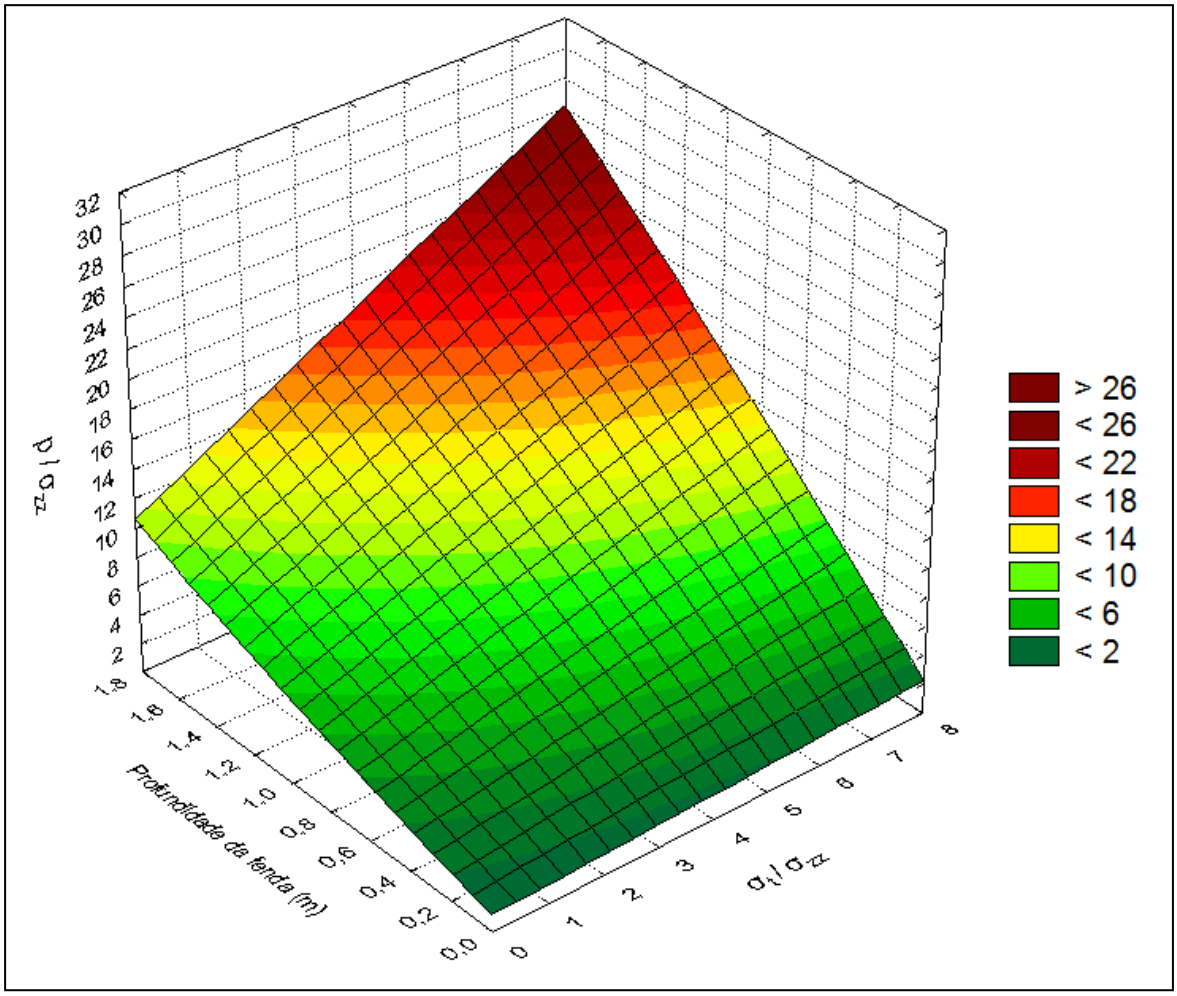

**A 13 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para a combinação de dois macacos planos inclinados a 20º**




**A 14 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para várias profundidades de fenda, para a combinação de dois macacos planos a 20º**

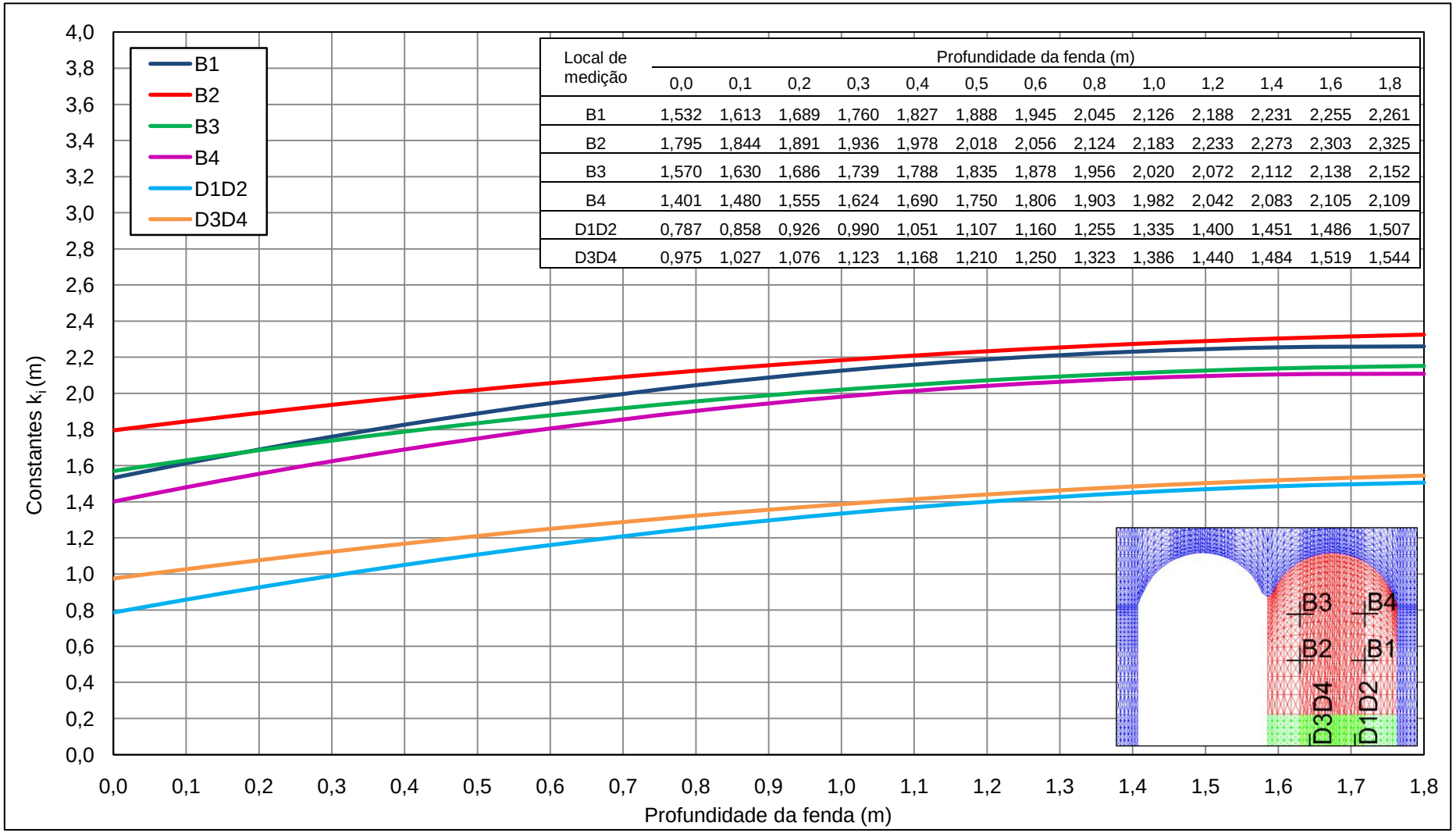



**A 15 – Diagrama $p/\sigma_{zz}$ *versus* profundidade da fenda, para várias relações de $\sigma_t/\sigma_{zz}$, para a combinação de dois macacos planos inclinados a 20º**



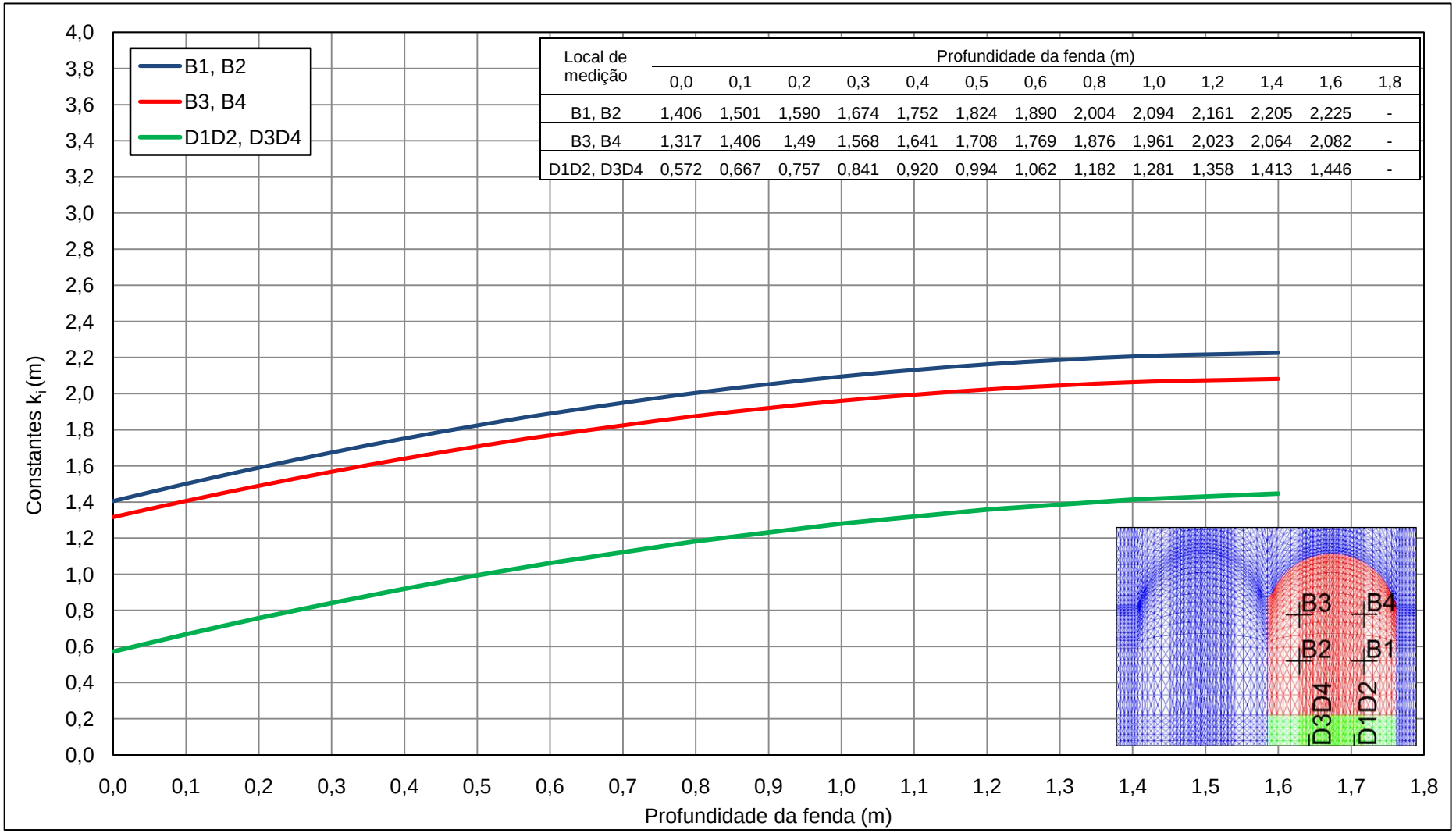

**A 16 – Superfície tridimensional de representação da expressão (17), para a combinação de dois macacos planos inclinados a 20º**

## ANEXO B – Constantes dos macacos planos



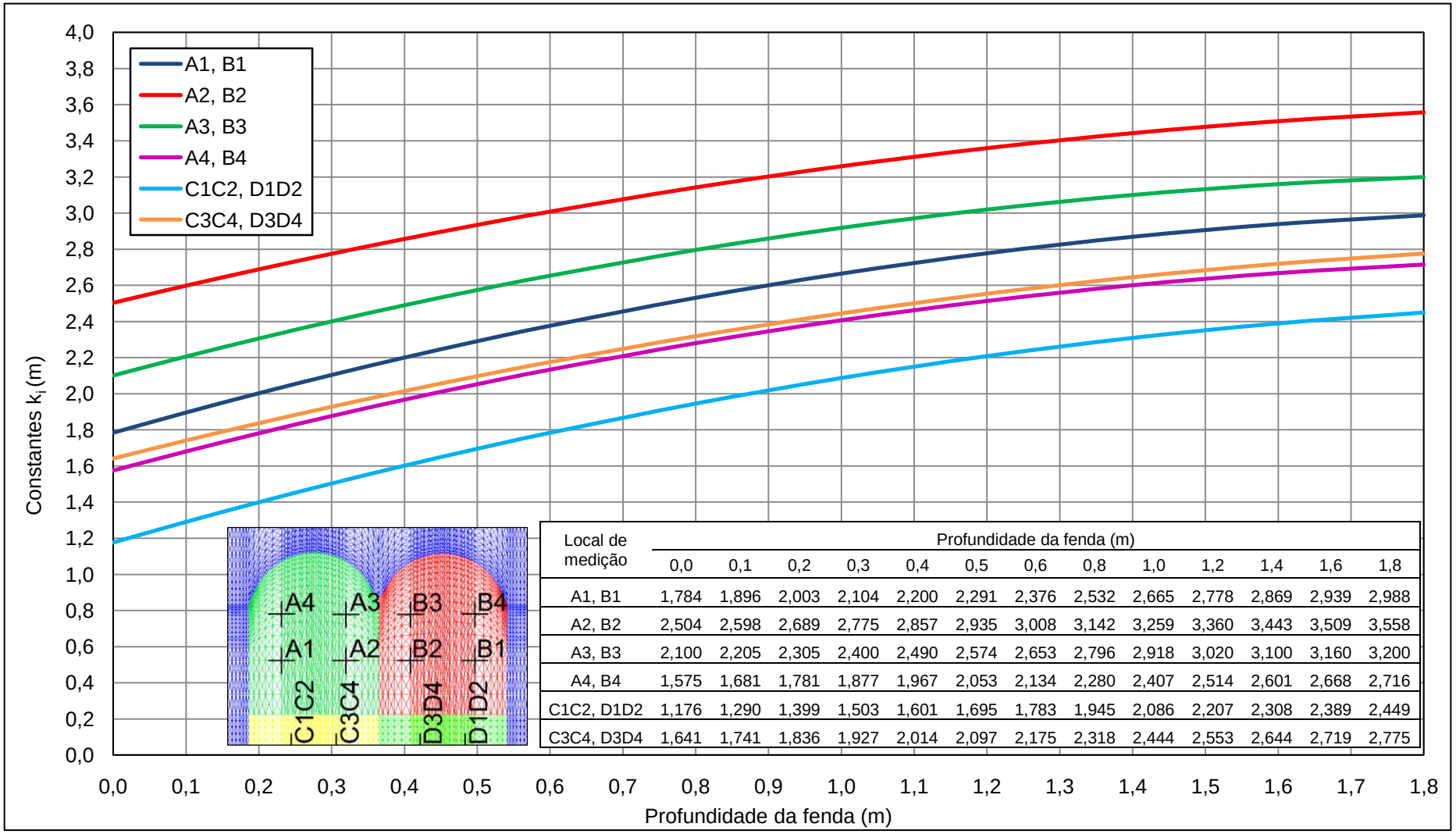

| Local de medição | Profundidade da fenda (m) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| B1 | 1,532 | 1,613 | 1,689 | 1,760 | 1,827 | 1,888 | 1,945 | 2,045 | 2,126 | 2,188 | 2,231 | 2,255 | 2,261 |
| B2 | 1,795 | 1,844 | 1,891 | 1,936 | 1,978 | 2,018 | 2,056 | 2,124 | 2,183 | 2,233 | 2,273 | 2,303 | 2,325 |
| B3 | 1,570 | 1,630 | 1,686 | 1,739 | 1,788 | 1,835 | 1,878 | 1,956 | 2,020 | 2,072 | 2,112 | 2,138 | 2,152 |
| B4 | 1,401 | 1,480 | 1,555 | 1,624 | 1,690 | 1,750 | 1,806 | 1,903 | 1,982 | 2,042 | 2,083 | 2,105 | 2,109 |
| D1D2 | 0,787 | 0,858 | 0,926 | 0,990 | 1,051 | 1,107 | 1,160 | 1,255 | 1,335 | 1,400 | 1,451 | 1,486 | 1,507 |
| D3D4 | 0,975 | 1,027 | 1,076 | 1,123 | 1,168 | 1,210 | 1,250 | 1,323 | 1,386 | 1,440 | 1,484 | 1,519 | 1,544 |

**B 1 – Evolução das constantes em cada defórmetro ou elongâmetro em função da profundidade da fenda de tracção para a combinação de um macaco plano e dois rasgos sem inclinação do plano dos rasgos**



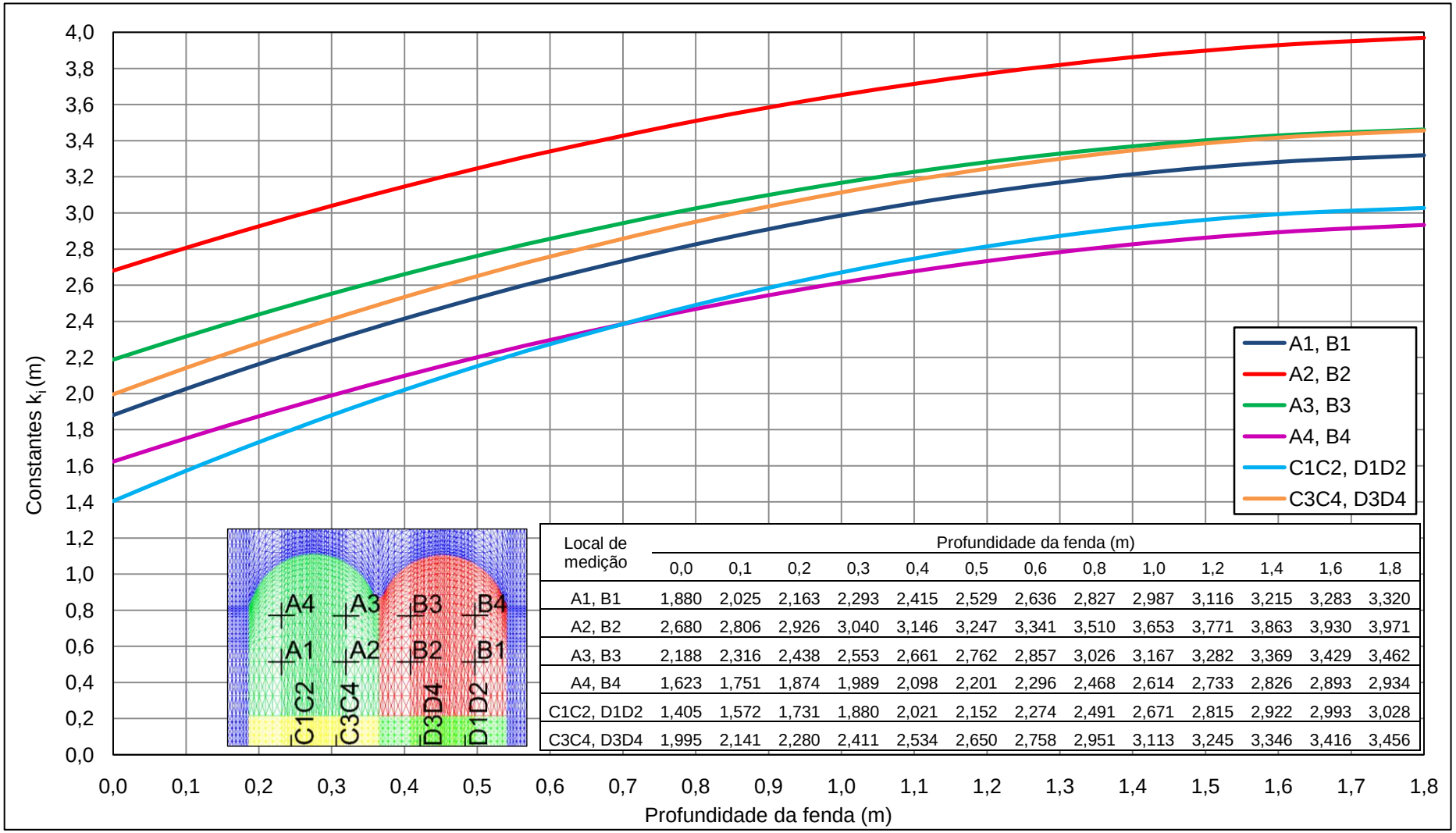

| Local de medição | Profundidade da fenda (m) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| B1, B2 | 1,406 | 1,501 | 1,590 | 1,674 | 1,752 | 1,824 | 1,890 | 2,004 | 2,094 | 2,161 | 2,205 | 2,225 | - |
| B3, B4 | 1,317 | 1,406 | 1,49 | 1,568 | 1,641 | 1,708 | 1,769 | 1,876 | 1,961 | 2,023 | 2,064 | 2,082 | - |
| D1D2, D3D4 | 0,572 | 0,667 | 0,757 | 0,841 | 0,920 | 0,994 | 1,062 | 1,182 | 1,281 | 1,358 | 1,413 | 1,446 | - |

**B 2 – Evolução das constantes em cada defórmetro ou elongâmetro em função da profundidade da fenda de tracção para a combinação de um macaco plano e um rasgo sem inclinação do plano dos rasgos**



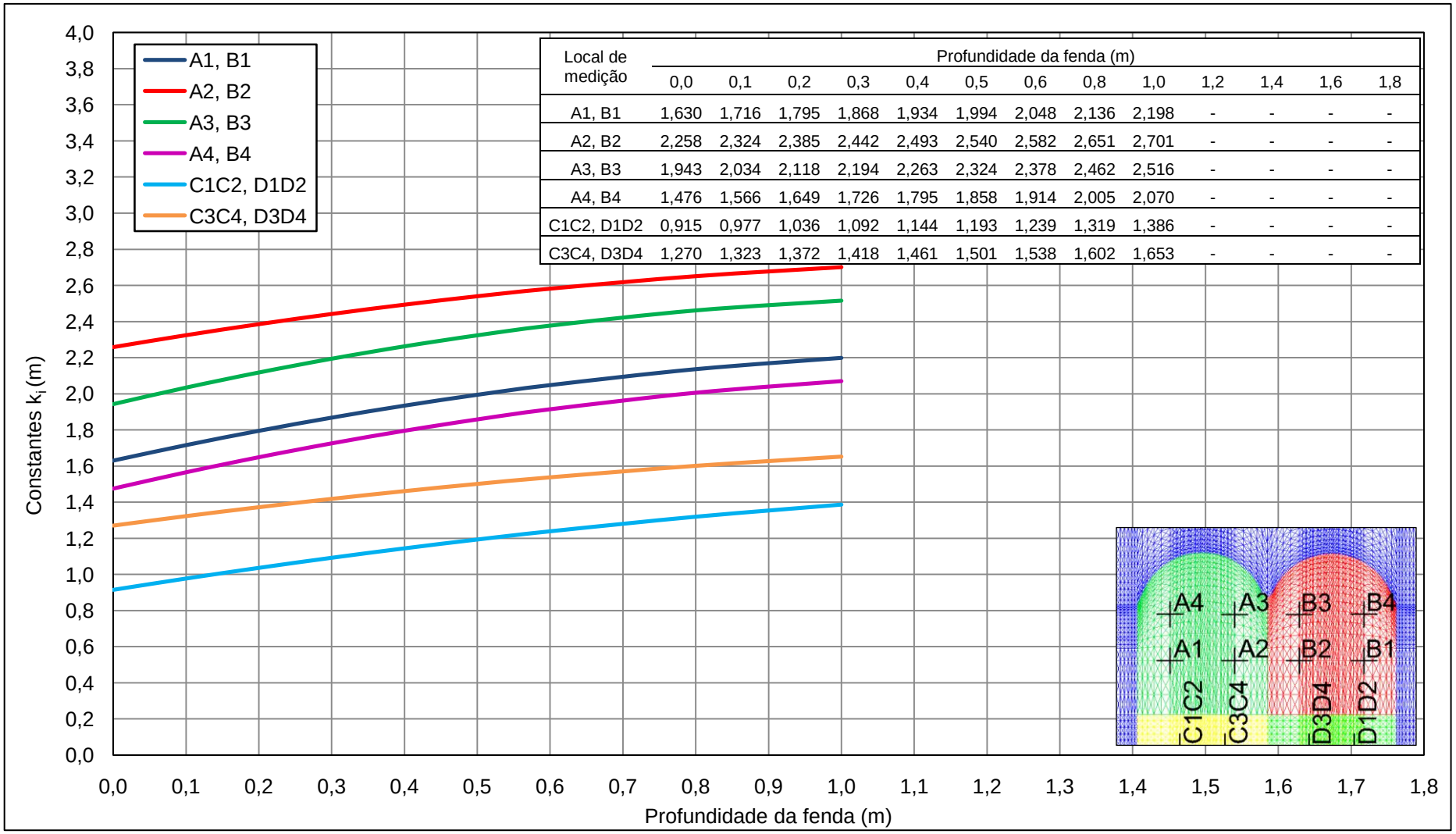

| Local de medição | Profundidade da fenda (m) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| A1, B1 | 1,784 | 1,896 | 2,003 | 2,104 | 2,200 | 2,291 | 2,376 | 2,532 | 2,665 | 2,778 | 2,869 | 2,939 | 2,988 |
| A2, B2 | 2,504 | 2,598 | 2,689 | 2,775 | 2,857 | 2,935 | 3,008 | 3,142 | 3,259 | 3,360 | 3,443 | 3,509 | 3,558 |
| A3, B3 | 2,100 | 2,205 | 2,305 | 2,400 | 2,490 | 2,574 | 2,653 | 2,796 | 2,918 | 3,020 | 3,100 | 3,160 | 3,200 |
| A4, B4 | 1,575 | 1,681 | 1,781 | 1,877 | 1,967 | 2,053 | 2,134 | 2,280 | 2,407 | 2,514 | 2,601 | 2,668 | 2,716 |
| C1C2, D1D2 | 1,176 | 1,290 | 1,399 | 1,503 | 1,601 | 1,695 | 1,783 | 1,945 | 2,086 | 2,207 | 2,308 | 2,389 | 2,449 |
| C3C4, D3D4 | 1,641 | 1,741 | 1,836 | 1,927 | 2,014 | 2,097 | 2,175 | 2,318 | 2,444 | 2,553 | 2,644 | 2,719 | 2,775 |

**B 3 – Evolução das constantes em cada defórmetro ou elongâmetro em função da profundidade da fenda de tracção para a combinação de dois macacos planos e dois rasgos com uma inclinação de 10º do plano dos rasgos**



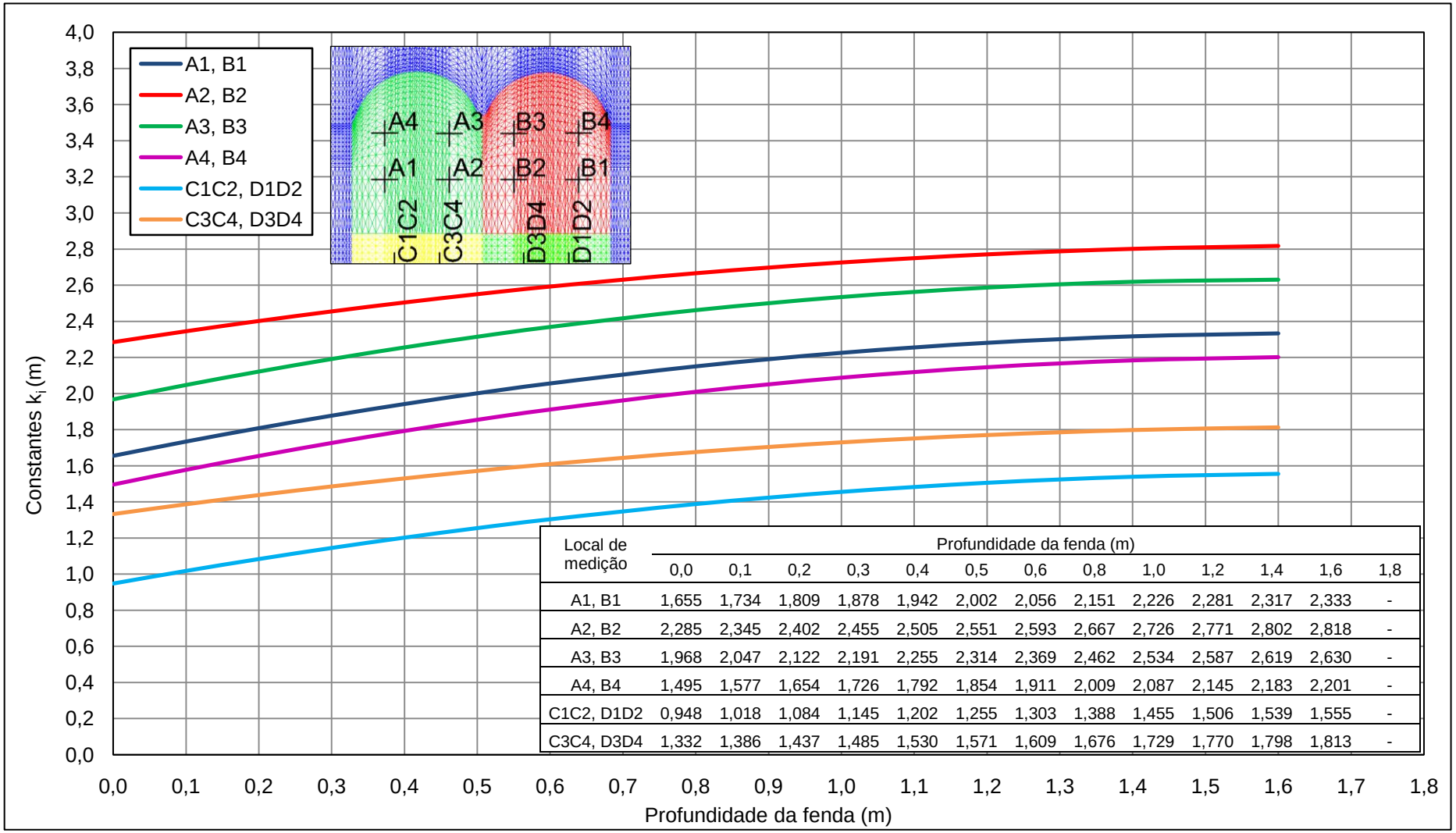

| Local de medição | Profundidade da fenda (m) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| A1, B1 | 1,880 | 2,025 | 2,163 | 2,293 | 2,415 | 2,529 | 2,636 | 2,827 | 2,987 | 3,116 | 3,215 | 3,283 | 3,320 |
| A2, B2 | 2,680 | 2,806 | 2,926 | 3,040 | 3,146 | 3,247 | 3,341 | 3,510 | 3,653 | 3,771 | 3,863 | 3,930 | 3,971 |
| A3, B3 | 2,188 | 2,316 | 2,438 | 2,553 | 2,661 | 2,762 | 2,857 | 3,026 | 3,167 | 3,282 | 3,369 | 3,429 | 3,462 |
| A4, B4 | 1,623 | 1,751 | 1,874 | 1,989 | 2,098 | 2,201 | 2,296 | 2,468 | 2,614 | 2,733 | 2,826 | 2,893 | 2,934 |
| C1C2, D1D2 | 1,405 | 1,572 | 1,731 | 1,880 | 2,021 | 2,152 | 2,274 | 2,491 | 2,671 | 2,815 | 2,922 | 2,993 | 3,028 |
| C3C4, D3D4 | 1,995 | 2,141 | 2,280 | 2,411 | 2,534 | 2,650 | 2,758 | 2,951 | 3,113 | 3,245 | 3,346 | 3,416 | 3,456 |

**B 4 – Evolução das constantes em cada defórmetro ou elongâmetro em função da profundidade da fenda de tracção para a combinação de dois macacos planos e dois rasgos com uma inclinação de 20º do plano dos rasgos**



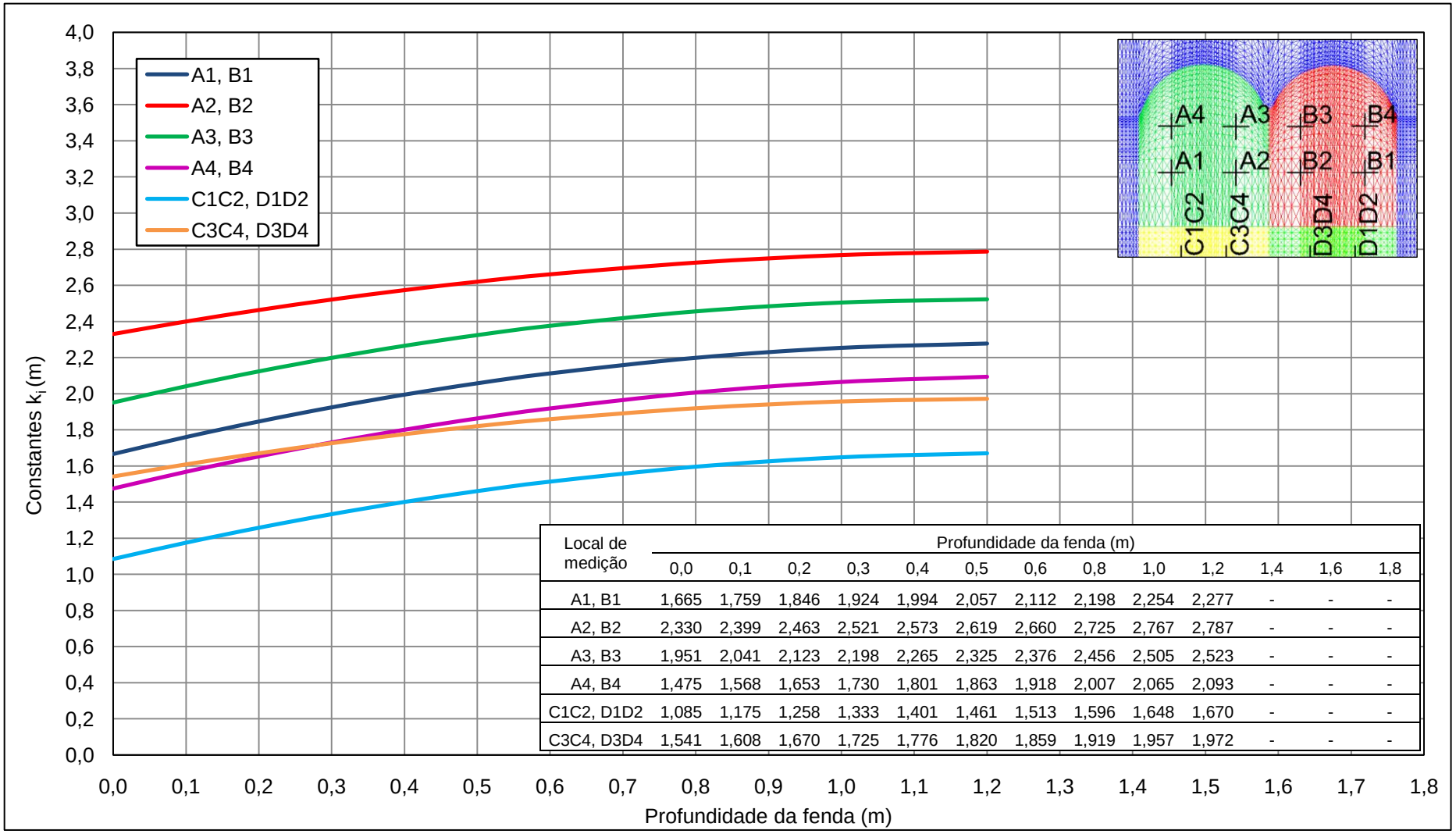

| Local de medição | Profundidade da fenda (m) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| A1, B1 | 1,630 | 1,716 | 1,795 | 1,868 | 1,934 | 1,994 | 2,048 | 2,136 | 2,198 | - | - | - | - |
| A2, B2 | 2,258 | 2,324 | 2,385 | 2,442 | 2,493 | 2,540 | 2,582 | 2,651 | 2,701 | - | - | - | - |
| A3, B3 | 1,943 | 2,034 | 2,118 | 2,194 | 2,263 | 2,324 | 2,378 | 2,462 | 2,516 | - | - | - | - |
| A4, B4 | 1,476 | 1,566 | 1,649 | 1,726 | 1,795 | 1,858 | 1,914 | 2,005 | 2,070 | - | - | - | - |
| C1C2, D1D2 | 0,915 | 0,977 | 1,036 | 1,092 | 1,144 | 1,193 | 1,239 | 1,319 | 1,386 | - | - | - | - |
| C3C4, D3D4 | 1,270 | 1,323 | 1,372 | 1,418 | 1,461 | 1,501 | 1,538 | 1,602 | 1,653 | - | - | - | - |

**B 5 – Evolução das constantes em cada defórmetro ou elongâmetro em função da profundidade da fenda de tracção para a combinação de dois macacos planos e dois rasgos sem inclinação do plano dos rasgos e com restrição dos deslocamentos no plano frontal**




| Local de medição | Profundidade da fenda (m) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| A1, B1 | 1,655 | 1,734 | 1,809 | 1,878 | 1,942 | 2,002 | 2,056 | 2,151 | 2,226 | 2,281 | 2,317 | 2,333 | - |
| A2, B2 | 2,285 | 2,345 | 2,402 | 2,455 | 2,505 | 2,551 | 2,593 | 2,667 | 2,726 | 2,771 | 2,802 | 2,818 | - |
| A3, B3 | 1,968 | 2,047 | 2,122 | 2,191 | 2,255 | 2,314 | 2,369 | 2,462 | 2,534 | 2,587 | 2,619 | 2,630 | - |
| A4, B4 | 1,495 | 1,577 | 1,654 | 1,726 | 1,792 | 1,854 | 1,911 | 2,009 | 2,087 | 2,145 | 2,183 | 2,201 | - |
| C1C2, D1D2 | 0,948 | 1,018 | 1,084 | 1,145 | 1,202 | 1,255 | 1,303 | 1,388 | 1,455 | 1,506 | 1,539 | 1,555 | - |
| C3C4, D3D4 | 1,332 | 1,386 | 1,437 | 1,485 | 1,530 | 1,571 | 1,609 | 1,676 | 1,729 | 1,770 | 1,798 | 1,813 | - |

**B 6 – Evolução das constantes em cada defórmetro ou elongâmetro em função da profundidade da fenda de tracção para a combinação de dois macacos planos e dois rasgos com inclinação de 10º do plano dos rasgos e com restrição dos deslocamentos no plano frontal**




| Local de medição | Profundidade da fenda (m) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| A1, B1 | 1,665 | 1,759 | 1,846 | 1,924 | 1,994 | 2,057 | 2,112 | 2,198 | 2,254 | 2,277 | - | - | - |
| A2, B2 | 2,330 | 2,399 | 2,463 | 2,521 | 2,573 | 2,619 | 2,660 | 2,725 | 2,767 | 2,787 | - | - | - |
| A3, B3 | 1,951 | 2,041 | 2,123 | 2,198 | 2,265 | 2,325 | 2,376 | 2,456 | 2,505 | 2,523 | - | - | - |
| A4, B4 | 1,475 | 1,568 | 1,653 | 1,730 | 1,801 | 1,863 | 1,918 | 2,007 | 2,065 | 2,093 | - | - | - |
| C1C2, D1D2 | 1,085 | 1,175 | 1,258 | 1,333 | 1,401 | 1,461 | 1,513 | 1,596 | 1,648 | 1,670 | - | - | - |
| C3C4, D3D4 | 1,541 | 1,608 | 1,670 | 1,725 | 1,776 | 1,820 | 1,859 | 1,919 | 1,957 | 1,972 | - | - | - |

**B 7 – Evolução das constantes em cada defórmetro ou elongâmetro em função da profundidade da fenda de tracção para a combinação de dois macacos planos e dois rasgos com inclinação de 20º do plano dos rasgos e com restrição dos deslocamentos no plano frontal**