U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO DA ROCHA COM MODELOS DE PARTÍCULAS

CARLOS MIGUEL JESUS ANDRADE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Eduardo Fortunato

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Resende

SETEMBRO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012*.

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

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

Aos meus Pais e Irmãos,

Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço.

Dave Weinbaum

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o resultado de meses de trabalho, significa o ultrapassar de vários obstáculos e não seria possível concretizá-la sem a ajuda preciosa de diversas pessoas que contribuíram de variadas maneiras, mas de forma decisiva para a sua realização. A todos os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço ao Professor Eduardo Fortunato, orientador científico deste trabalho, pelo empenho e dedicação, pela constante preocupação ao longo deste tempo, pela partilha de conhecimento e pelas reuniões que muito explicaram e muitos erros resolveram, levando este trabalho a bom porto.

Ao professor Ricardo Resende, agradeço igualmente pela constante disponibilidade, pela atenção e partilha de informação sobre um tema novo, pelo rigor nas correções, pelas muitas dúvidas que desfez e constante disponibilidade na análise de resultados.

Aos meus pais, José e Natália, gostaria de agradecer não só pela paciência, força e compreensão que demonstraram nesta fase, mas também por terem sempre acreditado em mim, pelas lições de vida, por todos os ensinamentos, conselhos e pelo amor que me transmitiram ao longo de toda a vida sendo meus eternos companheiros, educadores e amigos.

À minha restante família, agradeço o ânimo, pela confiança e pela força de sempre que de uma ou outra forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, feitos ao longo das diferentes fases da vida, agradeço por terem estado sempre presentes, mesmo que de forma indireta, pelo companheirismo, pela cumplicidade, pelas conversas e risos, pela ajuda, pela troca de opiniões e principalmente pela amizade que levo para a vida.

Por último ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela cedência do programa de cálculo automático utilizado nos estudos e sem o qual não teria sido possível grande parte das análises efetuadas neste trabalho.

RESUMO

As vibrações nos maciços rochosos podem ser geradas das mais diversas formas, sendo as mais importantes os terramotos, o desmonte de rochas e o tráfego ferroviário. Estas propagam-se pelos maciços através de ondas volumétricas e ondas de superfície. Assim, os problemas das vibrações nos maciços são cada vez mais importantes, por isso, devem ser simplificados e manipulados por meio de soluções analíticas, soluções empíricas ou simulações numéricas.

Modelos numéricos eficazes simulam a transmissão das ondas de tensão tornando possível a resolução de uma grande incerteza associada à propagação de ondas em maciços rochosos com geometrias e propriedades complexas. Para tal, a modelação micromecânica tem por objetivo prever o comportamento mecânico dos materiais através da simulação de mecanismos de rotura internos.

No presente trabalho, o principal objetivo consiste em avaliar a possibilidade da utilização do método de elementos discretos em maciços rochosos através da comparação de resultados da modelação numérica do comportamento estático e dinâmico. Este método permite obter as macro-propriedades do material representativo da rocha.

Neste contexto, numa primeira fase, foram modelados ensaios de compressão uniaxial, que permitiram retirar os valores do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson, e a calibração necessária destes, de modo a conduzir à aplicação que lhes é pedida. Estes ensaios são realizados numericamente e são concebidos para simular ensaios similares aos de laboratório.

As amostras de partículas ligadas que foram geradas neste estudo são inicialmente usadas em testes estáticos e posteriormente também em testes dinâmicos. Após a criação das amostras e calibração das suas propriedades estáticas microscópicas, o modelo está em condições de ser ensaiado através da emissão de ondas sísmicas. A simulação das ondas de compressão é conseguida imprimindo uma velocidade imposta com direção vertical, e com direção horizontal para simular as ondas de corte.

Efetuando a comparação entre resultados estáticos e resultados dinâmicos verifica-se a adequabilidade da modelação numérica em materiais rochosos, e as potencialidades destes métodos em termos computacionais.

PALAVRAS-CHAVE: ondas sísmicas, maciços rochosos, método dos elementos discretos, modelação numérica, propriedades estáticas e dinâmicas.

ABSTRACT

The vibrations in rock masses can be generated in several different ways, the most important being the earthquakes, rock blasting and railway circulation. These vibrations propagate in rock masses through volumetric waves and surface waves. Thus, the problems of vibrations in rocks are becoming increasingly important and therefore, should be simplified and manipulated using analytical and empirical solutions or numerical simulations.

Effective numerical models simulate the transmission of the stress wave, giving it a resolution of a large uncertainty associated with the wave propagation in rock masses with complex properties and geometries. So, the micromechanical modeling aims to predict the mechanical behavior of materials through the simulation of internal mechanisms of failure.

In this dissertation, the main objective is to evaluate the possibility of using the method of discrete elements in rock masses by comparing results of numerical modeling of static and dynamic behavior. This method allows us to obtain the macro properties of the material representation of the rock.

In this context, in a first stage, uniaxial compression tests were performed, allowing us to obtain the deformability modulus and Poisson's ratio values, and a subsequent calibration of these values was done, adapting them to the application which is required. These tests are performed numerically and are conceived to simulate tests similar to those of a laboratory.

The samples of bonded particles generated on this study are initially used in static tests and then in dynamic tests. After the creation of samples and the calibration of the static micro properties, the specimen is ready to be tested through the emission of seismic waves. The simulation of compression waves is achieved by impressing an imposed velocity with vertical direction and horizontal direction to simulate shear waves.

By making a comparison between static and dynamic results, the suitability of the numerical modeling of rock materials and the potential of these methods is verified in computational terms.

KEYWORDS: seismic waves, rocks masses, discrete element method, numerical modelling, static and dynamic properties.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO 1
1.2. ASPETOS GERAIS DA MODELAÇÃO DE ROCHAS 2
1.3. OBJETIVOS E ESTRUTURA DO TRABALHO 2

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE VIBRAÇÕES NOS TERRENOS 5
2.1. FONTES DE VIBRAÇÕES 5
2.2. TERRAMOTOS 5
2.3. DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS 6
2.3.1. EXPLOSIVOS UTILIZADOS NA DETONAÇÃO DE ROCHA 6
2.3.2. EXPLOSIVOS EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS E A CÉU ABERTO 7
2.3.3. SISTEMAS DE INICIAÇÃO DA DETONAÇÃO 7
2.3.4. GERAÇÃO DA ONDA DE TENSÃO 8
2.4. TRÁFEGO FERROVIÁRIO E RODOVIÁRIO 9
2.5. MEDIDAS DE ATENUAÇÃO 10
2.6. REGULAMENTAÇÃO ACERCA DAS VIBRAÇÕES 11
2.7. FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS VIBRAÇÕES 12

3. PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO TERRENO 15
3.1. INTRODUÇÃO 15
3.2. TIPOS DE ONDAS NOS TERRENOS 15
3.3. INTERAÇÃO DAS ONDAS COM JUNTAS DAS ROCHAS 19
3.4. MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS 20
3.4.1. MÉTODOS ESTATÍSTICOS 20
3.4.2. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE MACIÇOS ROCHOSOS 20
3.4.3. MÉTODOS NUMÉRICOS CONTÍNUOS E DESCONTÍNUOS 21

3.4.3.1. Método das Diferenças Finitas (MDF) ... 23
3.4.3.2. Método dos Elementos Finitos (MEF) ... 23
3.4.3.3. Método dos Elementos de Contorno (MEC) ... 23
3.4.3.4. Método dos Elementos Discretos (MED) ... 23
3.4.3.5. Método das Fraturas Discretas (MFD) ... 25
3.4.3.6. Métodos Híbridos ... 26

4. MODELAÇÃO MICROMÊCANICA ... 29
4.1. INTRODUÇÃO ... 29
4.2. EVOLUÇÃO DOS MODELOS MICROMECÂNICOS ... 29
4.3. SIMULAÇÃO DE ROCHAS COM MODELOS DE PARTÍCULAS ... 31
4.4. CICLO DE CÁLCULO ... 33
4.5. GESTÃO DE CONTACTOS ... 34
4.6. EQUAÇÕES DE MOVIMENTO ... 35

5. MODELAÇÃO ESTÁTICA DAS AMOSTRAS ... 39
5.1. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM MODELO PFC2D ... 39
5.2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS PFC2D ... 40
5.3. PROPRIEDADES MACROSCÓPICAS ... 42
5.4. RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES MICRO E MACROSCÓPICAS ... 44
5.4.1. ESPECIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS MICROSCÓPICOS ... 45
5.4.2. DEFORMABILIDADE ... 45
5.4.3. PROCEDIMENTO DE GERAÇÃO DAS AMOSTRAS ... 45
5.5. DEMONSTRAÇÃO DE EXEMPLOS DAS APLICAÇÕES DOS CÓDIGOS PFC2D ... 46
5.5.1. EXEMPLO GERAL DE UM ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL ... 47
5.5.2. EXEMPLO GERAL DE UM ENSAIO BIAXIAL ... 51
5.6. GERAÇÃO DOS MODELOS EM ESTUDO ... 55
5.6.1. GERAÇÃO DE MODELOS VARIANDO O RAIO MÍNIMO DAS PARTÍCULAS ... 61
5.6.2. GERAÇÃO DE MODELOS VARIANDO A RELAÇÃO ENTRE O RAIO MÁXIMO E MÍNIMO DAS PARTÍCULAS ... 63
5.7. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS ... 65
5.7.1. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO VARIANDO O RAIO MÍNIMO DAS PARTÍCULAS ... 72
5.7.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO VARIANDO A RELAÇÃO ENTRE O RAIO MÁXIMO E MÍNIMO DAS PARTÍCULAS ... 75

6. MODELAÇÃO DINÂMICA DAS AMOSTRAS 79

6.1. PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM MACIÇOS ROCHOSOS COM MODELOS DE PARTÍCULAS 79

6.1.1. PROPRIEDADES DINÂMICAS DE CONJUNTOS DE PARTÍCULAS ORGANIZADOS E NÃO ORGANIZADOS 79

6.2. GERAÇÃO E RECEÇÃO DE ONDAS P E S 80

6.2.1. ANÁLISE ESTÁTICA PARA ANÁLISE DINÂMICA 81

6.2.2. MEDIÇÃO DO TEMPO DE CHEGADA DAS ONDAS 83

6.3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS 88

6.3.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS 94

6.3.2. RESULTADOS DA MODELAÇÃO DINÂMICA PARA AS AMOSTRAS GERADAS COM A VARIAÇÃO DO R_{MIN} 98

6.3.3. RESULTADOS DA MODELAÇÃO DINÂMICA PARA AS AMOSTRAS GERADAS COM A VARIAÇÃO DA RELAÇÃO R_{MAX}/R_{MIN} 101

7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 105

7.1. CONCLUSÕES 105

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 106

BIBLIOGRAFIA 107

ANEXOS 111

ANEXO A: RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM PLANE STRESS (MEAS BASED) 113

ANEXO B: RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM PLANE STRAIN (WALL BASED) 117

ANEXO C: RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM PLANE STRAIN (MEAS BASED) 121

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Representação esquemática da geração de um terramoto e correspondentes ondas sísmicas....6

Fig. 2.2 - Detonador Eletrónico....8

Fig. 2.3 - Reação de detonação num furo (a), e correspondente pressão radial (b)....8

Fig. 2.4 - Partes principais do bogie de um comboio....9

Fig. 2.5 - Esquema das vibrações produzidas pelo contacto roda/carril....10

Fig. 2.6 - Sistema que permite avaliar os impactos da vibração....13

Fig. 3.1 - Modos de propagação das vibrações no terreno....16

Fig. 3.2 - Deformação do terreno pelo efeito de uma onda P....16

Fig. 3.3 - Deformação do terreno pelo efeito de uma onda S....17

Fig. 3.4 - Deformação do terreno pelo efeito de uma onda de Rayleigh....17

Fig. 3.5 - Deformação do terreno pelo efeito de uma onda Love....18

Fig. 3.6 - Transmissão e reflexão das ondas em descontinuidades, onda de compressão (esquerda), onda de corte vertical (centro) e onda de corte horizontal (direita)....19

Fig. 3.7 - Representação de uma massa de rocha fraturada, em (a) pelo MDF, em (b) pelo MEF, em (c) pelo MEC e em (d) pelo MED....22

Fig. 3.8 - Blocos 2D no Método de Elementos Distintos (a), discretização do bloco em triângulos de deformação constante (b)....24

Fig. 3.9 - Geometria do sistema de fraturas num modelo MFD....26

Fig. 3.10 - Modelo híbrido MED/MEF com a respetiva representação da interface....27

Fig. 3.11 - Modelo híbrido MED/MEC com a respetiva representação da interface....27

Fig. 4.1 - Representação das forças de contacto num conjunto de discos dimensionais no estado de tensão isotrópico....31

Fig. 4.2 - Contacto entre duas partículas....32

Fig. 4.3 - Ciclo de cálculo do PFC2D....34

Fig. 4.4 - Contatos entre sólidos 3D e partículas circulares 2D....35

Fig. 4.5 - Algoritmo do Método dos Elementos Discretos....36

Fig. 5.1 - Exemplo de um modelo PFC2D, com os tipos de partículas e suas utilizações....39

Fig. 5.2 - Representação das cinco fases de geração de um modelo de partículas 2D....42

Fig. 5.3 - Curvas empíricas para determinação do módulo de deformabilidade normalizado e do coeficiente de Poisson 43

Fig. 5.4 - Simulação de um ensaio de compressão uniaxial num modelo PFC2D 47

Fig. 5.5 - Microfissuras geradas na amostra no PFC2D, e respetiva curva tensão-deformação 49

Fig. 5.6 - Fissuras na amostra gerada pelo PFC2D, e respetiva curva tensão-deformação 49

Fig. 5.7 - Distribuição das forças de contacto no modelo PFC2D antes de alcançada a força de compressão uniaxial de pico na amostra, e respetiva curva tensão-deformação 50

Fig. 5.8 - Distribuição das forças de contacto no modelo PFC2D na fase de pós pico de carregamento da amostra e respetiva curva tensão-deformação 50

Fig. 5.9 - Configuração inicial das partículas para um ensaio biaxial no PFC2D (a), esquema de um ensaio biaxial (b) 52

Fig. 5.10 - Tensão de desvio vs extensão axial 54

Fig. 5.11 - Extensão volumétrica vs extensão axial 54

Fig. 5.12 - Configuração da amostra de granito e respetivas partículas geradas pelo PFC2D 57

Fig. 5.13 - Pormenorização da configuração e geometria das partículas na amostra gerada pelo PFC2D com porosidade aproximada de 16% 58

Fig. 5.14 - Pormenorização das ligações de contacto entre as partículas na amostra gerada pelo PFC2D 58

Fig. 5.15 – Distribuição das forças de contacto entre as partículas no início do teste. 59

Fig. 5.16 – Distribuição das forças de contacto entre as partículas no final do teste. 59

Fig. 5.17 – Representação da tensão axial versus a deformação axial da amostra 60

Fig. 5.18 – Representação da quantidade de energia versus a deformação axial na amostra 60

Fig. 5.19 - Configuração da geometria da amostra de granito gerada pelo PFC2D, e respetivo arranjo das partículas, resultante do ensaio para R_{min} = 2,0×10^{-4} m 62

Fig. 5.20 - Configuração da geometria da amostra de granito gerada pelo PFC2D, e respetivo arranjo das partículas, resultante do ensaio para o R_{min} = 6,0×10^{-4} m 62

Fig. 5.21 - Configuração da geometria da amostra de granito gerada pelo PFC2D, e respetivo arranjo das partículas, resultante do teste com R_{max}/R_{min} = 1,0 64

Fig. 5.22 - Configuração da geometria da amostra de granito gerada pelo PFC2D, e respetivo arranjo das partículas, resultante do teste com R_{max}/R_{min} = 2,5 64

Fig. 5.23 - Variação do módulo de deformabilidade (E) com o módulo de contacto das partículas (E_c), para os vários valores de K_n/K_s usados 68

Fig. 5.24 - Variação do módulo de deformabilidade (E) com a relação entre a rigidez das partículas (K_n/K_s), para os vários valores de E_c usados 68

Fig. 5.25 - Variação do coeficiente de Poisson (v) com o módulo de contacto das partículas (E_c), para os vários valores de K_n/K_s usados 71

Fig. 5.26 - Variação do coeficiente de Poisson (v) com a razão da rigidez das partículas (K_n/K_s), para os vários valores de E_c usados 71

Fig. 5.27 - Variação da relação entre a rigidez das partículas (K_n/K_s) com o coeficiente de Poisson (v) para um granito 72

Fig. 5.28 - Variação do módulo de deformabilidade (E) com o raio mínimo das partículas (R_{min}), para ambas as medições efetuadas em estado plano de tensão (*plane stress*) e estado plano de deformação (*plane strain*) 73

Fig. 5.29 - Variação do coeficiente de Poisson (v) com o raio mínimo das partículas (R_{min}), para as medições efetuadas em estado plano de tensão (*plane stress*) e estado plano de deformação (*plane strain*) 74

Fig. 5.30 - Variação do módulo de deformabilidade (E) com a relação entre o raio máximo e mínimo das partículas (R_{max}/R_{min}), para as medições efetuadas em estado plano de tensão (*plane stress*) e estado plano de deformação (*plane strain*) 76

Fig. 5.31 - Variação do coeficiente de Poisson (v) com a variação da relação entre o raio máximo e mínimo das partículas (R_{max}/R_{min}), para as medições efetuadas em estado plano de tensão (*plane stress*) e estado plano de deformação (*plane strain*) 77

Fig. 6.1 - Arranjo retangular de partículas (esquerda), arranjo hexagonal de partículas (direita) 80

Fig. 6.2 - Campos de velocidades aleatórios 82

Fig. 6.3 - Média das forças desequilibradas do modelo em equilíbrio 82

Fig. 6.4 - Vetores das velocidades no fim do terceiro ciclo de cálculo 83

Fig. 6.5 - Esquema geral de uma amostra com indicação das secções e respetiva numeração das partículas para medição das ondas P (esquerda) e ondas S (direita) 84

Fig. 6.6 - Configuração de uma das amostras ensaiada e respetivas partículas onde foram medidos os tempos de chegada das ondas nas várias secções 85

Fig. 6.7 - Gráfico de propagação e respetiva chegada das ondas P às várias partículas com posições definidas, na secção S3 da amostra 86

Fig. 6.8 - Gráfico de propagação e respetiva chegada das ondas S às várias partículas com posições definidas, na secção S3 da amostra 87

Fig. 6.9 - Pormenorização da partícula 135 ou 235, e respetivas ligações de contacto (esquerda) e forças de contacto entre partículas (direita) 88

Fig. 6.10 - Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 1,0 89

Fig. 6.11 - Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 1,66 89

Fig. 6.12 - Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 2,0 90

Fig. 6.13 - Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 2,5 90

Fig. 6.14 - Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 3,0 91

Fig. 6.15 - Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 3,5 91

Fig. 6.16 - Velocidades das ondas P e S que foram obtidas para as amostras que inicialmente formam geradas com os vários valores de E_c 93

Fig. 6.17 - Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 35 GPa 96

Fig. 6.18 - Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 40 GPa 96

Fig. 6.19 - Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 45 GPa 97

Fig. 6.20 - Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 50 GPa 97

Fig. 6.21 - Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 60 GPa 98

Fig. 6.22 - Gráfico de propagação das ondas na amostra gerada com R_{min} = 2,5×10^{-4} m 98

Fig. 6.23 - Velocidade das ondas P e S obtidas para as amostras geradas variando o raio mínimo das partículas (R_{min}) 99

Fig. 6.24 - Gráficos do módulo de deformabilidade (esquerda) e do coeficiente de Poisson (direita) para o caso estático e caso dinâmico com os vários valores de R_{min} 100

Fig. 6.25 - Gráfico de propagação das ondas na amostra gerada com R_{max}/R_{min} = 2,5 101

Fig. 6.26 - Velocidade das ondas P e S obtidas para as amostras geradas por variação da relação entre o raio máximo e mínimo das partículas (R_{max}/R_{min}) 102

Fig. 6.27 - Gráficos do módulo de deformabilidade (esquerda) e do coeficiente de Poisson (direita) para o caso estático e caso dinâmico com os vários valores de R_{min} 103

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Origem e evolução do MED 30

Tabela 5.1 - Parâmetros que controlam o processo de criação da amostra no PFC2D 46

Tabela 5.2 - Parâmetros microscópicos que definem as ligações de contacto no material da amostra no PFC2D 46

Tabela 5.3 - Parâmetros do modelo PFC2D correspondentes às propriedades calibradas da rocha 48

Tabela 5.4 - Propriedades calibradas pelo PFC2D e comparação com dados obtidos de ensaios de laboratório 48

Tabela 5.5 - Propriedades utilizadas no exemplo do ensaio biaxial 51

Tabela 5.6 - Parâmetros e respetivos valores usados para a geração das amostras no PFC2D 56

Tabela 5.7 - Parâmetros usados para geração de amostras com o PFC2D, com variação do raio mínimo 61

Tabela 5.8 - Parâmetros usados para geração de amostras com o PFC2D, variando a relação entre o raio máximo e mínimo das partículas 63

Tabela 5.9 - Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao módulo de deformabilidade (*E*). 66

Tabela 5.10 - Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao coeficiente de Poisson (*v*) 69

Tabela 5.11 - Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao módulo de deformabilidade (*E*). 72

Tabela 5.12 - Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao coeficiente de Poisson (*v*) 74

Tabela 5.13 - Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao módulo de deformabilidade (*E*). 75

Tabela 5.14 - Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao coeficiente de Poisson (*v*) 76

Tabela 6.1 - Valores das velocidades das ondas P e S na secção S3, depois de serem emitidas as ondas para as várias amostras 92

Tabela 6.2 - Resultados do módulo de deformabilidade (*E*) e do coeficiente de Poisson (*v*) para o cálculo estático e cálculo dinâmico, para as várias amostras 94

Tabela 6.3 - Valores das velocidades das ondas P e S na secção S3, para as amostras geradas com os vários valores de R_{min} 99

Tabela 6.4 - Resultados do módulo de deformabilidade (*E*) e do coeficiente de Poisson (*v*) para o cálculo estático e cálculo dinâmico, das amostras geradas com os vários valores usados de R_{min} ... 100

Tabela 6.5 - Valores das velocidades das ondas P e S na secção S3, para as amostras geradas com os vários valores de R_{max}/R_{min}. 102

Tabela 6.6 - Resultados do módulo de deformabilidade (*E*) e do coeficiente de Poisson (*v*) para o cálculo estático e cálculo dinâmico, nas amostras geradas para os valores de R_{max}/R_{min} usados.... 103

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ALFABETO LATINO

E – Módulo de deformabilidade

Ec – Módulo de Young de cada contacto partícula-partícula

F – Força de contacto

G – Módulo de distorção

h – Altura da amostra

i – Direção das coordenadas

K – Módulo de compressibilidade

K_n – Rigidez normal da partícula

K_s – Rigidez de corte da partícula

K_w – Rigidez das paredes

L – Comprimento atual da amostra

L_0 – Comprimento original da amostra

m – massa da partícula

Nf – Número mínimo de contactos

R_{max} – Raio máximo das partículas

R_{min} – Raio mínimo das partículas

t – Tempo de chegada da onda

ü – Aceleração

V – Velocidade da onda

V_P – Velocidade das ondas de compressão

V_S – Velocidade das ondas de corte

w – Largura da amostra

ALFABETO GREGO

β – Rigidez normal da parede

$\Delta\varepsilon_a$ – Variação da extensão axial

$\Delta\varepsilon_v$ – Variação da extensão volumétrica

$\Delta\varepsilon_x$ – Variação da extensão na direção de x

$\Delta\sigma_a$ – Variação da tensão axial

$\Delta\sigma_d$ – Variação da tensão de desvio

ε – Deformação da amostra

μ – Coeficiente de atrito das partículas

ν - Coeficiente de Poisson

ρ – Densidade das partículas

σ_0 – Tensão isotrópica

σ_c – Resistência normal dos contactos

τ_c – Resistência de corte dos contactos

SIGLAS E ACRÓNIMOS

ADD – Análise da Deformação Descontínua

DEC – Discrete Element Code

MDF – Método das Diferenças Finitas

MEC – Método dos Elementos de Contorno

MED – Método dos Elementos Discretos

MEF – Método dos Elementos Finitos

MFD – Método das Fraturas Discretas

P-MED – Método de Elementos Discretos de Partículas

PFC – Particle Flow Code

PFC2D – Particle Flow Code 2 Dimensions

PFC3D – Particle Flow Code 3 Dimensions

UDEC – Universal Distinct Element Code

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Os Humanos estão permanentemente expostos a vibrações, no trabalho, nos transportes e mesmo em casa, que podem ou não perturbar o seu bem-estar e a sua própria saúde, tornando assim as vibrações indesejáveis e perigosas. Os problemas das vibrações nos terrenos são cada vez mais importantes, por várias razões. Existe uma crescente preocupação dos cidadãos relativamente aos problemas ambientais e inclusivamente ao incómodo que a vibração pode provocar na vizinhança de uma explosão no terreno.

Cargas mecânicas aplicadas a corpos, sejam elas transitórias ou permanentes no tempo, originam tensões ou deformações impostas, que demoram um intervalo finito de tempo para se propagarem desde o seu local de origem. Quando uma carga permanente é aplicada a um corpo, ele entra em desequilíbrio durante um curto espaço de tempo. Frequentemente este fenómeno dinâmico não deixa nenhum efeito permanente e o intervalo de tempo durante o qual a estrutura fica fora de equilíbrio é muito pequeno. Se a estrutura se comporta elasticamente e a carga não é permanente, os estados de equilíbrio inicial e final são equivalentes.

Existem diferentes tipos de ondas: ondas de superfície e ondas volumétricas, havendo características comuns entre elas. Em primeiro lugar todas as ondas carregam energia que é transmitida ao meio por uma perturbação externa. Em segundo lugar a propagação da energia é feita sem deslocamento permanente das partículas, uma vez que a passagem da onda faz com que elas se movam em torno de uma posição de equilíbrio. Em terceiro lugar observando uma onda como um portador de informação, o meio pode ser dividido em duas regiões: uma região que está ciente da perturbação e outra que não está. A velocidade de avanço da frente de onda depende da rigidez do material e da densidade, que definem a capacidade do meio para armazenar e transferir energia potencial e cinética [1].

Em sólidos a passagem de ondas faz com que a deformação do meio esteja associada à variação de tensão, e portanto as ondas em sólidos são também chamadas ondas de tensão. Na Mecânica das Rochas os problemas reais raramente têm configurações geométricas simples, pois os maciços rochosos raramente são contínuos. Como consequência a propagação de ondas em maciços é especialmente complicada, envolvendo fenómenos como a dispersão da velocidade, a atenuação da frequência devido ao material rochoso, a reflexão de ondas, e a refração em fraturas.

Os problemas da vida real devem por isso ser simplificados, e de seguida, manipulados por meio de soluções analíticas, estratégias empíricas ou simulações numéricas.

1.2. ASPETOS GERAIS DA MODELAÇÃO DE ROCHAS

Um modelo consiste num conjunto de hipóteses, que correspondem a idealizações relativamente às ações e à estrutura (incluindo comportamento do maciço). Através destas hipóteses, o modelo fornece a resposta da estrutura, expressa em termos de deslocamentos, deformações e tensões, às ações que sobre ela atuam [2].

A modelação dos maciços rochosos, até há poucos anos atrás, estava dependente de regras empíricas, cálculos simplificados, da experiência acumulada e de modelos físicos geomecânicos, que têm uma preparação demorada e dispendiosa e são de utilização pouco flexível. Com o aparecimento e desenvolvimento dos métodos numéricos, este cenário alterou-se.

Os métodos mais utilizados na elaboração de modelos numéricos de meios descontínuos são o Método dos Elementos Finitos, e o Método dos Elementos Discretos. O primeiro foi inicialmente concebido para meios contínuos, tendo sido desenvolvido um elemento de junta permitindo a consideração de descontinuidades.

O Método de Elementos Discretos, objeto de estudo neste trabalho, é baseado nas leis da dinâmica de corpos tridimensionais, mostra-se particularmente eficiente para tratar problemas de sistemas constituídos por corpos distintos. A utilização de modelos discretos em detrimento de modelos contínuos permite uma melhor aproximação da realidade. O método de elementos discretos foi desenvolvido por Cundall, em 1971, para aplicação na Mecânica das Rochas. É permitido neste método qualquer tipo de movimento e deslocamento dos blocos já que equações de movimento são integradas e os contactos entre os blocos são resolvidos no decorrer dos cálculos. Os métodos de elementos de partículas contam com um grande número de partículas microscópicas circulares ou esféricas, cuja interação é mais fácil de resolver, e através de um elevado número de interações o comportamento macroscópico pode ser simulado.

Os modelos microscópicos podem ajudar em diversas aplicações: mecânica dos solos, análise estrutural, mecânica dos fluídos, análise de materiais granulares, fraturas de betão e rocha, estabilidade de taludes, entre muitas outras [3].

1.3. OBJETIVOS E ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo principal a investigação das propriedades elásticas estáticas e dinâmicas da rocha recorrendo à modelação numérica por elementos discretos de partículas, comparando os resultados numéricos estáticos com os resultados numéricos dinâmicos. Para tal, será necessário começar por obter os valores das propriedades dos materiais através da calibração dos modelos.

A modelação será feita usando o programa Particle Flow Code 2D (PFC 2D) versão 3.10 da Itasca (http://www.itascacg.com).

O presente trabalho está orientado para dar resposta aos objetivos definidos e foi organizado da seguinte forma:

- No **capítulo 1**, *Introdução*, faz-se um enquadramento ao tema e uma breve abordagem dos aspetos gerais da modelação em rochas. São apresentados, também neste capítulo, os objetivos desta dissertação e a estrutura do documento escrito.

- No **capítulo 2**, *Considerações sobre Vibrações nos Terrenos*, descreve-se a problemática das vibrações no terreno, analisando as suas fontes, dando especial ênfase ao desmonte com explosivos e ao tráfego ferroviário e rodoviário. Faz-se também referência aos regulamentos e principais medidas de atenuação e quais as ferramentas disponíveis na caracterização dos mesmos.

- No **capítulo 3**, *Propagação de Ondas no Terreno*, referem-se os tipos de ondas que se propagam nos maciços e descreve-se com mais detalhe as ferramentas disponíveis, em especial os métodos numéricos contínuos e descontínuos. É feita também referência às abordagens estatísticas geralmente utilizadas.

- No **capítulo 4**, *Modelação Micromecânica*, são apresentados os modelos existentes e a sua evolução. É explicado o método dos elementos discretos, modelo utilizado neste trabalho, e faz-se uma abordagem ao tipo de partículas utilizadas na modelação numérica dos ensaios.

- No **capítulo 5**, *Modelação Estática das Amostras*, faz-se inicialmente uma breve descrição sobre os principais componentes dos modelos, mostrando também a relação entre as propriedades micro e macroscópicas. Uma explicação sobre a construção e calibração dos modelos numéricos também é feita, demonstrando-se exemplos das aplicações dos códigos PFC2D. Por fim, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos da calibração.

- No **capítulo 6**, *Modelação Dinâmica das Amostras*, são explicadas as propriedades dinâmicas e os mecanismos de geração e receção de ondas P e S nos modelos de partículas, descreve-se a passagem do cálculo estático para o cálculo dinâmico nas amostras. Efetua-se também a apresentação e comparação entre os resultados numéricos estáticos e dinâmicos obtidos.

- No **capítulo 7**, *Conclusões e Desenvolvimentos Futuros*, faz-se um resumo das principais conclusões tendo por base as comparações que foram sendo efetuadas ao longo do trabalho e tecem-se algumas considerações sobre prosseguimentos futuros que podem ser efetuados com base no que foi feito nesta dissertação para um melhor conhecimento e desenvolvimento deste tema.

No final do documento encontram-se anexos com informação relevante obtida durante o estudo.

2

CONSIDERAÇÕES SOBRE VIBRAÇÕES NOS TERRENOS

2.1. FONTES DE VIBRAÇÕES

As ondas de tensão no solo são geradas das mais diversas formas, sendo as mais importantes fontes: os terramotos, o desmonte de rochas, a maquinaria industrial ou de construção e o tráfego ferroviário e rodoviário. Menos frequente, pelo menos na maioria dos lugares da Terra, são a sismicidade induzida das minas, explosões militares ou de tipo nuclear e deslizamentos de encostas. Algumas das fontes de vibração nos maciços rochosos mais relevantes na realidade Portuguesa, serão abordadas de seguida, com o detalhe necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

2.2. TERRAMOTOS

As vibrações que são produzidas pelos terramotos diferem das provenientes das explosões fundamentalmente na sua duração, frequência e intensidade. Em geral uma explosão civil liberta uma pequena quantidade de energia relativamente perto dos alvos, já no que diz respeito ao epicentro de um terramoto como mostra a Figura 2.1 este pode ser de dezenas a centenas de quilómetros de distância do hipocentro, sendo que a energia libertada num terramoto é de uma escala completamente diferente da libertada por uma explosão no desmonte de rochas.

Uma vez que os fenómenos subjacentes quer as vibrações sejam produzidas por explosões ou terramotos são os mesmos, algumas das ferramentas desenvolvidas no âmbito de uma destas disciplinas pode ser adaptada para a outra [1].

Muitas vezes o risco sísmico é ignorado nos projetos de estruturas subterrâneas mesmo em áreas com atividade sísmica conhecida, considerando-se que a resposta destas estruturas é satisfatória devido ao facto de que estas seguem os movimentos do solo com efeitos de inércia muito pequenos irradiando toda a energia recebida para o meio circundante, ao contrário dos edifícios que têm uma menor área de contacto com o terreno. Outra das causas de não se considerar a ação sísmica nas estruturas subterrâneas é o facto de existir ainda uma insuficiente compreensão do comportamento do terreno sob ações dinâmicas e as ferramentas para avaliar esses comportamentos ainda não estão amplamente disseminadas.

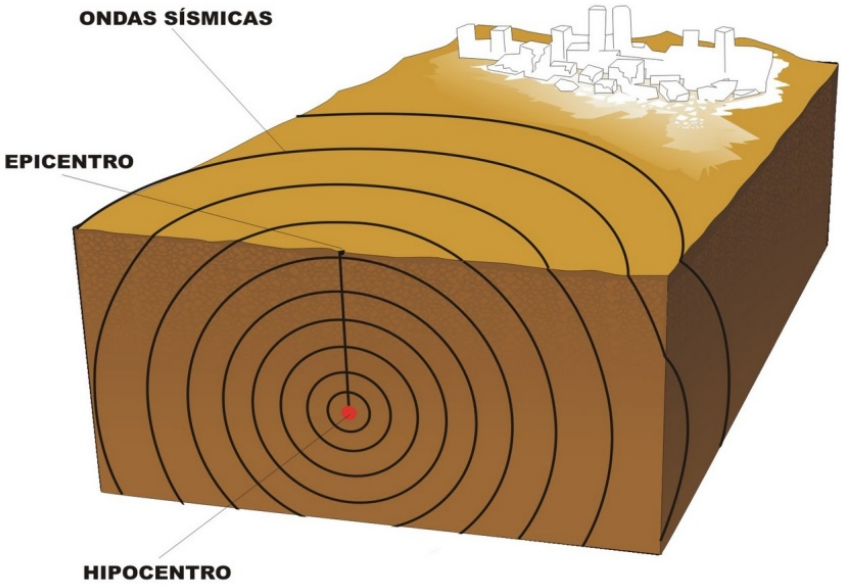


Fig. 2.1 – Representação esquemática da geração de um terramoto e correspondentes ondas sísmicas [4]

2.3. DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS

2.3.1. EXPLOSIVOS UTILIZADOS NA DETONAÇÃO DE ROCHA

Entende-se por substância explosiva, um composto ou mistura de compostos, que quando iniciados por calor, impacto, fricção ou choque, têm capacidade de entrar numa rápida decomposição, libertando enormes quantidades de calor e gás [5].

Os explosivos estão ligados aos melhores e piores momentos da humanidade. A sua história não é apenas marcada pelo seu uso em atividades militares, mas também em menor escala, por grandes acidentes na sua fabricação e uso. As primeiras explosões estão associadas à descoberta da pólvora atribuída aos chineses, que se diz terem-na usado sob a forma de fogo-de-artifício, mas foi em 1242 que o monge e cientista Roger Bacon publicou a sua fórmula. Desde a Idade Média até à época moderna a pólvora foi usada na elaboração de bombas e como propelente em munições.

Durante a construção das linhas ferroviárias no Reino Unido e logo depois na América do Norte no século XIX, foram usadas toneladas de pólvora, com o consumo atingindo o seu pico e depois declinando rapidamente no início do século XX, após a primeira guerra mundial. Altura em que foi sintetizada por Ascanio Sobrero a nitroglicerina, que era um explosivo extremamente instável (pequenas perturbações podem provocar a sua detonação) com transporte e manuseamento bastante perigosos. Nas décadas seguintes deu-se a descoberta acidental da dinamite, por Alfred Nobel. Esta não é mais do que uma ocorrência natural resultante de rochas siliciosas sedimentares que facilmente são desintegradas em pó fino sendo depois embebidas em nitroglicerina que determinaram na época a indústria dos explosivos.

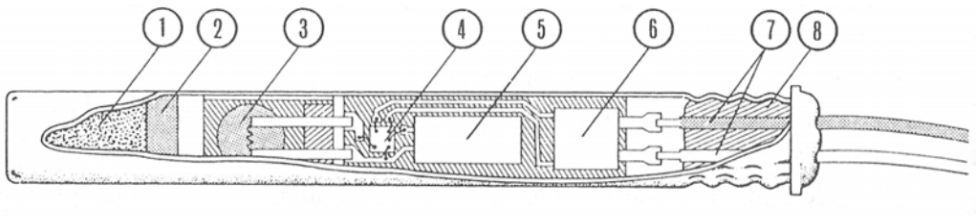
A partir dos meados do século passado, novos explosivos foram desenvolvidos. As emulsões (mistura de nitrato de amónio e óleo combustível) tornaram-se populares face a outras substâncias explosivas, devido a várias vantagens tais como, a dificuldade de se inflamarem acidentalmente, baixo custo, boa resistência à água, e energia específica elevada que se traduz numa maior velocidade de detonação e melhor fragmentação do maciço.

2.3.2. Explosivos em Escavações Subterrâneas e a Céu Aberto

Os diagramas de fogo são concebidos para os maciços rochosos mais resistentes, ou seja, aqueles que não permitem a escavação mecânica em tempo útil e a um custo aceitável, tornando-se assim recomendável a utilização de substâncias explosivas [6]. A principal diferença nos dois tipos de escavações, a céu aberto e subterrâneas, consiste no número de faces livres disponíveis para efetuar o desmonte. Os desmontes superficiais são mais fáceis pela existência de duas a quatro faces livres, enquanto nas escavações subterrâneas existe normalmente uma única face livre. Na escolha da frente a ser trabalhada deverão ser tidos em conta aspetos como o tipo de rocha a perfurar, potencial de rebentamento, proximidade de estruturas e linhas de alta tensão e existência ou não do nível freático, entre outros. Em escavações a céu aberto, as vibrações transmitidas aos terrenos adjacentes, o ruído, a projeção de blocos de rocha e a libertação de poeiras destacam-se como sendo os principais efeitos. Nas escavações subterrâneas, as vibrações assumem maior importância, pois têm maior amplitude e geralmente estão a menores distâncias das estruturas construídas.

2.3.3. Sistemas de Iniciação da Detonação

O sistema de iniciação influencia fortemente a produção de vibração, determinando como e quando cada carga vai detonar. A sensibilidade à detonação dos explosivos varia amplamente e os métodos de iniciação evoluíram para aumentar a sua fiabilidade. Estudos realizados por vários autores indicam que, retardos de precisão permitem uma melhor fragmentação da rocha e menores níveis de vibração podem ser alcançados, pois permitem que as frequências das vibrações sejam manipuladas. Os detonadores dividem-se em pirotécnicos e elétricos, e diferem principalmente no modo de iniciação. Os primeiros detonadores pirotécnicos não eram mais do que um recipiente de pequenas dimensões com pólvora ou outro tipo de explosivo colocado no seu interior. Ainda hoje estão em uso, apesar de mais sofisticados, sendo o seu princípio o mesmo, são iniciados por uma chama conduzida através de um rastilho. Os detonadores elétricos são mais precisos que os pirotécnicos, pois são iniciados por uma corrente elétrica. No seu interior têm circuitos eletrónicos que para além de poderem ser produzidos em massa a custos reduzidos, apresentam insensibilidade ao choque e ao calor para além de conterem menores quantidades de elementos perigosos. A tendência será recorrer cada vez mais ao uso de detonadores eletrónicos, pois estes, devido à sua elevada precisão, permitem um excelente controlo do processo de fragmentação da rocha, minimizando assim a propagação de vibrações, bem como a projeção de blocos e os danos provocados ao maciço remanescente [7]. A Figura 2.2 mostra o diagrama esquemático das partes internas de um detonador eletrónico.



1 Carga Base
2 Explosivo Primário
3 Fio Ponte
4 Chip de Circuito Integrado
5 Condensador
6 Circuito de Proteção de Sobretensão
7 Fios de Ligação
8 Tomada de Selagem

Fig. 2.2 – Detonador Eletrónico [adaptado de [1]]

2.3.4. Geração da Onda de Tensão

O conhecimento dos processos que ocorrem dentro e ao redor da detonação são essenciais para compreender a fraturação da rocha e como se irradiam as ondas de tensão. Numa explosão ideal toda a energia seria gasta quebrando a rocha e nenhuma vibração seria produzida. As vibrações são um efeito colateral indesejado da fragmentação. A detonação de um explosivo é uma reação iniciada por meio de calor, de choque ou fricção, ou uma combinação desses fatores. Os produtos de uma detonação são uma onda de choque de alta intensidade, seguida por uma mistura de gases sob alta pressão e temperatura.

Num furo uma explosão pode ser dividida em duas fases. Na primeira fase, a reação da detonação propaga-se através da geração de uma violenta onda de choque que se desloca para o meio circundante. A segunda fase consiste no aumento do volume dos gases produzidos, que avançam logo depois da reação de detonação, exercendo pressão nas paredes do furo. Esta pressão é menor do que a onda de choque, mas mais duradoura. A Figura 2.3 apresenta esquematicamente o mecanismo descrito.

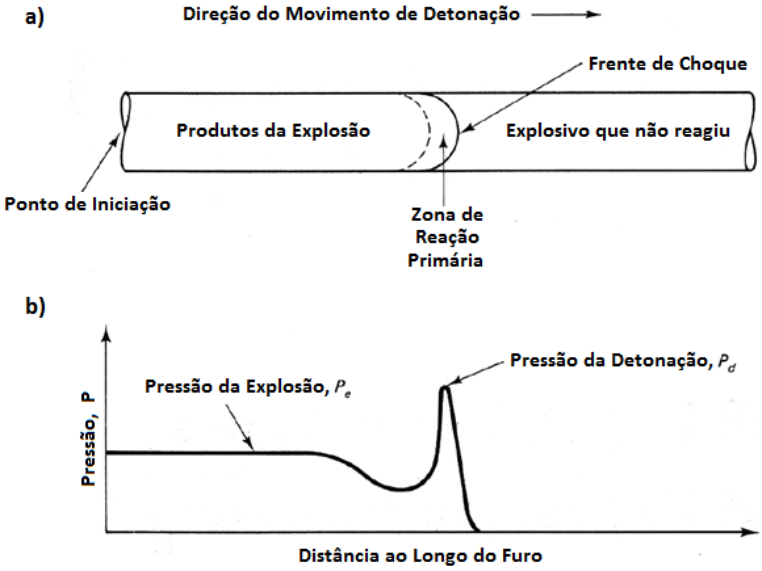


Fig. 2.3 – Reação de detonação num furo (a) e correspondente pressão radial (b) [adaptado de [1]]

O desenvolvimento do processo de explosão depende principalmente das propriedades da forma e diâmetro dos furos, das características mecânicas e estado de tensão da rocha. A expansão dos gases produzidos pela explosão dura mais tempo do que a detonação e exerce pressão nas paredes da câmara onde a explosão ocorre. No anel imediatamente em torno do furo, o material é submetido a altas pressões provocadas pela onda de choque inicial e é projetado. Após a explosão o nível de tensão diminui, deixando de exceder a resistência da rocha. A partir daí a onda de choque propaga-se elasticamente, voltando as partículas à sua posição inicial após a passagem da onda.

2.4. TRÁFEGO FERROVIÁRIO E RODOVIÁRIO

As vibrações aéreas e no solo estão entre os mais importantes impactos ambientais da exploração do transporte ferroviário, estando também presentes, mas em menor escala nas estradas. As características da vibração gerada pela circulação ferroviária depende do tipo de veículo, velocidade de circulação e do apoio da infraestrutura de transmissão de cargas. O tráfego rodoviário também gera vibração no terreno, mas devido às características da estrada e dos veículos, o impacto é normalmente muito menor.

A circulação das carruagens sobre os carris origina solicitações estáticas e dinâmicas que se traduzem em forças verticais, horizontais e de torção. As forças verticais são perpendiculares aos carris. Devido à flexão que ocorre nestes, estas forças são descendentes na zona carregada, mas ascendentes nas zonas circundantes. As forças longitudinais, paralelas aos carris, têm origem nas acelerações e travagens dos veículos, expansões e contrações térmicas dos carris e flexão dos mesmos aquando da passagem das composições. As forças laterais são paralelas ao eixo longitudinal das travessas e têm origem na componente lateral da força de atrito entre a roda e o carril devida às irregularidades da via ou aos fenómenos de dinâmica ferroviária como a oscilação dos bogies [8].

O bogie encontra-se ligado ao corpo do comboio por meio de suspensões secundárias. Está também ligado por suspensões primárias às rodas transferindo assim o peso aos carris (Figura 2.4).

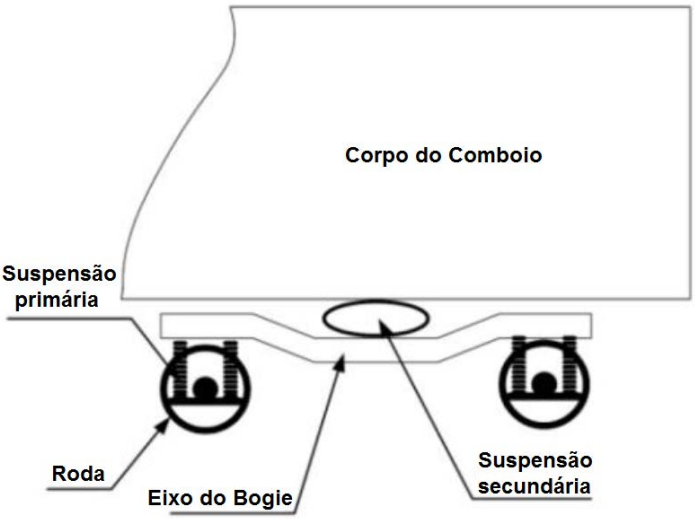


Fig. 2.4 – Partes principais do bogie de um comboio [adaptado de [9]]

As vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário são influenciadas por vários fatores, entre os quais o atrito entre as rodas e o carril, a não continuidade dos apoios da linha (travessas), a rigidez das travessas, a solução estrutural da linha férrea e o tipo de solo existente [10]. Todo o mecanismo que provoca a vibração relativa ao contacto roda/carril está representado na Figura 2.5.

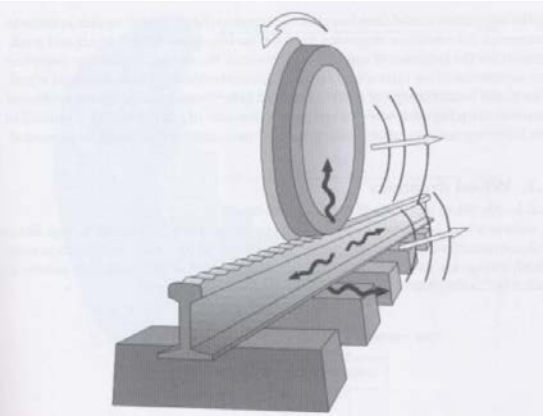


Fig. 2.5 – Esquema das vibrações produzidas pelo contacto roda/carril [9]

As estruturas de apoio entre o carril e a fundação são tradicionalmente compostas por travessas de madeira ou de betão pré esforçado que repousam sobre uma cama de balastro (brita). Sob o balastro, uma ou mais camadas de solos selecionados ou agregados, que no conjunto se designa por sub-balastro, degrada ainda mais a carga antes de esta atingir a fundação. A vibração gerada no contacto roda-carril é transmitida para a estrutura de suporte e a partir daí para o solo, de modo que o sistema como um todo tem de ser considerado no cálculo dos níveis de vibração. No caso da circulação subterrânea, a geometria do túnel e os materiais devem ser tidos em conta.

A circulação de alta velocidade traz novos problemas, pois, quando a velocidade do comboio se torna maior do que a velocidade de propagação das ondas de tensão, podem ocorrer fenómenos de amplificação dinâmica. Este não é, contudo, um problema em maciços rochosos, mas principalmente em solos moles.

2.5. MEDIDAS DE ATENUAÇÃO

Quando uma onda se desloca através de um material, as partículas movem-se em torno de um ponto de equilíbrio, para a ele retornar. Durante este ciclo, a energia é perdida na superação de vários tipos de resistência de atrito entre os grãos, tais como, aquecimento, abertura e fechamento de fissuras, e esguichar de líquidos. Os seguintes mecanismos são alguns dos responsáveis pela atenuação das ondas sísmicas em rochas e em maciços rochosos [11]:

- Inelasticidade da matriz rochosa;
- Dissipação de atrito devido a movimentos relativos nos contornos dos grãos e em superfícies de fissuras;
- Circulação de água e ar na rede de vazios;
- Efeitos geométricos devido a pequenos poros, grandes irregularidades, descontinuidades, falhas e limites da rocha.

Desde o ponto de origem até ao ponto recetor as ondas atenuam-se principalmente devido a dois mecanismos: o geométrico e o de dissipação. As ondas com frequências mais altas atenuam-se mais rapidamente. Em presença de materiais mais coerentes e rijos, ondas mais rápidas propagam-se até distâncias maiores. As ondas não se atenuam sempre com a distância. Em meios que sejam estratificados e onde a sua geometria favoreça, a onda pode concentrar-se ou então sobrepor-se a outras ondas refletidas, medindo-se assim valores maiores de vibração em pontos mais afastados.

Numa explosão, a distância e a energia libertada permanecem como os dois parâmetros mais importantes na previsão dos efeitos de vibração nas leis de atenuação. Estas leis também incluem a influência de outros fatores nos parâmetros das suas equações, que variam de local para local, ou até mesmo no próprio sítio, podendo mudar o processo de fragmentação das rochas devido à litologia, aos vazios e fraturas na rocha, às variações na aplicação de explosivos e na detonação.

2.6. Regulamentação acerca das Vibrações

O aumento da consciência pública e dos seus direitos levaram as agências governamentais a abordarem as consequências ambientais das vibrações sejam elas oriundas de explosões ou do tráfego ferroviário, introduzindo regulamentos que estabelecem limites para o ruído, poeiras e vibrações. As vibrações podem chegar às pessoas diretamente a partir do solo ou por meio das estruturas, sendo que nestas as bandas de frequência são transmitidas, ampliadas ou reduzidas. A resposta das estruturas às vibrações depende do tipo de material de construção, da interação com a fundação, revestimento das paredes e estado de colapso da estrutura. Danos devidos às vibrações podem ser impercetíveis, em situações típicas, limitam-se ao aparecimento ou agravamento de fissuras ou fendas em paredes e tetos.

De seguida apresentam-se alguns dos regulamentos mais relevantes, sendo eles, o regulamento ISO, regulamento Alemão, regulamento Britânico, regulamento Português e regulamento Suíço. Nestes regulamentos o principal parâmetro de controlo abordado é a velocidade das partículas, havendo um consenso generalizado sobre como este parâmetro se correlaciona diretamente com a tensão e a deformação. Por outro lado, já a definição de velocidade de pico da partícula não é unânime, sendo definida como o valor máximo do vetor soma das três direções da velocidade ou em determinados regulamentos apenas a componente vertical. Alguns regulamentos definem também limites para as vibrações medidas no interior das estruturas, enquanto outros, tal como o Britânico dão indicação sobre que tipos de dispositivos devem ser usados nas medições, a sua gama de frequência, a orientação dos sensores, a maneira como são instalados, a análise e o tratamento dos dados. A maior discrepância nos regulamentos é precisamente na definição dos níveis de vibração limite.

A velocidade da partícula é o parâmetro que melhor caracteriza a propagação de vibrações em maciços rochosos, razão pela qual os critérios de dano estrutural se baseiam nesta variável [12].

A relativa imprevisibilidade dos níveis de vibração, das suas consequências e o baixo nível do limiar da sensibilidade humana têm levado ao estabelecimento de níveis de vibração de pico cada vez mais cautelosos. No caso do regulamento Português, defende-se a inclusão da frequência como parâmetro para a definição da vibração máxima admissível. Em todos os regulamentos referidos os níveis de vibração variam de acordo com a estrutura em questão, sendo definidas categorias de edifícios pela sua importância (social, histórica, política) ou pela sua vulnerabilidade [6].

2.7. FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS VIBRAÇÕES

As ferramentas de avaliação do impacto das vibrações podem ser divididas em três categorias: monitorização (medição de vibrações num número limitado de locais), regulamentos (estabelecem os níveis de vibração limite) e por fim a modelação (construção de modelos numéricos que podem apoiar na conceção de trabalhos, no seu planeamento, medidas de controlo e mitigação, podendo também preencher lacunas dos resultados da monitorização).

Sob o perímetro de influência das vibrações, as estruturas abaixo ou acima do solo, devem estar identificadas e a sua sensibilidade estabelecida. Uma das dificuldades comuns é a definição de níveis máximos de vibrações para as estruturas sensíveis. Por exemplo, em edifícios de elevado valor histórico ou social são definidos baixos níveis de vibração, mesmo que estes possam suportar níveis superiores. Todas as informações sobre estruturas vulneráveis devem ser compiladas servindo assim de base para a elaboração do plano de monitorização da vibração.

Para poder prever com confiança o nível de vibrações que serão produzidas e como se vão propagar e atenuar, são iniciadas explosões de teste com cargas de baixa intensidade, que vão aumentando quando a confiança sobre a vibração produzida aumenta. Dispositivos de monitorização das vibrações são instalados em uma ou mais linhas radiais. Inicialmente devem ser medidos um número suficiente de explosões semelhantes às realizadas na fase de produção, permitindo uma estimativa da atenuação, da dispersão e da frequência associada às velocidades de pico do terreno. Com as informações recolhidas a partir das pesquisas do programa teste e de produção de explosão é estabelecido o plano de monitorização. A peça principal deste plano é um mapa que mostra a área de explosão, a geologia do solo, as construções existentes, a vibração admissível e a localização dos monitores de vibração.

O plano de monitorização pode incluir a observação estrutural, tal como o deslocamento permanente (translação, rotação ou inclinação) e também o movimento e abertura de fendas ou fissuras. Com o aumento do número de tiros, e com a vibração resultante, o plano de monitorização vai sendo atualizado e a compreensão da resposta local é reforçada.

Os modelos de propagação de ondas podem visar vários níveis de complexidade. Análises mais sofisticadas levam, potencialmente, a resultados mais precisos, mas dependem de um maior número de hipóteses e necessitam de mais informações, tornando-se assim mais vulneráveis a erros. Assim os resultados devem ser considerados de acordo com a informação e com a complexidade com que o modelo foi construído. Uma das vantagens dos modelos numéricos em relação aos modelos estatísticos reside no facto de os primeiros poderem ser utilizados antes de começar um determinado trabalho, enquanto os segundos só podem ser constituídos depois dum número significativo de medições. Os modelos numéricos devem ser sempre comparados com os dados experimentais, pois cada modelo tem a sua função, não podendo substituir outro.

Os planos de monitorização são projetados considerando os limites de vibração nas estruturas indicados pelos regulamentos. Do mesmo modo, os regulamentos são escritos tendo como base principal os resultados das campanhas de monitorização. As leis de atenuação são calibradas recorrendo aos resultados das campanhas de monitorização, enquanto os modelos numéricos são constituídos usando informações a partir da observação do local de explosão, sendo em seguida também calibrados e melhorados através da comparação com os resultados da monitorização. Por outro lado, os resultados das ferramentas numéricas ajudam a compreender as explosões e a propagação das ondas.

Os modelos numéricos permitem também a aplicação dos limites descritos nos regulamentos da vibração em locais onde as medições não podem ser feitas. Neste aspeto os regulamentos determinam o modo como os modelos são construídos e como são extraídos os resultados a partir deles. Os modelos ao ajudarem a compreensão dos fenómenos, permitem também o estudo para um grande número de situações que não se encontram em cenários reais, podendo ser utilizados para melhorar as regulamentações em vigor [1].

Estas relações podem ser facilmente compreendidas através da observação da Figura 2.6. A aceitação e exploração destas relações leva a desmontes mais eficientes e seguros.

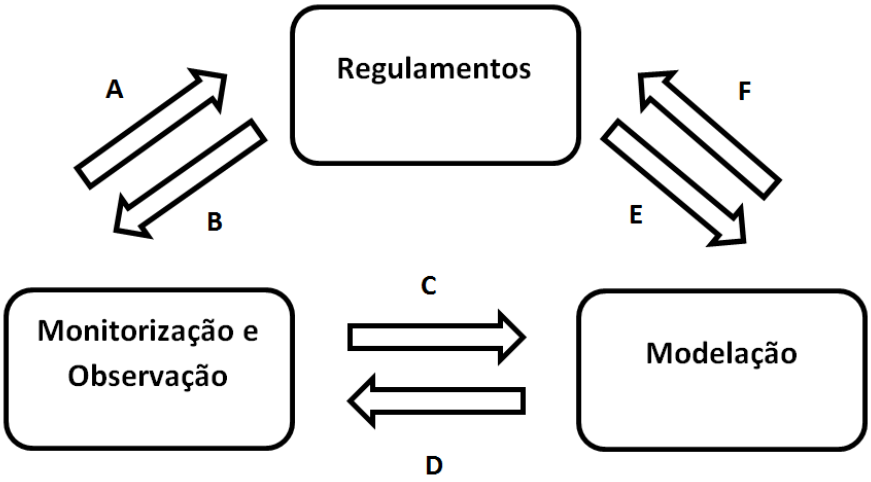


Fig. 2.6 – Sistema que permite avaliar os impactos da vibração [adaptado de [1]]

3

PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO TERRENO

3.1. INTRODUÇÃO

A maioria das solicitações dinâmicas chegam às construções propagando-se pelo solo. Nestes propagam-se ondas de tensão e deformação de diferentes tipos. Nos terramotos, por exemplo, as ondas de tensão são geradas quando a resistência do contacto entre as placas tectónicas é excedida, sendo libertada energia violentamente.

No desmonte de rochas, as vibrações são geradas pelas tensões extremas, pressão dos gases e altas temperaturas produzidas pela detonação de explosivos em furos, quebrando a rocha em torno destes. Na proximidade dos furos onde o explosivo detona, têm lugar fenómenos altamente não lineares, sendo que o aquecimento, a quebra e a plastificação da rocha circundante gastam uma grande parte da energia baixando assim os níveis de tensão de forma significativa. A tensão e a amplitude de deformação, a uma distância relativamente curta do furo, torna-se muito menor que o nível necessário para causar deformação permanente, e pode-se então assim, presumir com uma pequena margem de erro, que o regime de propagação é elástico.

A amplitude das ondas elásticas (ondas que não alteram as propriedades dos materiais) diminui rapidamente, devido ao amortecimento dos materiais e aos efeitos geométricos. Esta diminuição, no primeiro caso está relacionada com a dissipação de energia devido às características das rochas, enquanto no segundo caso é provocada pelo aumento da superfície da frente de onda com a distância à origem.

3.2. TIPOS DE ONDAS NOS TERRENOS

Nos terrenos as vibrações propagam-se através de dois tipos de ondas: ondas volumétricas e ondas de superfície.

As primeiras, as ondas volumétricas, propagam-se através do interior da terra, apresentando percursos radiais e deformadas devido às variações da composição e densidade das camadas atravessadas. Existem dois tipos de ondas volumétricas: ondas de compressão (ondas P) e ondas de corte (ondas S).

As ondas de superfície propagam-se imediatamente abaixo da superfície terrestre, são ondas mais lentas e mais destrutivas que as ondas volumétricas, devendo-se este facto principalmente à baixa frequência, grande amplitude e longa duração. Existem dois tipos de ondas de superfície: ondas de Rayleigh (R) e ondas de Love (L).

Na mecânica das rochas, sismologia e engenharia sísmica, as ondas apresentadas são as mais importantes, pelo que os modos de propagação das ondas P, ondas S e ondas de Rayleigh (R), com maior interesse para o presente trabalho, podem ser observados na Figura 3.1.

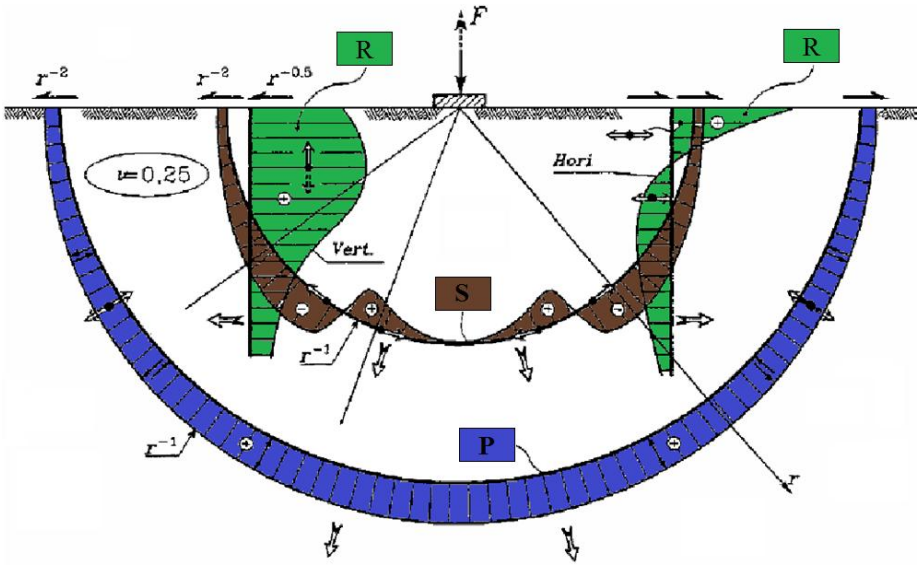


Fig. 3.1 – Modos de propagação das vibrações no terreno [Adaptado de [10]]

As ondas P, também chamadas de ondas primárias, são as primeiras a chegar devido à sua maior velocidade de propagação. Esta velocidade varia com o meio onde se propagam, tendo como valores típicos aproximadamente 330 a 340 m/s para o ar, 1450 a 1530 m/s para a água e 4600 a 8400 m/s para rochas duras, tais como granitos, basaltos entre outras [13]. Estas são ondas longitudinais que fazem com que o terreno vibre paralelamente à direção da onda, verificando-se alternadamente uma compressão seguida de uma distensão com amplitudes e períodos baixos, impondo aos corpos sólidos elásticos alteração de volume, porém, não havendo alteração da sua forma (Figura 3.2).

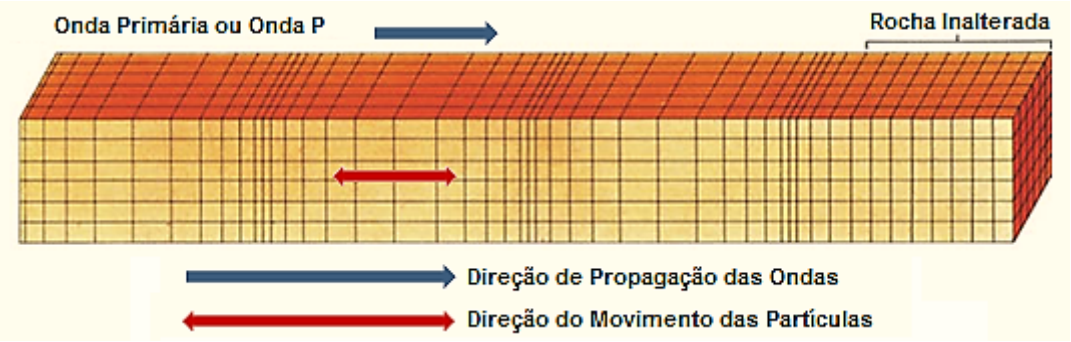


Fig. 3.2 – Deformação do terreno pelo efeito de uma onda P [Adaptado de [14]]

As ondas S ou ondas secundárias são ondas transversais, que fazem com que o terreno seja deslocado perpendicularmente à direção de propagação. Estas ondas são mais lentas que as ondas P, com velocidades entre 2000 a 5000 m/s, e só se propagam em corpos sólidos, uma vez que os fluídos (líquidos e gases) não suportam forças de corte [13]. As ondas S provocam alterações na morfologia do solo, contudo, não há alteração do seu volume (Figura 3.3).

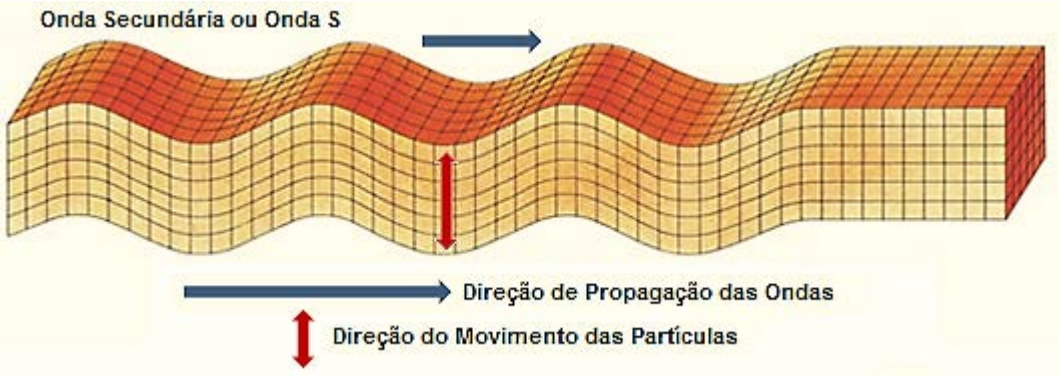


Fig. 3.3 – Deformação do terreno pelo efeito de uma onda S [Adaptado de [14]]

As ondas de Rayleigh (R), são ondas de superfície e resultam da interferência de ondas P e S. Em geral as velocidades destas ondas são inferiores às ondas volumétricas, mas na presença de rochas duras e medianas as velocidades de ambas as ondas tendem a aproximar-se [13]. As vibrações provocadas pelas ondas de Rayleigh são no sentido contrário à propagação da onda, originando assim um movimento que descreve uma órbita elíptica. A amplitude destas ondas diminui rapidamente com a profundidade (Figura 3.4).

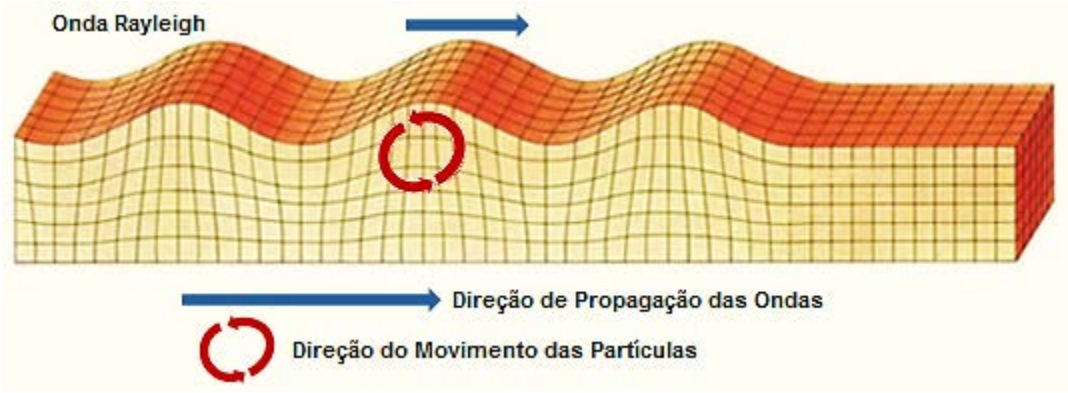


Fig. 3.4 – Deformação do terreno pelo efeito de uma onda de Rayleigh [Adaptado de [14]]

As ondas de Love (L) são também ondas de superfície que provocam corte horizontal do terreno, a sua energia é forçada a permanecer nas camadas superiores do terreno por ocorrência de reflexão interna total. Estas ondas resultam da interferência de duas ondas S. Geralmente só ocorrem quando há uma

camada superficial com características distintas [13]. As ondas de Love são ligeiramente mais rápidas que as ondas de Rayleigh. São ondas altamente destrutivas (Figura 3.5).

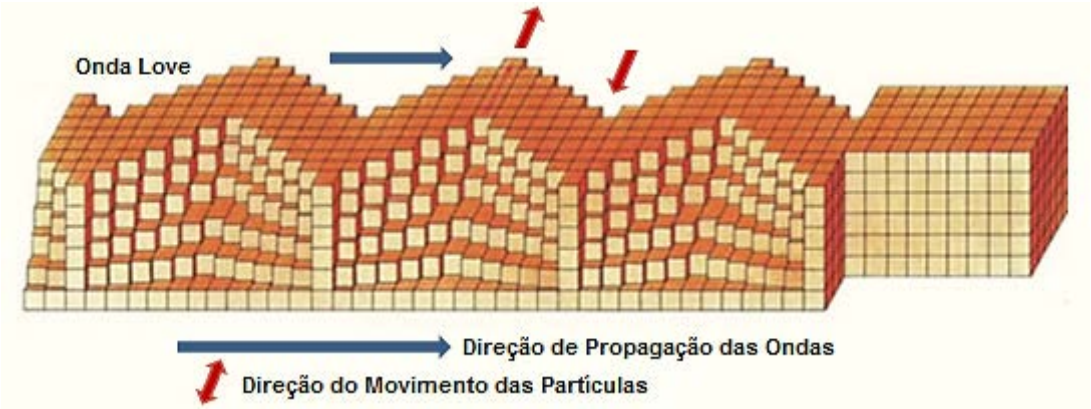


Fig. 3.5 – Deformação do terreno pelo efeito de uma onda de Love [Adaptado de [14]]

A relação entre as velocidades das ondas de corte e das ondas de compressão é de cerca de um terço, dependendo a velocidade destas do coeficiente de Poisson. A velocidade das ondas de compressão, V_P, pode ser obtida de acordo com a seguinte expressão (3.1):

$$V_P = \sqrt{\frac{K+\frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{E\,\frac{1-\nu}{(1+\nu).(1-2\nu).\rho}} \qquad (3.1)$$

de igual forma, a velocidade das ondas de corte, V_S, é obtida de acordo com a equação (3.2):

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho}\cdot\frac{1}{(1+\nu)}} \qquad (3.2)$$

onde, K é o módulo de compressibilidade, G é o módulo de distorção, ρ é a massa volúmica do material a ser atravessado, E é o módulo de deformabilidade e ν é o coeficiente de Poisson.

Para se obter a caracterização dinâmica do solo, há a necessidade de conhecer o valor do módulo de distorção G das camadas do terreno onde as ondas se irão propagar, podendo então ser calculado pela fórmula (3.3):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad (3.3)$$

A expressão que se segue pode ser usada para caracterizar os materiais de fundação, pois são as velocidades das ondas S que geralmente melhor caracterizam a estrutura do terreno, resumindo-se portanto à seguinte expressão (3.4):

$$E = 2\,(1+\nu)\,\rho\,V_S^2 \qquad (3.4)$$

Para a determinação do módulo de deformabilidade é necessário conhecer o coeficiente de Poisson *v*, para se conseguir isso será necessário o conhecimento dos valores da velocidade longitudinal e transversal, ou de outra forma mais simplificada, assumir um valor para a relação V_P/V_S ou até mesmo para o próprio coeficiente de Poisson.

A gama de frequências das ondas que atravessam os terrenos dependem do modo de geração, e do tipo de terreno, podendo ir de poucos hertz, no caso de sismos distantes em solos moles a vários milhares de hertz, em explosões próximas em rochas duras.

3.3. INTERAÇÃO DAS ONDAS COM JUNTAS DAS ROCHAS

Os maciços rochosos são afetados por fraturas e falhas de diferentes origens. A interação das ondas com as descontinuidades através de mecanismos de reflexão, refração e absorção constituem a principal causa da atenuação das ondas de tensão. As juntas geralmente interagem com as ondas de tensão, diminuindo a velocidade de pico das partículas. Estas afetam a rigidez global em condições dinâmicas, da mesma maneira que reduzem a qualidade estática das rochas [1].

Dependendo do tipo de onda incidente e do ângulo de incidência, origina-se a partir do ponto de impacto com a fratura um campo de ondas que pode ser composto de até quatro ondas. As ondas de corte horizontais geram apenas duas ondas horizontais de corte, uma delas é refletida e outra é transmitida. Ondas de compressão e ondas de corte verticais podem gerar quatro ondas, ou apenas duas ondas do mesmo tipo da onda incidente, caso o ângulo de incidência seja nulo. As ondas incidentes, com as respetivas ondas transmitidas e refletidas são representadas na Figura 3.6.

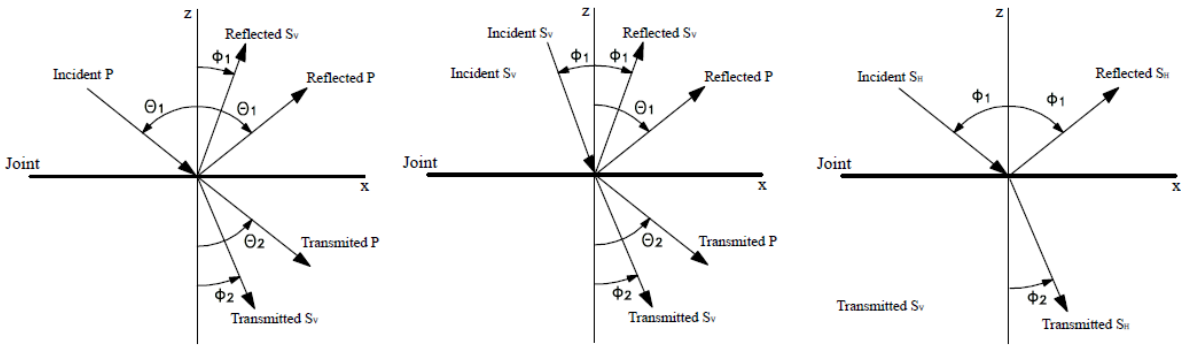


Fig. 3.6 – Transmissão e reflexão das ondas em descontinuidades, onda de compressão (esquerda), onda de corte vertical (centro) e onda de corte horizontal (direita) [1]

As direções de propagação de cada uma das ondas de saída (transmitidas e refletidas) serão definidas por ângulos que são função da direção da onda incidente e das velocidades de propagação das ondas de compressão e de corte em ambos os lados da interface.

3.4. MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Os modelos de propagação podem ter duas finalidades distintas: apoiar na conceção e planeamento de medidas de controlo e mitigação de trabalhos que envolvam explosões, mas também auxiliar a colmatar as lacunas na distribuição espacial frequentemente insuficiente dos aparelhos de monitorização.

Existem duas formas possíveis para tratar os problemas de previsão dos níveis de vibração. A primeira via é puramente estatística, onde funções matemáticas ou técnicas sofisticadas de inteligência artificial são calibradas para ajustar os dados recolhidos pela monitorização. A segunda via consiste numa forma mais ou menos sofisticada para reproduzir a cadeia de eventos de uma explosão numa escavação, tais como, geração e propagação de ondas e impacto estrutural. Neste processo fenómenos complexos têm lugar.

3.4.1. MÉTODOS ESTATÍSTICOS

A maioria dos métodos estatísticos tem alguma relação física com os fenómenos: as variáveis envolvidas têm um significado real, como por exemplo a distância da explosão ou a massa da carga explosiva.

Técnicas estatísticas e de modelação numérica adequadas ao baixo nível de informação sobre uma detonação podem ser desenvolvidas e utilizadas para o estudo da dispersão das velocidades de pico das partículas. Com os registos de um maior número de tiros e a disponibilidade dos valores da vibração, os modelos estatísticos podem ser construídos e atualizados.

Com base numa análise cuidadosa do tempo de ocorrência, da velocidade e do espectro das frequências consegue-se validar um registo verdadeiro resultante de uma explosão. Valores excecionalmente altos, causados pelas características particulares de um tiro explosivo, não devem ser ignorados como "*outliers*" pois são estes valores que têm a capacidade de causar danos e não pontos médios, não importando assim a predominância do número de pontos.

Em locais com geologia complexa ou desconhecida, a análise estatística e as leis de atenuação podem ser a melhor maneira de interpolar os valores de vibração, em locais onde estes não poderiam ser medidos.

3.4.2. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Na engenharia geotécnica os modelos numéricos tornaram-se uma ferramenta essencial em todos os tipos de situações, como por exemplo, na previsão de deslocamentos para cálculos de segurança e na investigação dos mecanismos internos dos maciços.

No desmonte de rochas, a principal vantagem dos modelos numéricos em relação aos modelos estatísticos é que os primeiros podem ser utilizados antes do começo de trabalhos de detonação, enquanto os segundos podem apenas ser constituídos depois da medição de um número significativo de explosões. Evidentemente os resultados dos modelos numéricos devem ser considerados com grande reserva pelo menos até que sejam comparados com dados de campo.

Modelos numéricos eficazes que simulem a transmissão da onda de tensão tornam possível a resolução de uma grande incerteza associada à propagação de ondas em maciços com geometria e propriedades complexas. Possibilitam a simulação e análise de cenários reais e hipotéticos e testam a eficiência das medidas de mitigação.

Estes modelos conseguem replicar os mecanismos de refração, reflexão e atenuação das ondas que atravessam as rochas, no entanto, exigem também um conhecimento detalhado das propriedades do terreno e das características da explosão. São necessárias várias explosões no interior das massas rochosas, para se poder ganhar conhecimento e compreensão sobre a propagação de ondas de tensão, o que irá possibilitar a calibração dos modelos numéricos.

A simulação numérica é apenas uma representação aproximada da realidade e até mesmo os modelos mais sofisticados concentram-se numa etapa do problema de cada vez. Portanto, os métodos de previsão tradicionais de propagação da vibração devem ser melhorados e completados com modelos numéricos que conseguem lidar com a variabilidade das explosões e dos maciços rochosos, de outras formas que não através de equações empíricas.

3.4.3. Métodos Numéricos Contínuos e Descontínuos

Uma das mais importantes divisões nos modelos numéricos aplicados à Mecânica das Rochas está entre modelos contínuos e descontínuos.

Nos modelos contínuos, o maciço é modelado por um material contínuo equivalente que incorpora a deformabilidade e a contribuição da resistência das descontinuidades. Como vantagens da abordagem contínua salienta-se a maior simplicidade de geração do modelo e de análise de resultados, mas também o menor tamanho e exigência computacional dos cálculos. A principal desvantagem apresentada é a dificuldade de calibrar os parâmetros de forma a reproduzir satisfatoriamente o comportamento das descontinuidades. Este tipo de modelos não permite também uma análise dos modos de rotura causados por deslizamentos na fundação nem a exploração de cenários em que a influência de uma determinada descontinuidade tenha um papel preponderante [2].

Nos modelos descontínuos, as falhas e diaclases são incluídas explicitamente no modelo, com as suas propriedades e leis de comportamento próprios. As descontinuidades são representadas individualmente, dando origem a um conjunto de volumes habitualmente designados de blocos.

Apesar de serem mais eficientes e realistas na reprodução da influência das descontinuidades, estes modelos são mais pesados computacionalmente e implicam a formulação de elementos de contacto e modelos constitutivos de comportamento. Para diminuir a dimensão dos modelos, normalmente são apenas incluídas as descontinuidades mais representativas e relevantes no estudo. Com a diminuição do número de descontinuidades, o espaçamento aumenta em relação ao real, o que é compensado com a atribuição de propriedades escaladas de maneira a reproduzir o comportamento global. Na impossibilidade de testar o comportamento de todas as descontinuidades relevantes para um problema, há a necessidade de extrapolar as suas características [2].

A escolha de um outro tipo de idealização depende fundamentalmente da escala do problema e dos objetivos do estudo. A modelação de rochas exige muitas vezes métodos numéricos de alto desempenho, logo é desnecessário limitar as representações das características e processos mais significativos a apenas um método numérico, daí serem utilizados modelos híbridos que permitem a discretização interna de blocos, dos danos internos do material rochoso, do crescimento das fendas e também da subdivisão de blocos.

Os métodos numéricos mais utilizados nos problemas da Mecânica das Rochas são os seguintes [15]:

Métodos contínuos:

- Método das Diferenças Finitas (MDF)
- Método dos Elementos Finitos (MEF)
- Método dos Elementos de Contorno (MEC)

Métodos descontínuos:

- Método dos Elementos Discretos (MED)
- Método das Fraturas Discretas (MFD)

Métodos Híbridos:

- Modelo Híbrido (MEF/MEC)
- Modelo Híbrido (MED/MEF)
- Modelo Híbrido (MED/MEC)

Do ponto de vista geométrico, o Método Elementos Discretos (MED) é a forma de representação mais natural, e portanto, pode ser também a mais realista dos maciços rochosos fraturados. Por outro lado, o Método Elementos de Contorno (MEC) corresponde à representação mais simples da geometria do problema [16]. A Figura 3.7 ilustra os conceitos de alguns dos modelos numéricos contínuos e descontínuos, que em seguida serão brevemente apresentados.

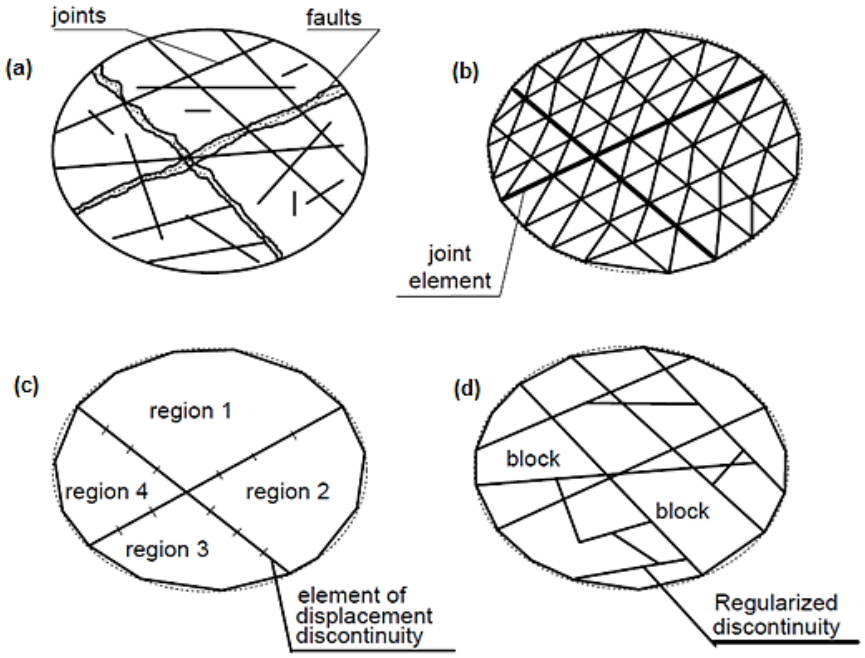


Fig. 3.7 – Representação de uma massa de rocha fraturada, em (a) pelo MDF, em (b) pelo MEF, em (c) pelo MEC e em (d) pelo MED [15]

3.4.3.1. Método das Diferenças Finitas (MDF)

Este método é o mais antigo membro da família de métodos numéricos. Os métodos diferenciais consideram a resolução das equações diferenciais, baseando-se na aproximação por diferenças finitas, de modo a satisfazerem as condições de fronteira, pelo que a discretização estende-se apenas ao domínio [17].

Os Métodos de Diferenças Finitas fornecem valores para apenas um número finito de pontos que se encontrem no interior do domínio considerado e são particularmente adequados para análises dinâmicas lineares e não-lineares.

3.4.3.2. Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método de Elementos Finitos é a técnica de modelação numérica mais utilizada nos inúmeros campos da engenharia. Inicialmente foi formulado para a modelação de meios em que existe continuidade do material. Posteriormente com o desenvolvimento do elemento de junta possibilitou a modelação explícita de meios descontínuos.

Os elementos finitos de junta permitem modelar a interface entre elementos através de modelos constitutivos apropriados. Desta forma, as superfícies de separação entre os blocos rochosos são integradas de forma simples mas não muito eficiente no modelo, distinguindo o comportamento do meio contínuo das interfaces [18].

Este método de solução tem a vantagem de permitir facilmente a inclusão do comportamento não linear dos materiais, quer das juntas quer dos blocos, assim como, de não linearidade geométrica [19].

3.4.3.3. Método dos Elementos de Contorno (MEC)

Também conhecido como Método dos Elementos de Fronteira, nestes introduz-se a discretização apenas ao longo do contorno do domínio. As equações diferenciais são transformadas num sistema de equações integrais, com as incógnitas distribuídas pelas superfícies de fronteira, reduzindo-se a dimensão do problema [17].

Uma vez que apenas o contorno é representado por este método torna-os computacionalmente económicos, a nível de tempo e do número de cálculos a efetuar, porém, também limitados ao lidarem com geometrias complexas em maciços rochosos fraturados.

Estes métodos são mais eficazes para lidar com meios homogéneos. Meios heterogéneos implicam a discretização das fronteiras entre os materiais.

3.4.3.4. Método dos Elementos Discretos (MED)

A aplicação do MED cedo deixou de se restringir à Mecânica das Rochas, tendo-se estendido a outras áreas da engenharia, designadamente à modelação de estruturas de alvenaria, modelação de explosões em meios fraturados, etc.

O Método de Elementos Discretos inclui os métodos numéricos que tratam o domínio do problema como um conjunto de unidades independentes. As unidades individuais podem ser blocos de rocha, partículas sólidas de materiais granulares, elementos estruturais ou outras peças individuais de

sistemas de múltiplos corpos. Pela sua natureza, o MED, está particularmente vocacionado para a análise de comportamentos não lineares e de processos de rotura, tendo sido inicialmente aplicado no estudo da estabilidade de taludes rochosos [20].

Este método tem como fundamento teórico a formulação e solução de equações de movimento de corpos rígidos ou deformáveis utilizando formulações implícitas e explícitas. Na solução explícita da discretização finita do volume do interior dos blocos, não há a necessidade de resolver as equações da matriz dos coeficientes em larga escala. Já a solução implícita com discretização dos elementos finitos do interior dos blocos, leva a uma equação da matriz dos coeficientes que representa a deformabilidade dos sistemas de blocos, semelhantes ao MEF [15].

Os métodos MED explícitos são conhecidos como Métodos dos Blocos ou ainda Métodos dos Elementos Distintos e foram desenvolvidos tendo em vista a análise de estruturas ou meios em que os principais modos de deformação e mecanismos de rotura são condicionados pelas descontinuidades entre blocos. Nestes idealiza-se o maciço rochoso como um sistema de blocos que se movem segundo as leis da dinâmica que interagem respeitando as leis de contacto [2].

No Método de Elementos Distintos os blocos 2D são representados como polígonos gerais com um número finito de arestas retas. Estes blocos são formados por fraturas que são representadas no domínio do problema, usando distribuições aleatórias com base em dados locais ou na exigência da modelação. Os vértices, arestas e faces dos blocos individuais e as suas relações de conexão são identificados durante o processo de geração dos blocos. Os blocos deformáveis podem ser ainda divididos num número finito de elementos triangulares 2D de deformação constante (Figura 3.8). Malhas de elementos retangulares podem também ser usadas para resolução de problemas 2D quando a geometria é favorável.

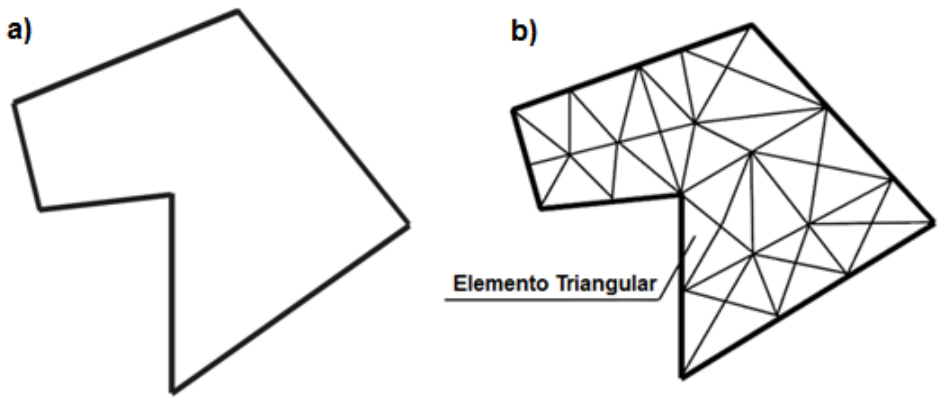


Fig. 3.8 – Blocos 2D no Método de Elementos Distintos (a), discretização do bloco em triângulos de deformação constante (b) [Adaptado de [15]]

Os contactos entre os blocos são determinados cinematicamente pela menor distância entre dois blocos. O algoritmo de deteção de contactos no Método Elementos Distintos determina o tipo de contacto, a diferença máxima entre blocos (no caso de dois blocos que não se toquem) e o plano tangente no qual o deslizamento pode ocorrer. A interação entre dois blocos em contacto é caracterizada pela rigidez na direção normal e um ângulo de rigidez e de fricção nas direções tangenciais em relação à superfície de fratura [15].

Graças à representação explícita de fraturas, o Método de Elementos Discretos tem beneficiado de uma ampla aplicabilidade, mas apesar das suas vantagens, a falta de conhecimento da geometria das fraturas da rocha limita as suas aplicações mais comuns. Em geral, a geometria dos sistemas de fratura em maciços rochosos não pode ser conhecida e só pode ser aproximadamente estimada. Este problema aplica-se também aos modelos contínuos, tais como o MEF, mas na representação geométrica explícita das fraturas esta limitação tem uma maior importância.

O método MED implícito é reproduzido pela abordagem da Análise da Deformação Descontínua (ADD). Em termos de desenvolvimento e aplicação, a ADD em comparação com a abordagem explícita do MED, mostra algumas vantagens: a condição de equilíbrio é automaticamente satisfeita para quase todos os problemas estáticos sem usar ciclos de iteração excessivos; a duração do intervalo de tempo pode ser maior, e sem indução de instabilidade numérica; a ADD é de fácil utilização quando se trata de converter códigos MEF existentes, mas sem herdar destes as limitações comuns, tais como a pequena deformação, a geometria do material contínuo e a reduzida eficiência na análise dinâmica. A abordagem ADD é atrativa para a resolução de problemas geomecânicos, pois as suas vantagens não podem ser substituídas por métodos contínuos ou formulações explícitas MED [21].

A simulação do comportamento mecânico de materiais granulares é uma das mais importantes áreas de aplicação do MED, tanto para os métodos de elementos distintos como para as abordagens ADD. O princípio da técnica MED para materiais granulares é basicamente o mesmo que para os blocos, com a simplificação adicional de que as partículas são rígidas e a sua forma pode ser regular (circular em 2D e elipsoidal em 3D) ou irregular (poligonal em 2D e poliédrica em 3D). Sendo o Método Elementos Discretos de partículas o utilizado no presente trabalho, no capítulo seguinte será abordado com maior pormenor.

3.4.3.5. Método das Fraturas Discretas (MFD)

O método MFD é uma abordagem discreta especial, que é útil no estudo do fluxo e transporte de fluídos em rochas fraturadas para os quais um modelo equivalente contínuo é difícil de estabelecer. Esta técnica foi criada na década de 1980 para problemas 2D e 3D e foi continuamente desenvolvida para muitas outras aplicações na Mecânica das Rochas. Um modelo MFD é estabelecido baseando-se na compreensão e representação de dois fatores: geometria do sistema de fraturas e transmissividade das fraturas individuais.

Numa primeira fase pode ser aplicado o MED na criação de um modelo geométrico que descreve a geometria das fraturas ligadas e os blocos de rocha formados por estas. Depois usando o método MFD pode ser obtida a solução do fluxo para cada uma das fraturas geradas. Leis simples de fluxo podem ser usadas para descrever o comportamento das fraturas quando a matriz da rocha é assumida como sendo um material rígido e impermeável. No MFD, apenas o espaço vazio das fraturas conectadas é explicitamente representado sendo que os blocos de rocha entre as fraturas são excluídos (Figura 3.9).

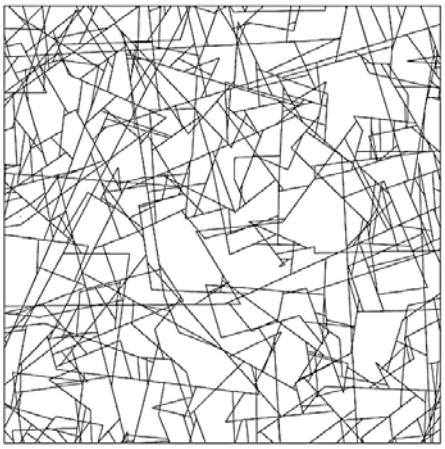


Fig. 3.9 – Geometria do sistema de fraturas num modelo MFD [22]

Um volume de fluido é conduzido através das vias formadas pelas fraturas ligadas quando a permeabilidade da matriz rochosa é insignificante comparada com as fraturas, especialmente em rochas de baixa porosidade como o granito. As fraturas isoladas e fraturas isoladamente ligadas não contribuem para este fluxo. Além disso, quando o sistema de fraturas está perto do limiar de percolação crítica o fluxo é muito sensível aos padrões do sistema de conectividade das fraturas. Sob um tal estado, uma pequena alteração de conectividade das fraturas (por exemplo, a adição de uma pequena fratura) pode conduzir a padrões de fluxo diferentes [23]. Por outro lado, a deformabilidade de uma massa de rocha fraturada, depende mais da densidade e da orientação dos conjuntos de fraturas e menos da sua conectividade.

3.4.3.6. Métodos Híbridos

Nesta secção são brevemente apresentados alguns dos modelos híbridos que em geral são usados, destacando o uso vantajoso destes na resolução de problemas na engenharia das rochas.

Os modelos híbridos MEF/MEC foram propostos como uma técnica geral de análise da tensão, sendo que na mecânica das rochas têm sido utilizados principalmente para simular o comportamento mecânico de escavações. Este método tem a vantagem de ser capaz de lidar com o comportamento não linear dos materiais [15].

A combinação de métodos discretos (MED) e métodos contínuos (MEF e MEC) pode ser realizada, apresentando várias vantagens, recorrendo à representação discreta de fraturas e de blocos de rocha numa pequena região mais próxima e à representação contínua numa região muito maior e mais distante [16].

Na Figura 3.10 representa-se um modelo híbrido MED/MEF, no qual a região MED é altamente fraturada contendo também uma escavação, ao contrário da região MEF que é contínua (embora possa também conter algumas fraturas específicas em larga escala). Nestes modelos a questão fundamental é assegurar a compatibilidade do deslocamento na interface, que liga ambas as regiões MED e MEF, podendo ser aplicadas diferentes técnicas de acoplamento para formular o modelo híbrido. Estas representações combinadas são em geral bastante úteis para resolução de problemas práticos de grande dimensão.

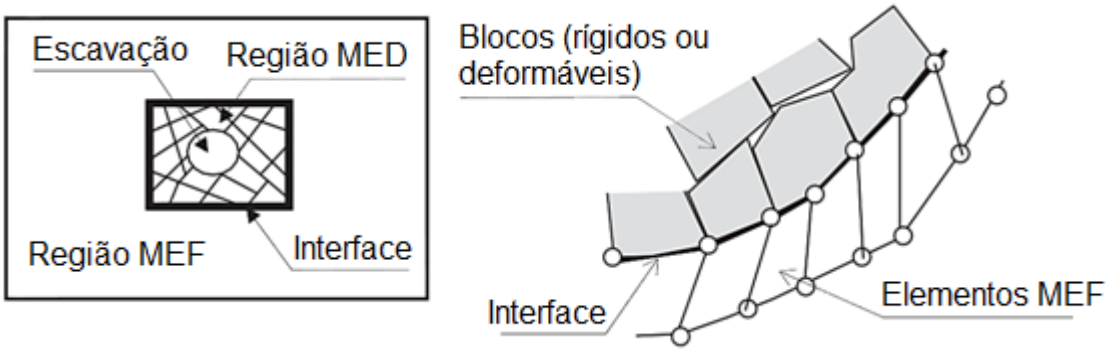


Fig. 3.10 – Modelo híbrido MED/MEF com a respetiva representação da interface [Adaptado de [16]]

As representações híbridas MED/MEC permitem análises mecânicas e hidromecânicas, tendo também sido desenvolvidas soluções para a análise de deformações. A principal vantagem da utilização deste modelo é o facto de que apenas a interface entre as regiões MED e MEC precisa de ser discretizada com elementos. As condições a serem satisfeitas na interface são a continuidade do deslocamento e o equilíbrio da tensão, sem que ocorra a separação e o deslizamento entre as duas regiões (Figura 3.11).

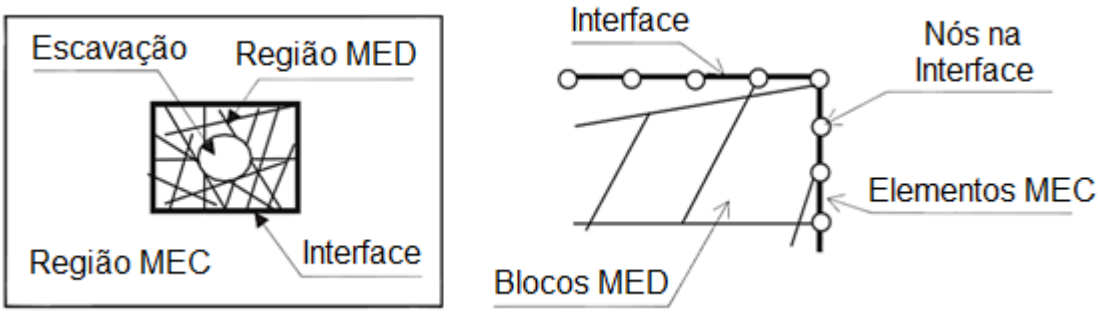


Fig. 3.11 – Modelo híbrido MED/MEC com a respetiva representação da interface [Adaptado de [16]]

4
MODELAÇÃO MICROMECÂNICA

4.1. INTRODUÇÃO

A modelação micromecânica tem por objetivo prever o comportamento mecânico de materiais através da simulação de mecanismos de deformação e rotura internos [24].

Inicialmente os modelos micromecânicos tinham como principal objetivo ajudar na compreensão de fenómenos, testar teorias e fornecer auxílio na constituição dos modelos contínuos. Sendo uma área que tira proveito do rápido desenvolvimento computacional, com grandes aumentos do poder de processamento, memória e possibilidade de executar códigos em vários processadores, os modelos micromecânicos têm vindo a ser utilizados numa ampla gama de aplicações, possibilitando assim a criação de modelos com várias centenas de milhares de partículas.

A principal vantagem desta técnica é que o comportamento do material pode ser modelado sem recorrer a modelos constitutivos muito complexos, que tendem a ser muito complicados de calibrar e implementar. Se as hipóteses fundamentais que orientam o comportamento do material estiverem corretas e devidamente implementadas, é possível obter a resposta do material para uma ampla gama de situações [1].

Neste trabalho pretende-se realizar a modelação micromecânica de provetes de rochas duras, com o intuito de calibrar ensaios estáticos e dinâmicos, e conferir a sua aplicabilidade a rochas. A modelação micromecânica foi efetuada com recurso ao método dos elementos discretos de partículas, o qual será de seguida brevemente apresentado.

4.2. EVOLUÇÃO DOS MODELOS MICROMECÂNICOS

Um dos primeiros modelos utilizados na simulação de materiais a nível microscópico foi o método de treliça, no qual o material é descrito como uma rede de elementos de barra que transmitem forças normais, momentos e forças de corte entre si, para simular a tensão macroscópica.

Por outro lado, a observação dos maciços rochosos e dos seus mecanismos de rotura, particularmente daqueles próximos da superfície, levou à inclusão de juntas e o movimento ao longo destas nos modelos contínuos. Como resposta a estes dois factos, em 1971, Cundall desenvolveu um método numérico, baseado na suposição de que o comportamento de um maciço é ditado pelo movimento ao nível das juntas da rocha, designado por Método dos Elementos Discretos (MED) no qual o maciço é simulado por um conjunto de blocos rígidos de forma poligonal capazes de se moverem livremente. Portanto, considera-se que toda a deformabilidade do modelo é devida ao movimento das juntas.

O cálculo do movimento dos blocos a cada instante é realizado em duas etapas. Na primeira, as forças e os momentos que atuam em cada bloco são adicionadas e aplicadas no seu centro de massa. Esta fase inclui também a resolução das forças que surgem no contacto entre os blocos. Na segunda etapa a equação de movimento de cada bloco é resolvida de forma independente.

Posteriormente, em cada bloco foi introduzida uma malha triangular de elementos finitos, permitindo ter em conta a deformabilidade da rocha, verificando-se uma melhoria na resposta do modelo especialmente quando a relação entre a tensão instalada e a resistência da rocha é alta. Um esquema que permite aos blocos quebrarem e dividirem de acordo com o critério de resistência dado foi também introduzido [25]. O programa UDEC junta todas estas possibilidades.

O método de elementos discretos de partículas (P-MED) foi proposto em 1979 por Cundall e Strack como uma nova evolução do método de elementos discretos, onde as partículas poligonais foram substituídas por partículas circulares. Inicialmente utilizado na análise de solos granulares, com a evolução computacional a sua utilização expandiu-se para muitas outras aplicações, tais como a simulação de materiais coesivos. Na mecânica geral, uma partícula é considerada uma entidade com raio nulo, mas no P-MED a partícula é caracterizada como uma superfície com dimensões finitas.

Em 1988, dá-se a introdução do código 3DEC, trazido pela expansão do MED a 3D. Nesta formulação os blocos tridimensionais têm forma poliédrica convexa, com faces planas, podendo ser rígidos ou deformáveis.

O código PFC (Particle Flow Code), um dos códigos de partículas mais completos e utilizados, foi desenvolvido pela Itasca e está hoje disponível em 2D (Itasca 2004) e 3D (Itasca 2005). No PFC2D, as partículas são consideradas como discos ou esferas, às quais podem ser atribuídas propriedades, como a massa, a rigidez de contacto e a resistência [26]. Neste trabalho será empregue o PFC2D, no qual as partículas apresentam três graus de liberdade, sendo que na versão 3D exibem seis graus de liberdade.

Na implementação inicial, o contacto entre partículas consistia em forças normais e de corte proporcionais à distância entre as partículas. Mais tarde, foram introduzidos modelos de contacto mais complexos, como por exemplo, um modelo baseado na teoria de contacto de Hertz, segundo o qual a força está relacionada com a área de contacto [27].

Um conjunto de melhorias e novas capacidades foram sendo introduzidos nos modelos de blocos e Métodos de Elementos de Partículas. A Tabela 4.1 representa a evolução do MED, relatada atrás, ao longo dos vários anos.

Tabela 4.1 – Origem e evolução do MED [adaptado de [2]]

1971	Modelo de Blocos Rígidos 2D – Peter Cundall
1978	Modelo de Blocos Deformáveis 2D – Programa UDEC
1979	Modelo de Partículas Circulares – Cundall & Strack
1983	Modelo de Partículas Esféricas
1988	Modelo de Blocos 3D – Programa 3DEC – Cundall e Hart
1994	Particle Flow Code – Programas PFC2D e PFC3D

4.3. SIMULAÇÃO DE ROCHAS COM MODELOS DE PARTÍCULAS

A utilização de modelos de partículas na modelação tem diversas aplicações: mecânica dos solos, análise estrutural, análise de materiais granulares, mecânica de fluidos, fraturas de betão e rochas, estabilidade de reservatórios, estabilidade de taludes, entre muitas outras [28].

A simulação do comportamento mecânico das rochas é feito através de um conjunto de discos ou esferas com distribuição não uniforme de raio [29]. Os discos, ou esferas, têm massa finita e estão ligados pelos seus pontos de contacto. Os contactos obedecem às leis de contacto e na simulação de rocha devem apresentar resistência à tração e ao corte.

O PFC2D, software bidimensional utilizado para a modelação de rochas, gera modelos de partículas tendo em conta os seguintes princípios [24]:

- As partículas são tratadas como corpos rígidos;
- Os contactos ocorrem numa área muito pequena (um ponto);
- O comportamento dos contactos é estabelecido segundo abordagem de aproximação; onde as partículas se podem sobrepor apenas nos pontos de contacto;
- A magnitude da sobreposição está relacionada com a força de contacto através da lei força-deslocamento, e todas as sobreposições são pequenas em relação ao tamanho das partículas;
- Todas as partículas são circulares. No entanto, a lógica de agrupamento “clumps” admite a criação de super partículas de forma arbitrária.

Este conjunto de hipóteses leva à formação de um conjunto de partículas compactadas onde a deformação decorre da variação do espaço entre elas, e a rotura da coalescência de micro e macro fraturas (Figura 4.1).

Uma amostra é definida pelo arranjo das partículas e pelas propriedades dos contactos. Uma vez, que o arranjo das partículas tem um grau de aleatoriedade, as irregularidades são o ponto de partida natural para os danos e fissuras nas rochas.

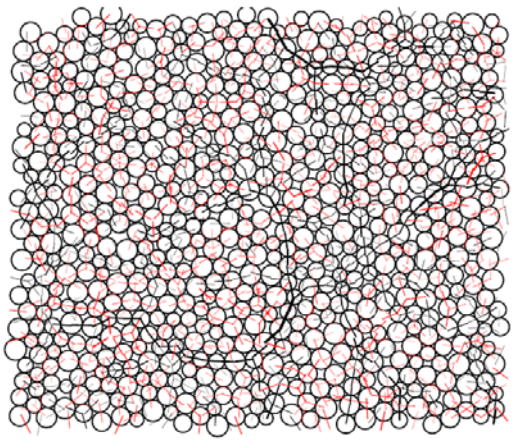


Fig. 4.1 – Representação das forças de contacto num conjunto de discos dimensionais no estado de tensão isotrópico [adaptado de [1]]

De forma semelhante às amostras de rochas reais, uma medição tomada à escala das bolas não é representativa do estado geral do modelo. Assim, ao contrário dos modelos contínuos, a tensão e a deformação não podem ser definidos localmente devendo ser calculados sobre uma região que capture um número suficiente de contactos.

Em simulações dinâmicas, a massa desempenha um papel importante, pois a inércia e a translação das bolas intervêm na equação de movimento. Nos cálculos estáticos, a massa das bolas é relevante na determinação das cargas de peso próprio, como por exemplo a massa pode ser dimensionada para atingir intervalos de tempo ideais e assim acelerar o processo de cálculo.

As propriedades ao nível dos contactos não são diretamente proporcionais às propriedades macroscópicas, embora sigam a mesma tendência [24]. Sempre que duas partículas se sobrepõem é formado um novo contacto, localizado na linha que liga o centro das duas partículas. Um contacto compreende duas forças no plano das partículas: uma força normal que atua ao longo da linha que liga os centros e uma força de corte que atua perpendicular à força normal (Figura 4.2).

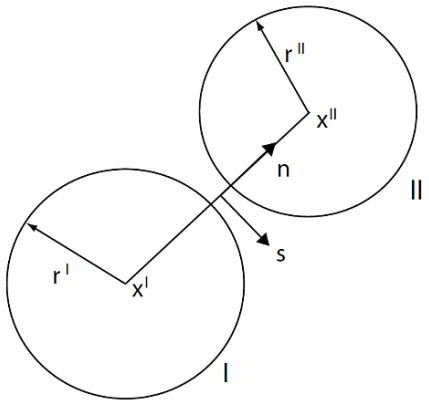


Fig. 4.2 – Contacto entre duas partículas [30]

O modelo de contacto padrão do PFC é constituído por três partes distintas: um modelo de rigidez, um modelo de contacto e um modelo de deslizamento. O modelo de rigidez controla a deformação dos contactos através das relações lineares força-deslocamento. A cada contacto é atribuída uma rigidez normal e uma rigidez de corte, *Kn* e *Ks* respetivamente. Estes valores derivam das propriedades das partículas em contacto. Cada partícula contribui como uma mola e a rigidez do contacto é calculada através de:

$$K_n = \frac{K_n^I \times K_n^{II}}{K_n^I + K_n^{II}} \qquad (4.1)$$

$$K_s = \frac{K_s^I \times K_s^{II}}{K_s^I + K_s^{II}} \qquad (4.2)$$

Nestas fórmulas, K_n^I é a rigidez normal da partícula I e K_n^{II} é a rigidez normal da partícula II, e onde, K_s^I é a rigidez de corte da partícula I e K_s^{II} a rigidez de corte da partícula II [30].

Analisando as equações (4.1) e (4.2), é claramente compreensível que um contacto entre duas partículas com características semelhantes de rigidez terá metade da rigidez atribuída às partículas. A rigidez dos contactos neste modelo não tem em conta as dimensões das partículas. Por exemplo, se duas partículas de dimensões diferentes mas com a mesma rigidez estão em contacto, cada partícula vai contribuir igualmente para a rigidez do contacto. Outros modelos de rigidez, nomeadamente o modelo de Hertz, já têm em conta as dimensões das partículas.

No PFC, a rigidez normal é a rigidez secante, o que significa que o valor absoluto da força normal é calculado diretamente a partir do deslocamento acumulado. O valor da rigidez de corte é o valor tangente, ou seja, um incremento de força é calculado em cada iteração e adicionado à força de corte da iteração anterior [30].

Quando a magnitude da força elástica normal excede a resistência à tração do contacto, as ligações desaparecem e todas as forças de contacto são anuladas. Por outro lado, se a resistência ao corte for excedida a ligação vai desaparecer, mas as forças de contacto permanecem e o modelo de atrito toma o lugar da ligação de contacto. O modelo de atrito define a força de corte máxima permitida, tendo em conta a força normal que atua sobre o contacto e o menor valor do coeficiente de atrito entre as duas partículas.

No modelo de contacto exposto apenas se contabiliza o atrito depois de uma ligação romper por corte, sendo que no modelo de Mohr-Coulomb a força de atrito e a coesão atuam em simultâneo. Enquanto os modelos de contacto de partículas atuam em pequena escala, o critério de Mohr-Coulomb é um modelo de comportamento que é consequência macroscópica da reação coletiva dos contactos entre partículas. O contacto partícula a partícula não pretende diretamente reproduzir a resposta entre as partículas da rocha, pois essa geralmente é bem representada pelo critério de Mohr-Coulomb.

Dois tipos de contactos bola-bola estão disponíveis no PFC: ligações de contacto e ligações paralelas. As ligações paralelas permitem a transmissão de momentos entre as bolas, e portanto, arranjos assim ligados demonstram uma ampla variedade de comportamentos. Estas ligações atuam em paralelo com ligações de contacto, de modo que a interação entre as partículas pode ser composta por ligações de contacto, ligações paralelas ou ambas.

Verificou-se que em condições elásticas, na modelação da transmissão de ondas, que as ligações paralelas não são necessárias e aumentam a complexidade para a calibração do modelo e interpretação de resultados. Assim, apenas são utilizadas ligações de contacto pontual, que tendo uma resposta individual simples, resultam em modelos macroscópicos mais previsíveis.

4.4. CICLO DE CÁLCULO

O método dos elementos discretos simula a interação e o movimento dos corpos cuja forma é limitada apenas pela capacidade do modelo para gerir as suas interações: polígonos, bolas ou esferas. O MED realiza o cálculo do tempo de movimento dos corpos sob influência das cargas e das forças de contacto [1]. Resolve também as equações de movimento de todos os blocos em cada passo de cálculo aplicando relações força-deslocamento em todos os contactos que deteta. O equacionamento deste método consiste na aplicação da segunda Lei de Newton, obtendo a aceleração de cada partícula a partir das forças que agem na mesma. Através da integração das acelerações obtém-se velocidades e deslocamentos e a aplicação das leis força-deslocamento nos contactos proporciona o cálculo das forças nos contactos devido aos deslocamentos relativos entre partículas [29].

Os contactos que existem entre duas bolas ou entre uma bola e uma parede são formados e quebrados automaticamente durante o curso de uma simulação. Nos casos em que não existe criação ou destruição de contactos, a parte referente à deteção dos mesmos pode ser desligada.

As duas principais fases de um ciclo de cálculo são: o cálculo das forças em ação, que inclui a gestão da interação entre os corpos, e a resolução das equações de movimento. A cada ciclo está associado um intervalo de tempo.

No início de cada iteração, o conjunto de contactos é atualizado a partir das posições conhecidas das partículas e da parede. A lei força-deslocamento é então aplicada a cada um dos contactos para atualizar as forças de contacto baseando-se no movimento relativo entre as duas entidades envolvidas. Em seguida, a lei do movimento é aplicada a cada partícula para atualizar a sua velocidade e a sua posição baseada na força resultante e no momento resultante das forças de contacto (Figura 4.3).

Os cálculos realizados dentro de cada uma das caixas da figura seguinte são realizados em paralelo, pois o conjunto de dados de entrada para cada caixa permanece fixo durante a execução dos cálculos no interior da mesma.

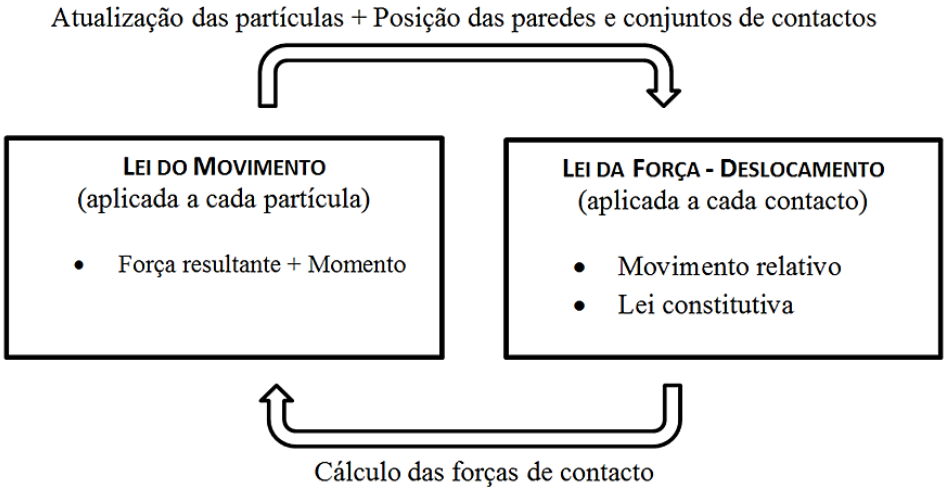


Fig. 4.3 – Ciclo de cálculo do PFC2D [adaptado de [30]]

4.5. GESTÃO DE CONTACTOS

Nesta secção descreve-se o cálculo das forças que atuam sobre os corpos, com especial ênfase na gestão de contactos entre os corpos e resolução de forças de contacto. O objetivo da gestão de contactos é encontrar pares de corpos em contacto e proceder ao cálculo das forças entre eles. Teoricamente, encontrar corpos que estão em contacto não é uma tarefa muito difícil, o principal problema reside no volume de cálculo necessário.

Os códigos Itasca empregam uma estratégia na qual o domínio é mapeado em células, sendo os contactos apenas procurados dentro destas. Para aumentar a eficiência, os corpos em repouso não são verificados uns em relação aos outros.

Diferentes corpos tocam-se de maneiras diferentes, por exemplo, em partículas poligonais podemos encontrar contactos vértice-face, face-face, aresta-face ou aresta-aresta. Existem formas para simplificar e representar estes tipos de contacto, por exemplo, os contactos face-aresta podem ser

representados por dois pontos de contacto, enquanto contactos face-face podem ser representados por três ou mais contactos (Figura 4.4).

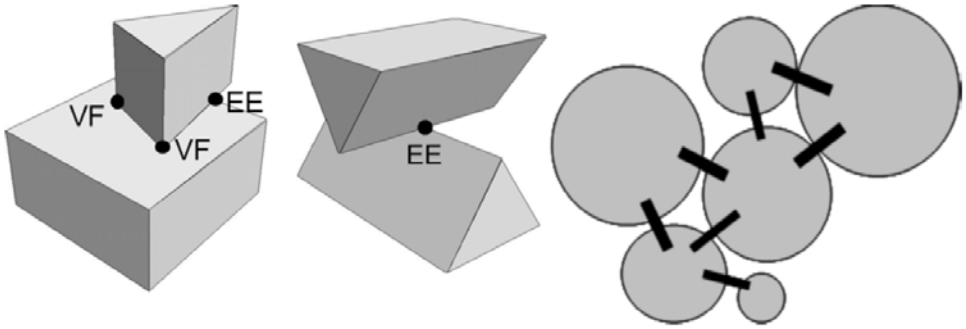


Fig. 4.4 – Contactos entre sólidos 3D e partículas circulares 2D [1]

Contactos entre partículas esféricas ou circulares são geometricamente muito mais simples. Quando as juntas rochosas são modeladas como um contacto entre as faces de dois blocos, os valores da rigidez e resistência podem ser tomados a partir de ensaios de laboratório ou ensaios in-situ e atribuídos aos contactos face a face, tendo em conta os efeitos do tamanho. Por outro lado, os parâmetros de contacto e os modelos de partículas não podem ser diretamente inferidos a partir de propriedades mensuráveis da rocha devendo as propriedades micromecânicas ser calibradas através de métodos indiretos, recorrendo a estratégias empíricas [1].

4.6. EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

Na secção anterior, foi explicada a determinação das forças atuantes no centro de massa, sendo esta secção dedicada à parte do ciclo em que as novas posições dos blocos ou partículas são determinadas. As forças anteriormente determinadas, agindo nos corpos de inércia linear e angular conhecida, irão causar aceleração, levando ao aumento ou diminuição da sua velocidade, de acordo com a segunda lei de Newton do movimento.

$$F_i = m\,\ddot{u}_i \qquad (4.4)$$

onde, F é a força de contacto, m é a massa da partícula, $\ddot{u}$ é a aceleração e o i representa as três direções das coordenadas.

Num instante t, a velocidade de um bloco é dada pela média das velocidades a meio dos intervalos de tempo anterior e posterior. Do mesmo modo é calculada a aceleração. Este algoritmo é versátil, podendo ser aplicado a problemas estáticos e dinâmicos, lineares e não-lineares. Comparado com os algoritmos iterativos, nos quais tem de ser assegurada a convergência a cada passo, tem a vantagem de ser independente em relação ao tipo de elementos empregues e aos modelos constitutivos dos contactos e dos materiais.

A maioria dos modelos MED recorre a técnicas explícitas como esta, para a integração das equações diferenciais do movimento [31]. Nas técnicas implícitas o equilíbrio conjunto do modelo é atingido no final do ciclo de cálculo. Esse cálculo é extenso e exige grande capacidade computacional, uma vez que requer a montagem e resolução de uma matriz global do modelo. Os métodos explícitos são normalmente usados na análise de problemas dinâmicos, cálculos incrementais e sistemas não lineares que envolvem grandes deslocamentos, tais como, alterações no modelo. A resolução de problemas estáticos é feita deixando o modelo encontrar o seu próprio estado de equilíbrio sob condições de limite estático e dinâmico e dissipando o excesso de energia através de amortecimento.

Um passo comum à maioria dos códigos baseados no MED é a integração das equações de movimento. Esta integração é feita através de um algoritmo de diferenças finitas. No MED, o sistema é estável se o intervalo de tempo é limitado ao menor período do sistema, que está associado á maior frequência de vibração. A Figura 4.5 representa um esquema do algoritmo de resolução utilizado no método dos elementos discretos.

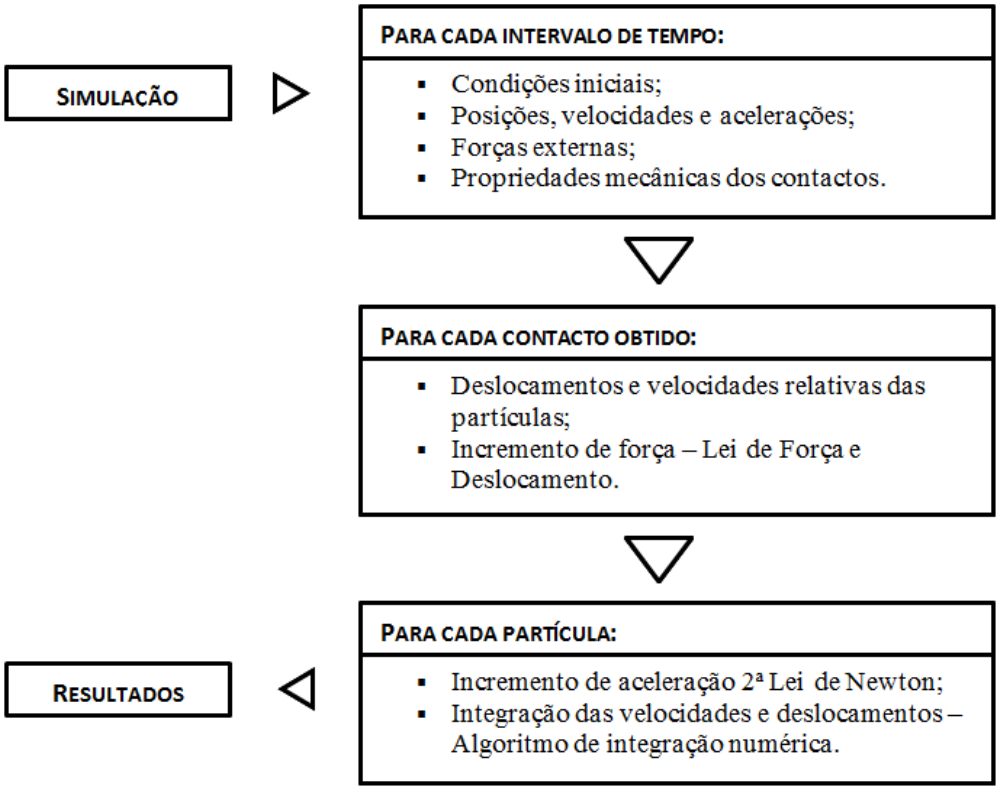


Fig. 4.5 – Algoritmo do Método dos Elementos Discretos [adaptado de [32]]

O amortecimento pode seguir dois objetivos distintos. Em cálculos estáticos, a parcela de amortecimento é responsável pela convergência do sistema ao provocar dissipação da energia de vibração de forma mais rápida de entre as várias estratégias possíveis. Quando o amortecimento não é incluído na equação de movimento, o modelo vibrará infinitamente, não alcançando uma solução estável.

Nos cálculos dinâmicos, o amortecimento simula a atenuação da onda de tensão material, tomando valores reais relacionados com as características dinâmicas dos materiais ou estruturas em causa. Assim, o MED para sistemas estáticos funciona como um método de relaxação dinâmico.

No PFC, três diferentes tipos de amortecimento estão disponíveis: amortecimento local, combinado e viscoso. O amortecimento local consiste na adição de uma força, contrária à velocidade da partícula que é somada a outras forças que atuam sobre a partícula. Isto traz algumas vantagens, nomeadamente o facto de apenas serem afetadas as partículas que se movam, sendo muito mais simples a calibração.

Nos casos onde haja movimento significativo de parte do corpo rígido do modelo, o amortecimento combinado, que resulta da combinação do amortecimento local com uma força proporcional à taxa de variação da força aplicada à partícula, fornece um método mais eficiente para alcançar a solução. Tal como o amortecimento local, o amortecimento combinado atua ao nível da equação do movimento. Por último, o amortecimento viscoso não atua na equação do movimento, mas ao nível dos contactos.

5
MODELAÇÃO ESTÁTICA DAS AMOSTRAS

5.1. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM MODELO PFC2D

Um modelo de partículas é criado para possibilitar a simulação de um problema físico, ou seja, com determinadas características que traduzam as respostas do maciço. Uma sequência de comandos introduzidos pelo utilizador define as condições do problema para solução numérica. A Figura 5.1 ilustra alguns dos componentes utilizados no PFC2D.

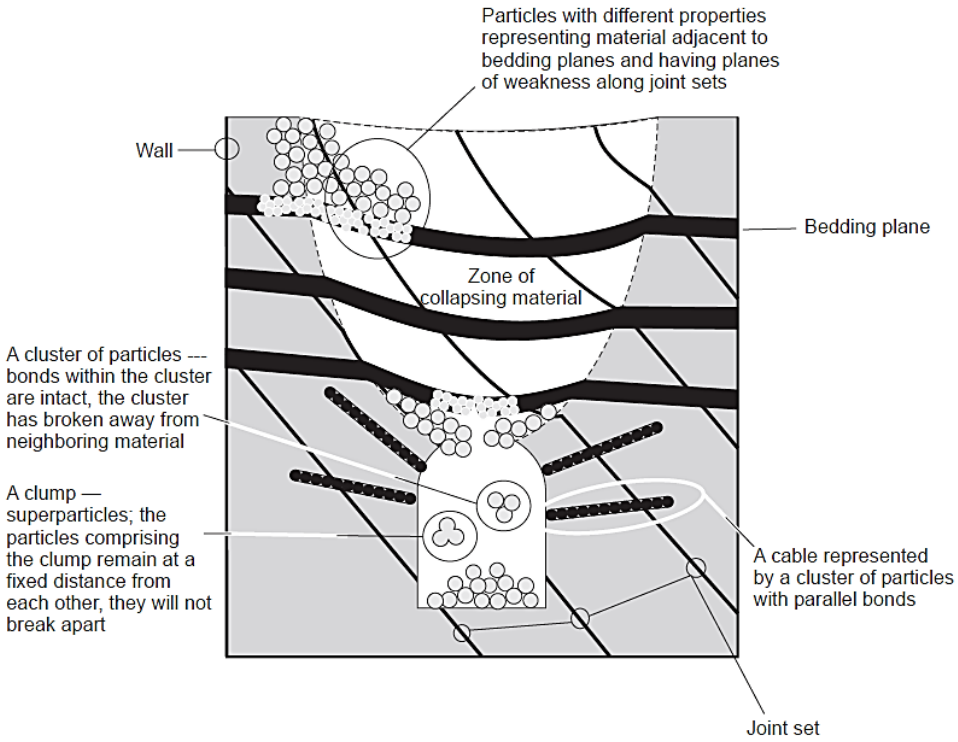


Fig. 5.1 – Exemplo de um modelo PFC2D com os tipos de partículas e suas utilizações [30]

O modelo é construído com partículas circulares (*balls*). A maior parte dos problemas são definidos por conjuntos de centenas a milhares de partículas dentro de uma região que vai ser analisada. A cada partícula e a cada parede (*wall*) são atribuídas propriedades que lhes conferem distintas formas de interação com o resto do meio. As paredes são utilizadas tanto para definir os limites de um modelo como também para auxiliar na geração e na compactação das bolas. Podem ser posicionadas para gerar aglomerados em diferentes regiões do modelo, e em seguida, podem ser eliminadas após a fase de geração estar completa. Velocidades para as paredes podem também ser especificadas.

Os contactos são criados quando duas bolas, ou uma bola e uma parede, interagem através de contactos pontuais. Por sobreposição ou justaposição de várias partículas, podem formar-se partículas de formas mais complexas (*clusters*). Estas conseguem suportar até um valor de tensão definido, quando esse valor é ultrapassado ocorre a fratura. Por outro lado, uma aglomeração de partículas com forças muito elevadas de interligação designa-se por "*clump*", estas comportam-se como um corpo rígido, de modo que nunca se separam, considerando-se então o "*clump*" como uma única partícula.

As descontinuidades num modelo podem representar características físicas, tais como juntas, falhas ou planos de estratificação no interior de um maciço rochoso. A solução estática no PFC2D é atingida quando a taxa de variação da energia cinética no modelo se aproxima de um valor pouco significativo. Isso é conseguido através do amortecimento nas equações de movimento. Para se obter a solução dinâmica, são resolvidas as equações dinâmicas de amortecimento incluindo os termos da inércia. Esta solução é afetada diretamente pela geração e dissipação de energia cinética. As soluções dinâmicas são necessárias para problemas que envolvam altas frequências e cargas de curta duração [30].

5.2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS PFC2D

Os modelos PFC2D devem satisfazer duas condições, que são verificadas em arranjos não organizados [27]:

- As partículas devem ser bem conectadas (uma partícula ligada com três ou mais partículas);
- O conjunto deve ser capaz de manter-se isotrópico com o aumento das tensões.

O PFC2D inclui uma linguagem de programação externa, FISH, permitindo ao utilizador total controlo nas entradas do programa, fornece também estruturas condicionais e cíclicas e permite acesso direto à estrutura de dados do código. Incluído no programa, existe ainda uma biblioteca de funções pré-construídas: FISHTANK. Esta permite que a função FISH crie conjuntos de partículas para modelar materiais coesivos e não coesivos [30].

Na definição do modelo a estudar é necessário por parte do utilizador a introdução dos seguintes dados: geometria da amostra, condições de fronteira e propriedades macroscópicas das partículas e contactos.

A geometria da amostra é definida pela altura e largura do provete, mas também pelo raio máximo e mínimo das partículas circulares. Esta relação deve ser próxima de 1,6 para se poder gerar uma porosidade de aproximadamente 16%. De facto, a porosidade das rochas em estudo é muito inferior a 16%, no entanto, os modelos gerados pelo PFC2D apresentam uma porosidade (área de vazios/ área total do provete) muito próxima desse valor. Contudo, de forma a empregar as propriedades dinâmicas corretas é necessário utilizar um valor de densidade mais elevado, para que a densidade média da amostra seja igual à experimental.

O procedimento utilizado para a criação de amostras de rochas duras consiste em cinco etapas sequenciais [30]:

- É gerado um domínio com as dimensões pretendidas limitado por paredes planas e preenchido com partículas cujos raios seguem uma distribuição uniforme limitados pelos valores superior e inferior definidos pelo utilizador. O número de partículas é calculado a fim de se atingir uma porosidade de aproximadamente 16%. Inicialmente as partículas são geradas com metade do seu raio final. Após a inserção de todas as partículas, o seu raio expande-se enquanto se dá a acomodação com as partículas vizinhas;
- A tensão média da amostra é medida e os raios das partículas são gradualmente reduzidos até ser atingido o estado de tensão pretendido;
- As partículas com menos de três contactos são expandidas de modo a criar uma rede densa de partículas bem conectadas;
- As ligações correspondentes às conexões com resistência à tração e ao corte são instaladas entre todas as partículas que se tocam ou estão suficientemente próximas;
- As paredes que confinam a amostra são apagadas permitindo a expansão das partículas, relaxando até que forças repulsivas (devido à interpenetração das partículas) e as ligações se equilibrem. Quando o equilíbrio final é alcançado, fica instalado um conjunto de forças autoequilibradas. Estas forças são muito menores que a resistência das ligações, para que a força total da matéria esteja disponível. A energia armazenada na amostra é libertada quando ocorre a rotura de ligações.

Este procedimento, um dos vários possíveis para geração de provetes, apresenta dois problemas: não funciona bem quando a amostra é muito delgada e torna-se muito demorado quando o número de partículas ultrapassa muitas dezenas de milhares [1]. Nesse caso existem soluções alternativas. A Figura 5.2 apresenta o resultado de cada um dos passos, de um modelo a duas dimensões.

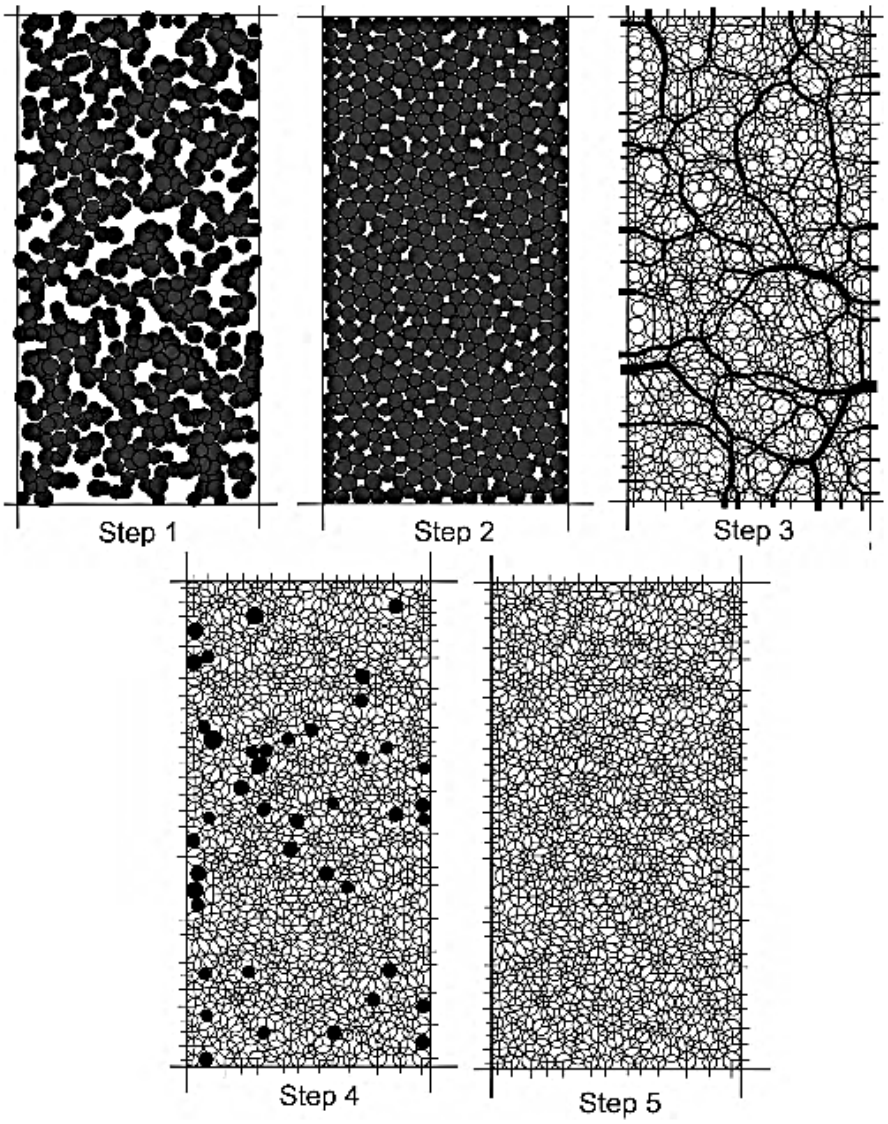


Fig. 5.2 – Representação das cinco fases de geração de um modelo de partículas 2D [30]

5.3. PROPRIEDADES MACROSCÓPICAS

Após a criação de uma amostra bem conectada em termos geométricos, as propriedades dos contactos têm de ser definidas. As propriedades mecânicas, na realidade, são definidas durante a criação do conjunto de partículas, mas pode-se considerar os processos independentes para maior clareza e uma compreensão mais fácil [1].

As propriedades de uma amostra de rocha são normalmente utilizadas tendo como objetivo a calibração do módulo de deformabilidade, do coeficiente de Poisson, da resistência à tração, da tensão inicial de rotura e da tensão na qual se inicia a dilatação [33].

Não é possível determinar as propriedades macroscópicas de uma amostra diretamente através da distribuição das propriedades micromecânicas, de modo que relações empíricas têm sido desenvolvidas entre as propriedades micro e macroscópicas com base na análise dimensional e em estratégias de otimização [34].

A Figura 5.3 representa curvas empíricas que relacionam a resistência normal e de corte dos contactos (parâmetros microscópicos) com o módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson estáticos (resposta macroscópica do modelo).

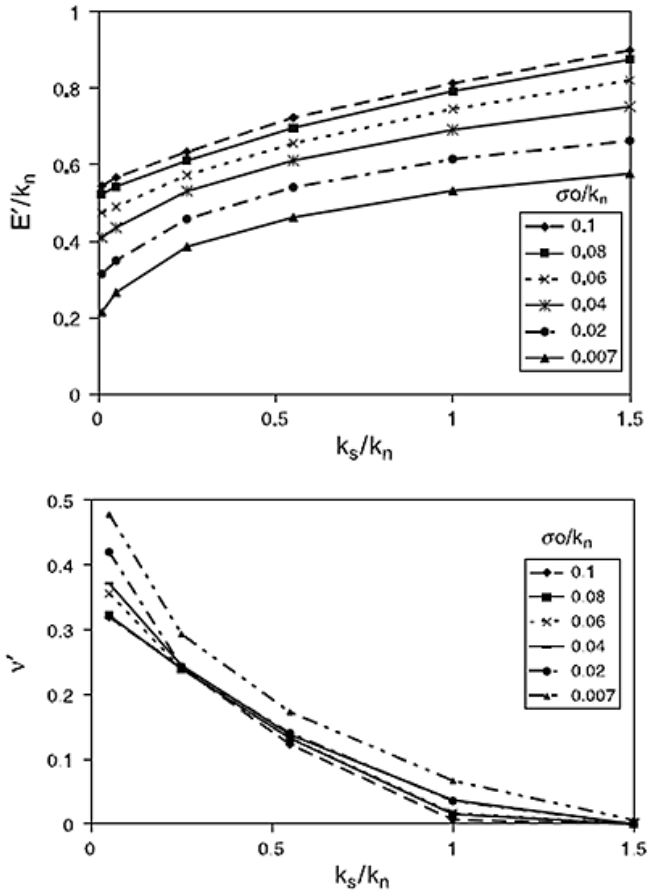


Fig. 5.3 – Curvas empíricas para determinação do módulo de deformabilidade normalizado e do coeficiente de Poisson [35]

O processo de calibração das propriedades mecânicas macroscópicas foi exaustivamente testado e verificou-se que fornece soluções económicas (em termos de tempo de computação) e fiáveis para gerar amostras de boa qualidade. Os parâmetros que definem a resposta elástica de uma amostra são a rigidez normal e de corte dos contactos e o tipo de ligação.

O processo de calibração decorre em cinco etapas, as quais são apresentadas de seguida [1]:

- Definem-se os valores de resistência do contacto para valores muito altos, de modo a que não ocorram roturas durante a calibração das propriedades elásticas. O módulo de deformabilidade é definido principalmente pela rigidez normal do contacto, mantendo a relação entre a rigidez normal e de corte constante. Quando se obtém um módulo de deformabilidade aceitável a rigidez normal é mantida constante, ajustando-se a rigidez de corte até se atingir o coeficiente de Poisson pretendido. Pode ser necessário reajustar a rigidez normal se a relação inicial variar muito. Aqui termina a calibração das propriedades elásticas.

- A resistência à compressão não confinada é definida pela variação da resistência à tração e ao corte dos contactos, mantendo nulo o seu desvio padrão. Para diminuir o número de parâmetros a calibrar a relação entre a tensão e a resistência ao corte do contacto pode ser mantida.
- A tensão a que se iniciam as micro-roturas do modelo é definida pelo aumento gradual do desvio padrão da resistência do contacto.
- O comportamento pós-pico (resposta frágil a dúctil) é definido pela variação do coeficiente de atrito entre as partículas.
- Finalmente, o limite de resistência pode ser determinado através da realização de ensaios biaxiais com diferentes tensões de confinamento. A resistência à tração pode ser determinada com a realização de um ensaio brasileiro numa amostra circular.

Duas amostras sintéticas geradas utilizando exatamente a mesma sequência de comandos, terão propriedades ligeiramente diferentes, pois há aleatoriedade na geração das partículas e na distribuição das micro-propriedades. A diferença entre uma amostra sintética e as restantes está no facto da aleatoriedade da montagem que não existe num modelo contínuo homogéneo. O raio das partículas tem pouca influência nas propriedades estáticas desde que as partículas permaneçam com dimensões muito inferiores à menor dimensão da amostra [24].

As amostras geradas no decorrer deste trabalho, foram criadas com propriedades estáticas bem definidas onde posteriormente se efetuaram medições das velocidades de propagação das ondas sísmicas, por isso, apenas foi utilizado a primeira fase do processo de calibração.

5.4. Relação entre Propriedades Micro e Macroscópicas

Em geral, as partículas num modelo PFC2D podem ser ligadas umas às outras quer por ligações de contacto, ligações paralelas, ou ambos os tipos de ligações. As relações usadas para os materiais não ligados (materiais granulares) são basicamente um subconjunto das utilizadas para os materiais ligados por ligações de contacto.

Os parâmetros microscópicos que caracterizam um material no PFC2D podem ser divididos em micro-parâmetros que influenciam a resposta a curto prazo e micro-parâmetros que influenciam a resposta a longo prazo. A resposta a curto prazo das ligações de contacto, das ligações em paralelo e de materiais não ligados pode ser controlada pelos parâmetros microscópicos [30].

Para caracterizar uma ligação de contato no material são necessários cinco micro-parâmetros, oito micro-parâmetros para caracterizar um material ligado em paralelo, e quatro micro-parâmetros para caracterizar um material granular não ligado. De forma a criar um material sintético que exiba a curto prazo um conjunto de respostas macroscópicas, independentes do tamanho das partículas, é preciso definir as propriedades microscópicas dos modelos no PFC2D usando algumas relações.

O procedimento de especificação das propriedades microscópicas requer relacionar a deformabilidade e a resistência dos micro-parâmetros (rigidez das partículas e das suas ligações, coeficientes de atrito e forças de ligação entre partículas) correspondendo ao conjunto de respostas macroscópicas (constantes elásticas, ângulo de atrito do material e resistência de pico das partículas).

5.4.1. Especificação dos Parâmetros Microscópicos

O seguinte conjunto de parâmetros microscópicos caraterizam uma ligação de contacto no material, e são de seguida apresentados [30]:

- E_c
- K_n/K_s
- μ
- σ_c (média e desvio padrão)
- τ_c (média e desvio padrão)

em que E_c representa o módulo de Young de cada contacto partícula-partícula, K_n/K_s a razão entre a rigidez normal e de corte das partículas, μ o coeficiente de atrito das partículas e σ_c e τ_c são respetivamente a resistência normal e de corte dos contactos no material entre duas partículas unidas por uma ligação de contacto.

5.4.2. Deformabilidade

As relações da deformabilidade aqui descritas dizem respeito a contactos partícula-partícula e contactos parede-partícula. Portanto, aplicam-se tanto aos contactos de materiais ligados mas também aos materiais não ligados. A relação entre a rigidez normal e de corte dos contactos e o módulo de Young dos contactos, que é diferente (geralmente maior) que o módulo de Young do conjunto de partículas, numa ligação de contacto simples para um modelo PFC2D é a explicitada pela expressão seguinte [30]:

$$K_n = K_s = 2 \times E_c \qquad (5.1)$$

onde K_n e K_s são respetivamente a rigidez normal e de corte dos contactos, e E_c é o módulo de Young dos contactos. A expressão (5.1) mostra que a duas dimensões, o E_c numa ligação de contacto simples é diretamente proporcional à rigidez das partículas, mas é independente do raio da partícula.

Um modo consistente de definição dos parâmetros microscópicos da deformabilidade consiste em especificar em primeiro lugar o módulo de Young para cada contacto partícula-partícula (E_c), e em segundo lugar a razão entre a rigidez normal e de corte das partículas (K_n/K_s). Os valores de rigidez normal e de corte para cada partícula podem então ser determinados, usando a expressão (5.1) para calcular K_n, dividindo depois este valor pela razão K_n/K_s para calcular K_s.

5.4.3. Procedimento de Geração das Amostras

As entradas, “inputs”, no processo de criação de uma amostra podem ser divididas primeiramente naquelas que controlam a criação da amostra (Tabela 5.1) e seguidamente nas que definem o material no PFC2D (Tabela 5.2). Os parâmetros microscópicos utilizados para caracterizar a resposta do material sintético a curto prazo são apresentados no ponto (5.4.1.) do presente trabalho.

De notar que a porosidade da amostra não pode ser especificada na criação dos conjuntos ligados de partículas, porque o conjunto é ajustado automaticamente logo na primeira fase do procedimento de criação da amostra. Portanto, posteriormente a porosidade dos conjuntos de partículas ligadas pode ser aumentada através da supressão de partículas da amostra densa, produzida pelo procedimento anterior. Pelo contrário, é possível especificar a porosidade na criação de amostras de partículas não ligadas.

Tabela 5.1 – Parâmetros que controlam o processo de criação da amostra no PFC2D [30]

Parâmetros	Descrição dos Parâmetros	Designação FISH
h	Altura da Amostra [m]	et2_ylen
w	Largura da Amostra [m]	et2_xlen
R_{min}	Raio Mínimo das Partículas [m]	et2_rlo
R_{max}/R_{min}	Razão entre Raio Máximo e Raio Mínimo [-]	et2_radius_ratio
β	Rigidez Normal da Parede [-]	md_wEcfac
σ_0	Tensão Isotrópica [Pa]	tm_req_isostr
N_f	Número Mínimo de Contactos [-]	flt_def

Tabela 5.2 – Parâmetros microscópicos que definem as ligações de contacto no material da amostra no PFC2D [30]

Parâmetros	Descrição dos Parâmetros	Designação FISH
ρ	Densidade das Partículas [kg/m^3]	md_dens
E_c	Módulo de Contacto Partícula-partícula [Pa]	md_Ec
K_n/K_s	Relação entre a Rigidez Normal e de Corte das Partículas [-]	md_knoverks
μ	Coeficiente de Atrito das Partículas [-]	md_fric
σ_c (média)	Valor da Resistência Normal dos Contactos, média [Pa]	cb_sn_mean
σ_c (des.pad.)	Valor da Resistência Normal dos Contactos, desvio padrão [Pa]	cb_sn_sdev
τ_c (média)	Valor da Resistência Corte dos Contactos, média [Pa]	cb_ss_mean
τ_c (des.pad.)	Valor da Resistência Corte dos Contactos, desvio padrão [Pa]	cb_ss_sdev

5.5. Demonstração de Exemplos das Aplicações dos Códigos PFC2D

Serão aqui apresentados dois exemplos para ilustrar o procedimento e a aplicabilidade empregue pelos modelos através dos códigos de elementos discretos PFC2D, na resolução de problemas na Mecânica das Rochas. A modelação do comportamento das rochas neste trabalho foi feita recorrendo a ensaios de compressão uniaxial, porém, os códigos PFC2D permitem também proceder à modelação através de ensaios biaxiais e testes brasileiros. Apesar dos ensaios biaxiais não serem usados nos estudos do presente trabalho, serão de seguida brevemente apresentados. Juntamente serão também expostos os ensaios de compressão uniaxial.

5.5.1. Exemplo Geral de um Ensaio de Compressão Uniaxial

O presente exemplo diz respeito à simulação do comportamento mecânico de uma amostra de rocha de tamanho padrão sob compressão uniaxial até à obtenção de uma curva tensão-deformação que representa a desagregação estrutural da amostra, sem aplicação lateral de uma pressão confinante. A Figura 5.4 mostra a configuração do teste.

Assume-se que os testes foram realizados com uma máquina de testes controlada, tendo como variável de controlo a taxa de deformação axial. A velocidade de carga aplicada foi de 0,2 m/s. O modelo 2D simulado contém cerca de 3600 partículas rígidas de forma circular e de tamanho uniforme.

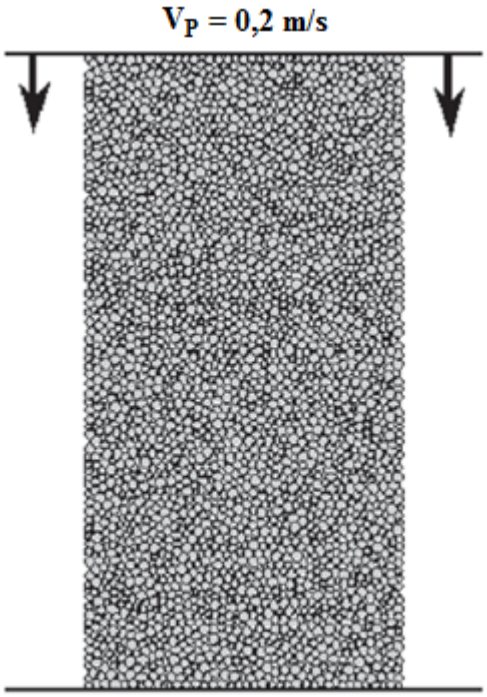


Fig. 5.4 – Simulação de um ensaio de compressão uniaxial num modelo PFC2D [adaptado de [16]]

As alterações graduais da configuração da amostra, a evolução das fendas e o desenvolvimento das forças de contacto nas diferentes fases do processo, juntamente com as curvas tensão-deformação são apresentadas nas Figuras 5.5 a 5.8. Os parâmetros introduzidos inicialmente no modelo PFC2D estão listados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros do modelo PFC2D correspondentes às propriedades para calibração da rocha [adaptado de [16]]

Parâmetros	Descrição dos Parâmetros	Valores
R_{min}	Raio Mínimo das Partículas [m]	$5{,}0\times10^{-4}$
R_{max}	Raio Máximo das Partículas [m]	$8{,}3\times10^{-4}$
E_c	Módulo de Contacto Partícula-Partícula [Pa]	$1{,}1\times10^{11}$
K_n/K_s	Relação entre a Rigidez das Partículas [-]	5
μ	Coeficiente de Atrito das Partículas [-]	0,2
σ_c	Resistência Normal dos Contactos [Pa]	$6{,}0\times10^{8}$
τ_c	Resistência de Corte dos Contactos [Pa]	$6{,}0\times10^{8}$

As propriedades calibradas da rocha no PFC2D e a comparação com dados de ensaios de laboratório estão representadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Propriedades calibradas pelo PFC2D e comparação com dados obtidos de ensaios de laboratório [adaptado de [16]]

Propriedades Macroscópicas da Rocha	Dados de Ensaio de Laboratório	Dados Calibrados PFC2D
Módulo de Young [GPa]	68	57,51
Coeficiente de Poisson [-]	0,24	0,27
Resistência à Compressão Simples [MPa]	214	190,67
Tensão de Início de Fissuração [MPa]	121	136,82

Pode ser visto que, embora existam discrepâncias pequenas a moderadas entre os parâmetros medidos e simulados no sistema de partículas, a abordagem do PFC2D é capaz de fornecer uma estimativa quantitativa das propriedades mecânicas das rochas e fornecer a simulação completa das curvas tensão-deformação, uma tarefa que se revela difícil para os modelos contínuos.

As microfissuras nas amostras de rocha aparecem muito antes de alcançada a força de compressão uniaxial de pico, frequentemente estas começam a ocorrer quando está aplicada 70% dessa força.

Com o carregamento contínuo obtiveram-se as curvas tensão-deformação completas, para o caso de um aumento contínuo na deformação conforme determinado pela utilização da taxa de deformação axial como variável de controlo, e conforme ilustrado nas figuras seguintes com demonstração clara do desenvolvimento de padrões de fissuração progressiva interna, e de rotura final nas diferentes fases de deformação, de modo que, depois de ultrapassada a força de compressão uniaxial de pico as amostras perdem a sua integridade mecânica e tornam-se estruturas de falha em vez sólidos contínuos.

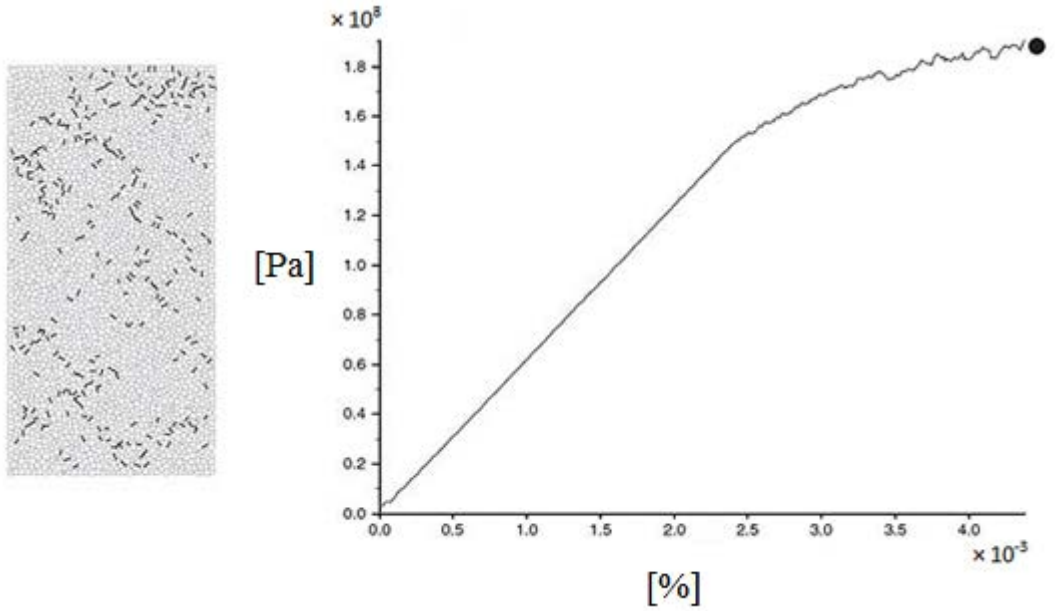


Fig. 5.5 – Microfissuras geradas na amostra no PFC2D e respetiva curva tensão-deformação [16]

A figura anterior mostra as microfissuras distribuídas aleatoriamente no modelo PFC2D, antes de alcançada na amostra de rocha a força de compressão uniaxial de pico. Os segmentos representados a negro no modelo indicam as localizações de iniciação da fissuração. O ponto negro no final da curva tensão-deformação indica o estado final da amostra sobre essa mesma curva. O eixo vertical diz respeito à tensão de compressão axial média e o eixo horizontal à deformação axial média.

A Figura 5.6 mostra as fissuras no modelo PFC2D na fase de pós pico do carregamento na amostra, para as mesmas condições de fronteira.

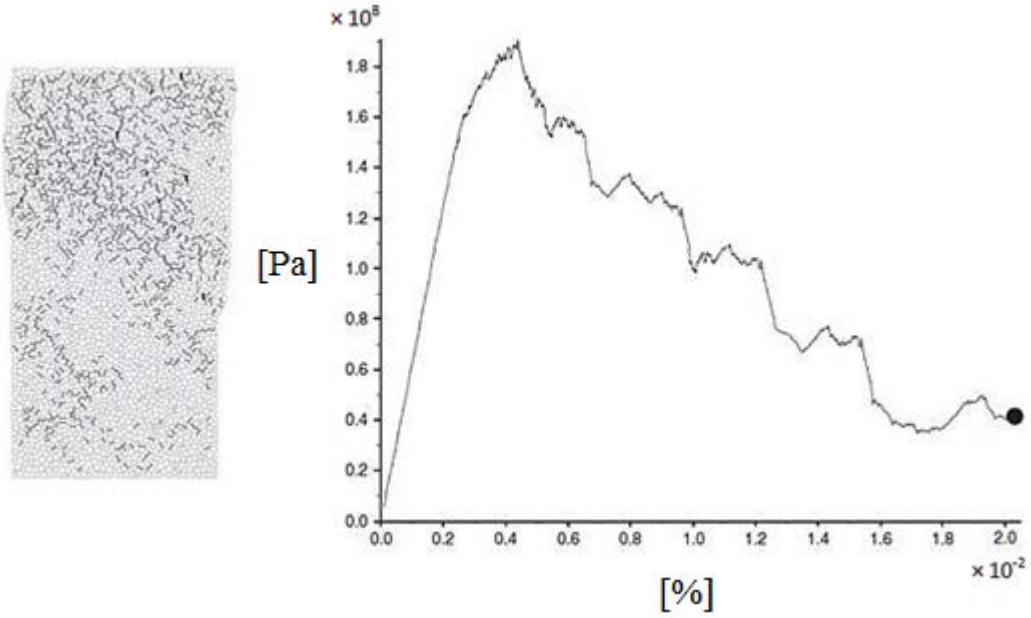


Fig. 5.6 – Fissuras na amostra gerada no PFC2D e respetiva curva tensão-deformação [16]

De seguida apresenta-se a distribuição das forças de contacto no modelo PFC2D, antes de alcançada a força de compressão uniaxial de pico na amostra. A negro estão representadas as forças de contacto de compressão e a cinza as forças de contacto de tração. Verifica-se a presença de forças de contacto dominantes de compressão, com distribuição homogénea na direção vertical, sem concentração visível de fissuras (Figura 5.7).

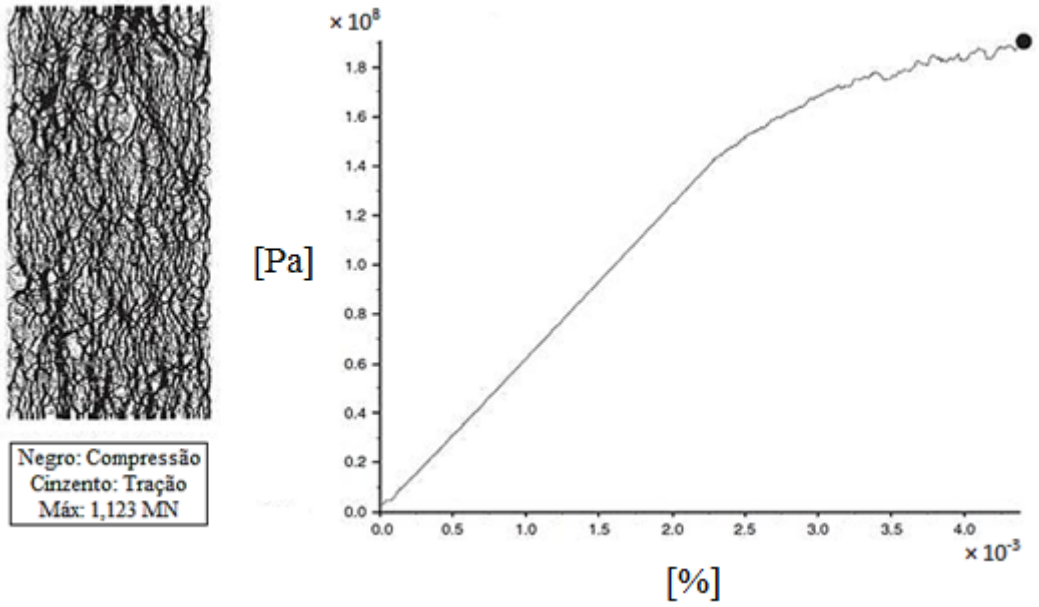


Fig. 5.7 – Distribuição das forças de contacto no modelo PFC2D antes de alcançada a força de compressão uniaxial de pico na amostra, e respetiva curva tensão-deformação [16]

Do mesmo modo, apresenta-se a distribuição das forças de contacto, na fase de pós pico de carregamento da amostra, confirmando-se claramente a concentração de fissuras (Figura 5.8).

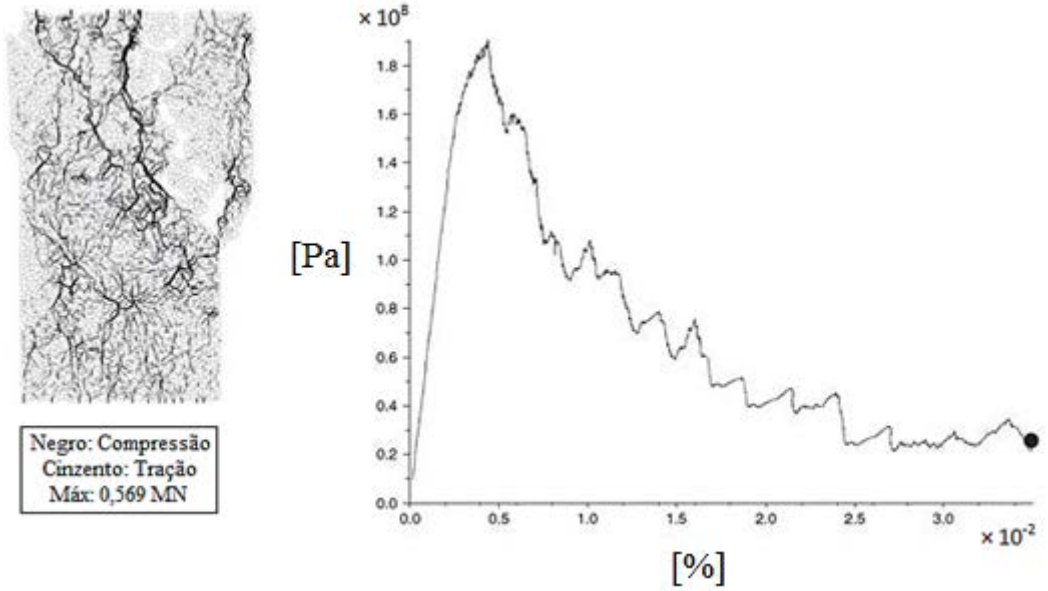


Fig. 5.8 – Distribuição das forças de contacto no modelo PFC2D na fase de pós pico de carregamento da amostra e respetiva curva tensão-deformação [16]

5.5.2. Exemplo Geral de um Ensaio Biaxial

Os códigos de elementos discretos PFC2D permitem proceder à modelação de rochas através de ensaios biaxiais, que fornecem, entre outras propriedades, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson para um determinado nível de confinamento. Estes ensaios são realizados numericamente e são concebidos para simular ensaios similares aos de laboratório, sendo portanto necessário que as propriedades simuladas sejam próximas da realidade. Nos ensaios biaxiais são aplicados carregamentos em duas direções numa amostra, sendo medida a variação de deformação lateral e axial da mesma.

Os manuais do PFC2D fornecem exemplos de testes biaxiais e funções de suporte FISH (linguagem interna de programação do PFC2D) que permitem o encadeamento das ações e a definição dos processos. Para que a modelação seja completa e todos os parâmetros sejam definidos os manuais sugerem o seguinte encadeamento [30]:

- Definição dos objetivos do modelo;
- Descrição do agregado, definindo o conjunto de partículas, o tipo de contacto e o estado inicial de equilíbrio;
- Execução de modelos simples, de modo a verificar a sua funcionalidade;
- Definição dos parâmetros específicos do modelo: geometria, condições iniciais e solicitações;
- Avaliação do nível de detalhe dos modelos, percebendo a sua influência no tempo de computação e nos resultados fornecidos;
- Realização dos cálculos;
- Apresentação e discussão dos resultados.

Seguidamente expõe-se um exemplo gráfico, baseado no manual do PFC2D, de maneira a demonstrar o modo de funcionamento de um ensaio biaxial, com recurso ao código de elementos discretos de partículas. São detalhadas na tabela seguinte, as propriedades empregues no modelo.

Tabela 5.5 – Propriedades utilizadas no exemplo do ensaio biaxial [adaptado de [30]]

Descrição do Parâmetros	Valores
Dimensões da Amostra [cm]	12,0 × 6,0
Diâmetro Mínimo das Partículas [mm]	0,75
Diâmetro Máximo das Partículas [mm]	1,0
Densidade das Partículas – ρ [kg/m^3]	1000
Rigidez Normal dos Contactos – K_n [N/m]	5×10^8
Rigidez Tangencial dos Contactos – K_s [N/m]	5×10^8
Rigidez das Paredes – K_w [N/m]	5×10^7
Tensão de Confinamento [MPa]	1,0
Coeficiente de Atrito entre Partículas – μ [-]	0,25

As paredes superior e inferior simulam placas de carga, e as paredes esquerda e direita simulam o confinamento experimentado pelos lados da amostra. Esta é carregada com deformação controlada, sendo especificadas as velocidades das paredes superior e inferior. Durante todas as fases do teste, as velocidades das paredes esquerda e direita são controladas automaticamente por um mecanismo numérico, implementado através de uma função FISH, que mantém a tensão de confinamento constante dentro da amostra [30].

As paredes utilizadas para confinar e carregar a amostra são mais longas do que necessário, pois durante o teste estas movem-se e é necessário que as partículas se encontrem sempre confinadas. O facto das paredes se intersetarem não apresenta qualquer complicação, pois estas apenas interagem com as partículas, e não entre si (Figura 5.9).

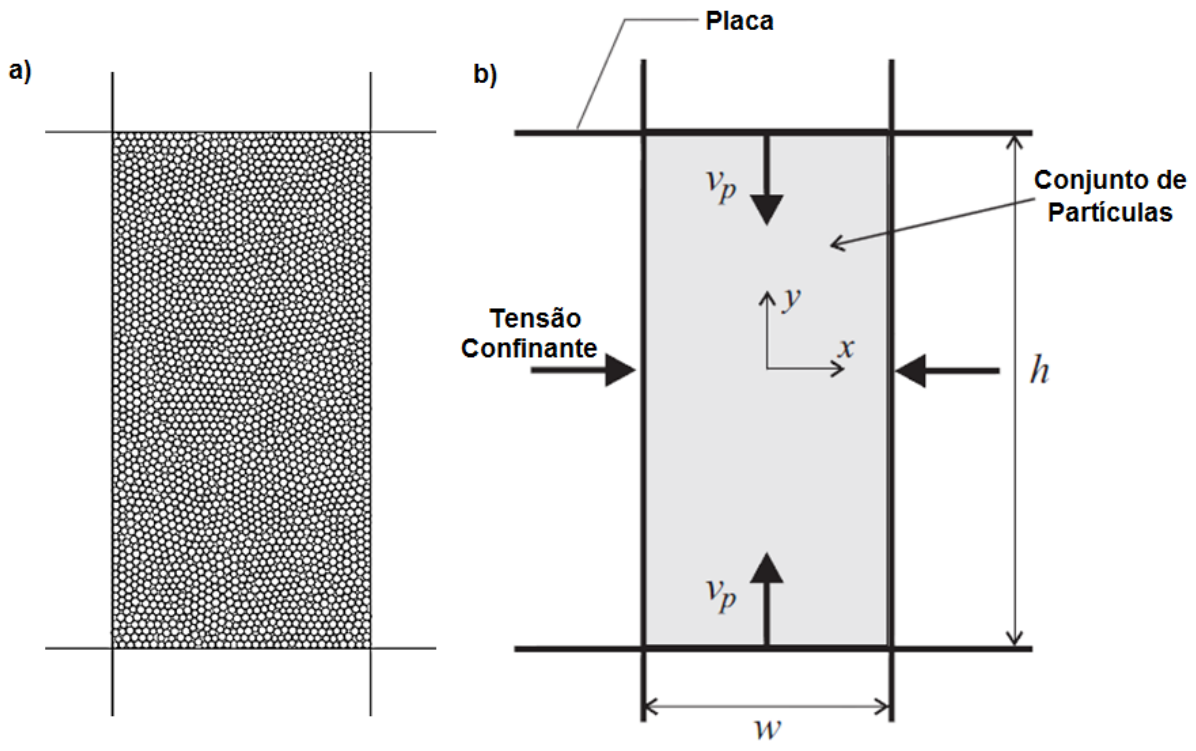


Fig. 5.9 – Configuração inicial das partículas para um ensaio biaxial no PFC2D (a), esquema de um ensaio biaxial (b) [adaptado de [30]]

No PFC2D não é possível explicitar as tensões a aplicar pelas paredes, podendo ser introduzidos ficheiros de dados que implementam um procedimento para calcular e controlar o estado de tensão na amostra, garantindo que a tensão seja a mais próxima possível da pretendida. As tensões são calculadas fazendo a média das tensões que atuam em paredes opostas. As tensões e deformações sofridas pela amostra são determinadas de forma macroscópica, somando as forças que atuam sobre a amostra, e a distância relativa entre as paredes apropriadas.

A expressão 5.2 pode ser usada para calcular as deformações da amostra (ε) em ambas as direções:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{\frac{1}{2}(L + L_0)} \qquad (5.2)$$

sendo L o comprimento atual da amostra na direção correspondente e L_0 o comprimento original da amostra também nessa direção. A altura e largura atual da amostra são usadas para ambos os cálculos da tensão e deformação.

Durante a execução dos testes podem ser medidas algumas variáveis no interior da amostra, tais como: tensão de desvio, tensão de confinamento, extensão volumétrica e extensão axial. A partir destas variáveis, a equação 5.3 permite o cálculo do módulo de deformabilidade:

$$E = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\varepsilon_a} = \frac{\Delta\sigma_d}{\Delta\varepsilon_a} \qquad (5.3)$$

e a equação 5.4 permite o cálculo do coeficiente de Poisson:

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_x}{\Delta\varepsilon_a} = 1 - \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\varepsilon_a} \qquad (5.4)$$

em que, E é o módulo de deformabilidade, ν é o coeficiente de Poisson, $\Delta\sigma_a$ representa a variação da tensão axial, $\Delta\sigma_d$ a variação da tensão de desvio, $\Delta\varepsilon_a$ é a variação da extensão axial, $\Delta\varepsilon_v$ a variação da extensão volumétrica e por fim $\Delta\varepsilon_x$ é a variação da extensão na direção de x.

A realização de testes carga/descarga sob condições elásticas (forças de ligação e fricção elevadas) permitem determinar as propriedades elásticas da amostra. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram a evolução de algumas das variáveis apresentadas atrás, onde as linhas exibidas correspondem, uma ao ciclo de carga e a outra ao ciclo de descarga. As pequenas diferenças entre os dois ciclos devem-se fundamentalmente ao arranjo entre as partículas que constituem a amostra. Estas figuras foram extraídas com recurso ao comando *plot history* do PFC2D.

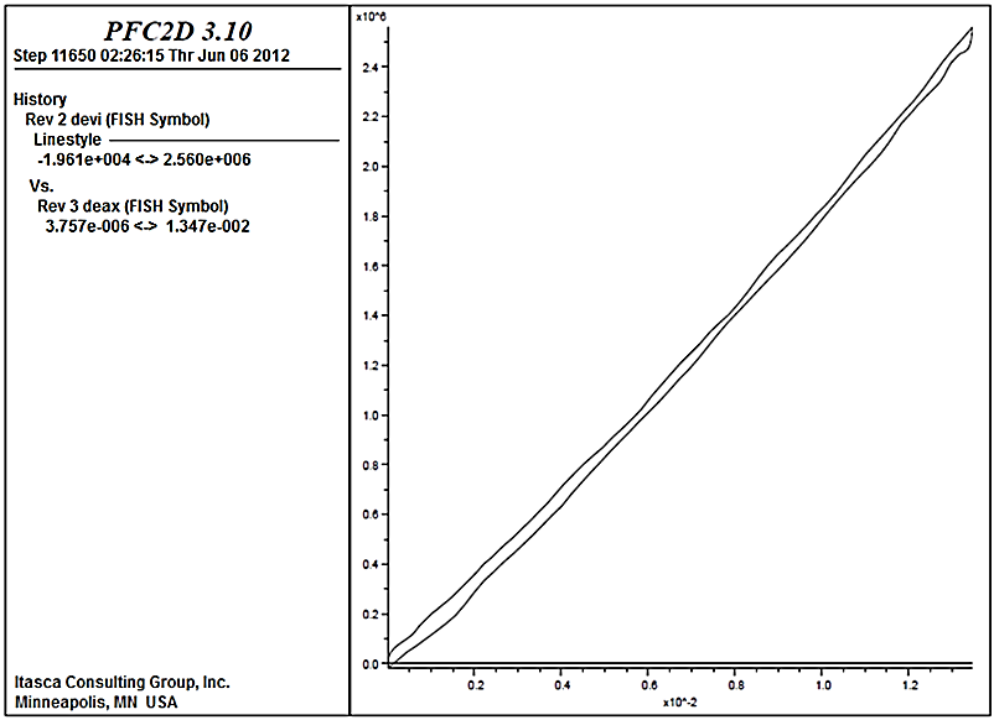


Fig. 5.10 – Tensão de desvio [Pa] vs extensão axial [%]

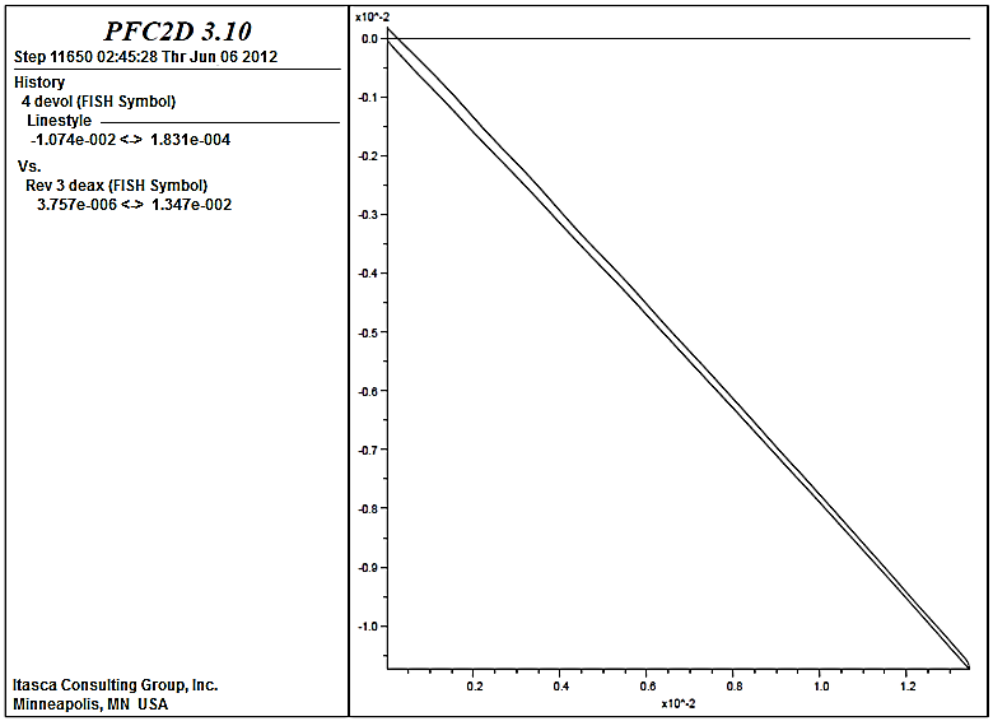


Fig. 5.11 – Extensão volumétrica [%] vs extensão axial [%]

5.6. GERAÇÃO DOS MODELOS EM ESTUDO

As amostras em estudo no presente trabalho, têm as dimensões de 50×100 mm^2 (base × altura). Estas medidas na fase inicial da modelação, foram as que forneceram os melhores valores para o estudo a efetuar. Foram empregues partículas com raio mínimo de 0,25 mm. Verificou-se que um modelo com este nível de detalhe é adequado para representar as características básicas do mesmo sob carregamentos estáticos e dinâmicos, podendo ser controlado inteiramente por um computador normal.

Portanto, optou-se por um modelo representando uma amostra de rocha sintética de granito, com dimensões semelhantes às amostras utilizadas em laboratório. Assim, o primeiro passo consistiu na criação de um conjunto de partículas com propriedades que se assemelham a um granito típico.

Uma limitação da presente simulação é que ela é realizada a duas dimensões, sendo uma representação grosseira do problema real. As razões que levam a esta escolha relacionam-se com o "custo" computacional, pois a execução tridimensional é sempre mais demorada. De qualquer modo, as representações das amostras a duas dimensões conseguem reproduzir a maioria dos mecanismos que ocorrem nas rochas.

As amostras de partículas ligadas que serão aqui descritas são usadas inicialmente em testes estáticos e posteriormente também em testes dinâmicos. São compostas por cerca de 12.000 partículas com raios que variam de modo uniforme entre 0,250 e 0,415 mm, com valor médio de 0,332 mm (o raio máximo é cerca de 1,66 vezes maior que o raio mínimo).

A densidade das bolas está definida como 2941 kg/m^3, tendo em conta que a porosidade da amostra é de cerca de 16 %, a porosidade equivalente contínua é cerca de 2500 kg/m^3. Este último valor da densidade é apenas relevante para a parte dinâmica do estudo, pois o peso próprio não é considerado no cálculo estático.

Por definição, quando os valores da resistência normal e de corte das partículas são iguais ($\sigma_c = \tau_c$) são possíveis tanto roturas por microfissuras de tração como microfissuras por corte. Se for excluída a falha por microfissuras de tração (definindo σ_c como infinito) então as fissuras não se localizarão num único plano macro fraturado sob carregamento total [24].

Uma vez que este mecanismo de localização ocorre nos granitos, a rotura de contactos por microfissuras de tração é permitida. Portanto nas amostras de granito usadas no presente estudo, definiu-se ($\sigma_c = \tau_c$) de forma a não se excluírem os mecanismos que apenas podem ser ativados através da rotura por microfissuras de corte.

As propriedades elásticas do material são influenciadas pela rigidez normal e tangencial dos contactos. O módulo de deformabilidade relaciona-se diretamente com o valor de K_n e o coeficiente de Poisson relaciona-se com a relação K_n/K_s. Assim, quando existe a necessidade de aproximar o módulo de Young a um valor desejado, é necessário calibrar a rigidez normal e tangencial em conjunto. Posteriormente, para aproximar o coeficiente de Poisson é necessário ajustar a relação K_n/K_s. O ângulo de atrito entre as partículas define as propriedades de resistência e deformação na rotura [30].

No decorrer deste trabalho foram numa primeira fase geradas trinta amostras variando o módulo de contacto partícula-partícula (E_c) e a razão entre a rigidez das partículas (K_n/K_s) mantendo todos os restantes parâmetros. Na Tabela 5.6 apresentam-se os parâmetros e os valores usados para a criação das diversas amostras no PFC2D.

Tabela 5.6 – Parâmetros e respetivos valores usados para a geração das amostras no PFC2D

Dimensões do Provete		
Designação FISH	**Descrição dos Parâmetros**	**Valores**
et2_xlen	Largura da Amostra – X [m]	50×10^{-3}
et2_ylen	Comprimento da Amostra – Y [m]	100×10^{-3}
Geometria da Assemblagem de Bolas		
Designação FISH	**Descrição dos Parâmetros**	**Valores**
et2_radius_ratio	Relação entre Raio Máximo e Mínimo – R_{max}/R_{min} [-]	1,66
et2_rlo	Raio Mínimo das Partículas – R_{min} [m]	$2{,}5\times10^{-4}$
Parâmetros Auxiliares		
Designação FISH	**Descrição dos Parâmetros**	**Valores**
md_wEcfac	Rigidez Normal da Parede – β [-]	1.1
tm_req_isostr	Tensão Isotrópica – σ_0 [Pa]	$1{,}0\times10^{6}$
flt_def	Número Mínimo de Contactos – N_f [-]	3
Propriedades dos Contactos e das Bolas		
Designação FISH	**Descrição dos Parâmetros**	**Valores**
md_dens	Densidade das Partículas – ρ [kg/m^3]	2941,18
md_Ec	Módulo de Contacto Partícula-Partícula – E_c [Pa]	35×10^{9}
		40×10^{9}
		45×10^{9}
		50×10^{9}
		60×10^{9}
md_knoverks	Razão entre a Rigidez das Partículas – K_n/K_s [-]	1,0
		1,66
		2,0
		2,5
		3,0
		3,5
md_fric	Coeficiente de Atrito das Partículas – μ [-]	0,50
cb_sn_mean	Valor da Resistência Normal dos Contactos – σ_c [Pa]	50×10^{6}
cb_ss_mean	Valor da Resistência de Corte dos Contactos – τ_c [Pa]	50×10^{6}

Nas Figuras 5.12 e 5.13 mostra-se a configuração de uma das amostras e respetiva pormenorização das partículas geradas pelo PFC2D. O exemplo representado diz respeito aos valores de E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 3,0 sendo que todos os valores dos outros parâmetros se mantiveram tal como estão representados na tabela anterior. Identicamente, na Figura 5.14 expõe-se a pormenorização das ligações de contacto que ocorrem entre as partículas nesta amostra, e nas Figuras 5.15 e 5.16 apresentam-se respetivamente a distribuição das forças de contacto entre as partículas no início e no fim do teste. Representado a vermelho estão as forças respetivas à tração e a negro as forças correspondentes à compressão. O maior número de forças de contacto entre as partículas na zona inferior da amostra representada na Figura 5.15 deve-se ao peso próprio desta.

A resposta tensão-deformação da amostra é representada na Figura 5.17 que exibe a tensão axial versus a deformação axial. Durante o ensaio, a taxa de carregamento deve ser suficientemente lenta para assegurar que a amostra permanece em equilíbrio quase estático. A adequação desta taxa pode ser verificada parando as placas de carregamento e observando que a carga nestas permanece constante. Uma verificação mais adequada pode ser conseguida controlando o trabalho realizado pelas placas e comparando-o com a energia de deformação armazenada no conjunto de partículas. A igualdade entre estas duas grandezas de energia, durante a fase elástica de um teste indica uma condição de carga quase estática. Uma desigualdade indica que a energia em excesso entra na energia cinética do conjunto sendo dissipada através do amortecimento numérico do PFC2D [30]. A adequação da taxa de carregamento (especificada como 0,02 m/s pelo ficheiro de entrada Afc_ex.DVR no PFC2D) antes do colapso generalizado da amostra é verificada observando a igualdade do trabalho realizado pelas placas e a energia armazenada no conjunto de partículas (Figura 5.18).

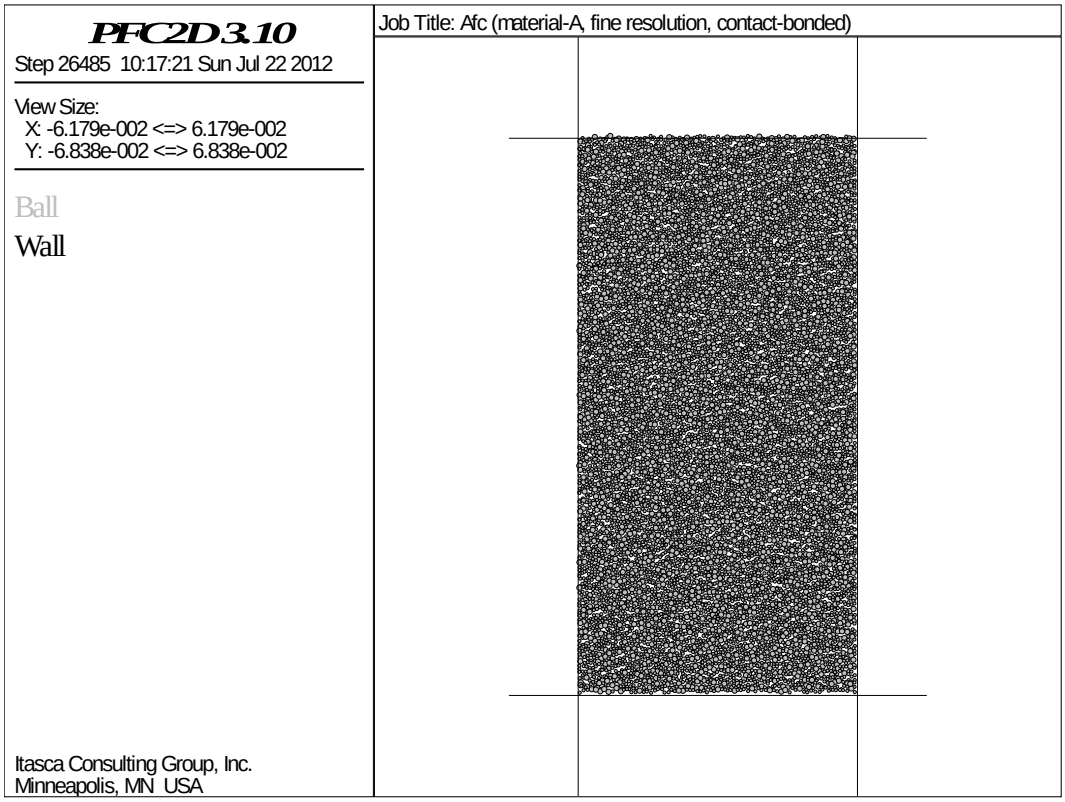


Fig. 5.12 – Configuração da amostra de granito e respetivas partículas geradas pelo PFC2D

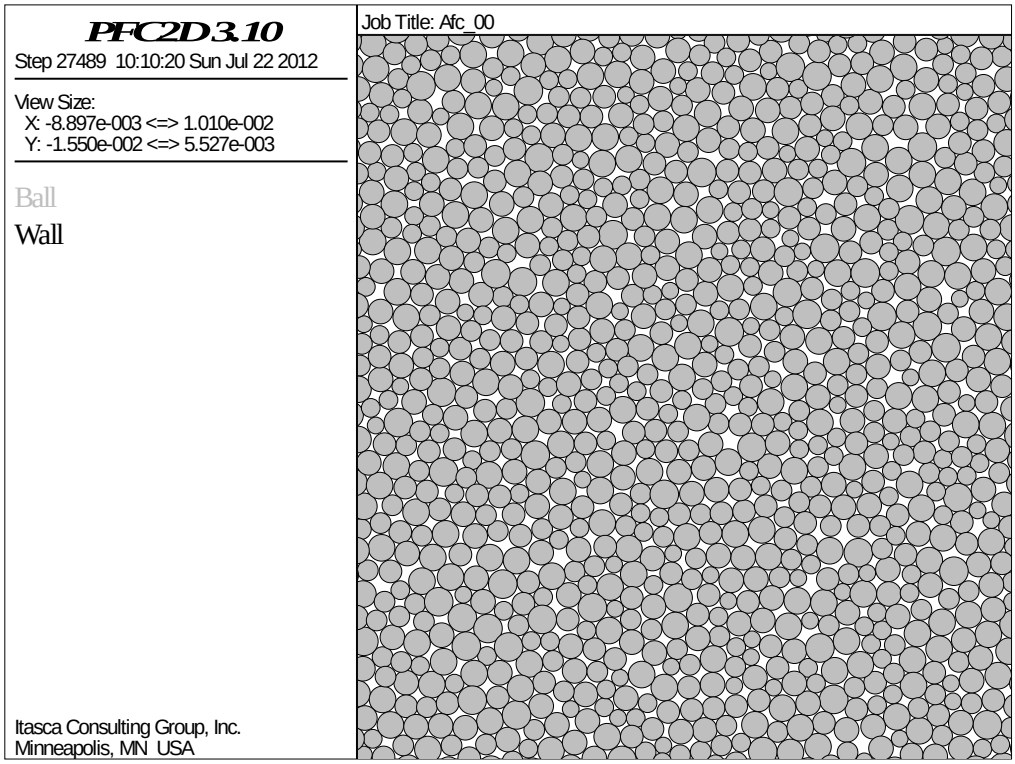


Fig. 5.13 – Pormenorização da configuração e geometria das partículas na amostra gerada pelo PFC2D com porosidade aproximada de 16%

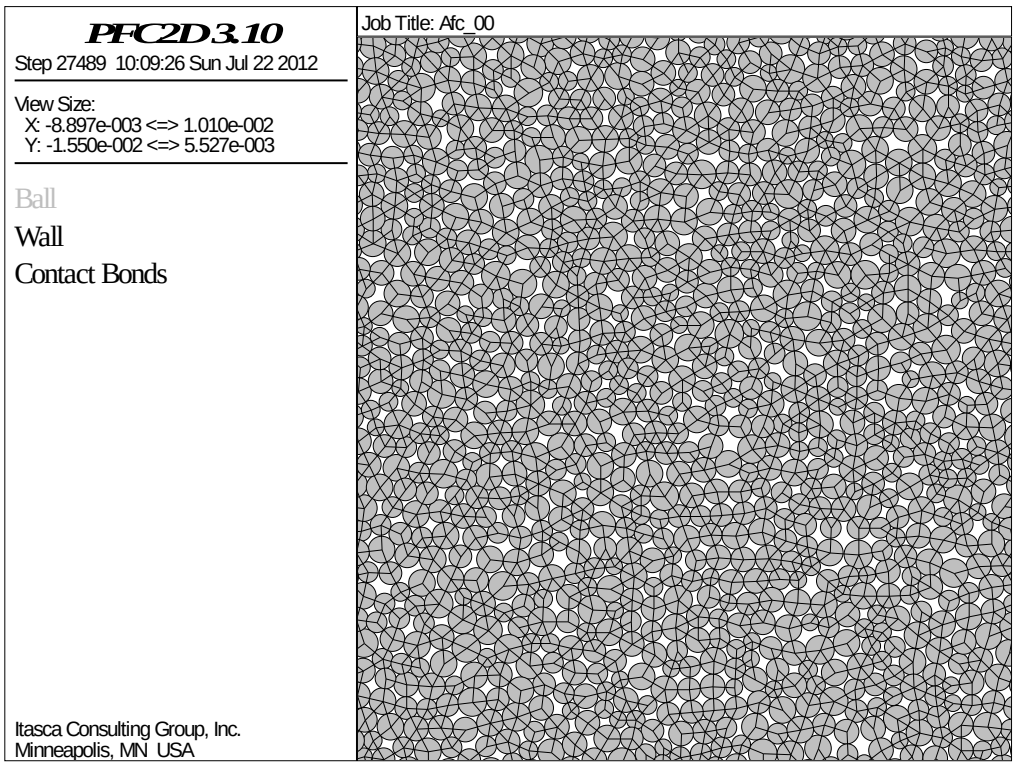


Fig. 5.14 – Pormenorização das ligações de contato entre as partículas na amostra gerada pelo PFC2D

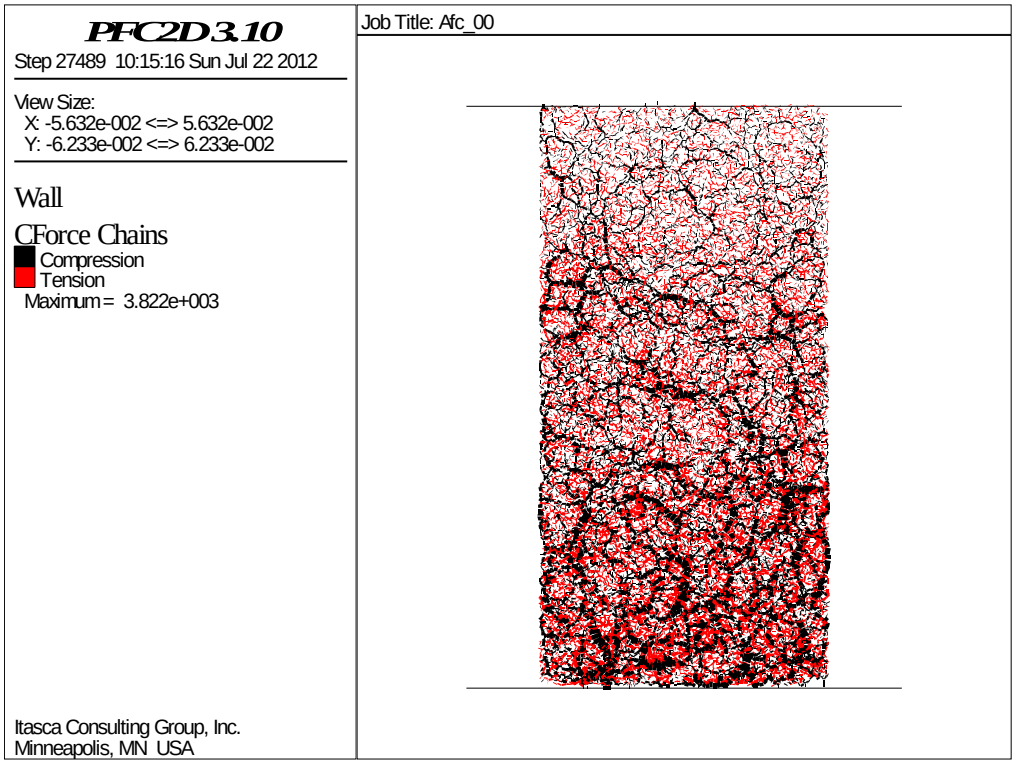


Fig. 5.15 – Distribuição das forças de contacto entre as partículas no início do teste

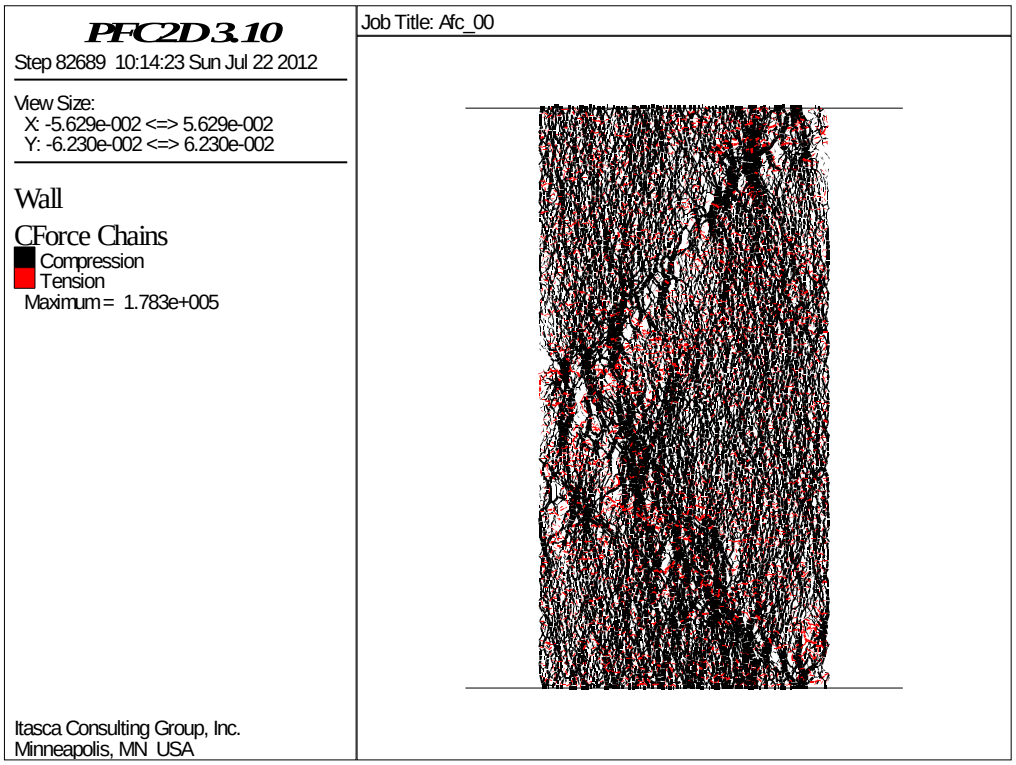


Fig. 5.16 – Distribuição das forças de contacto entre as partículas no final do teste

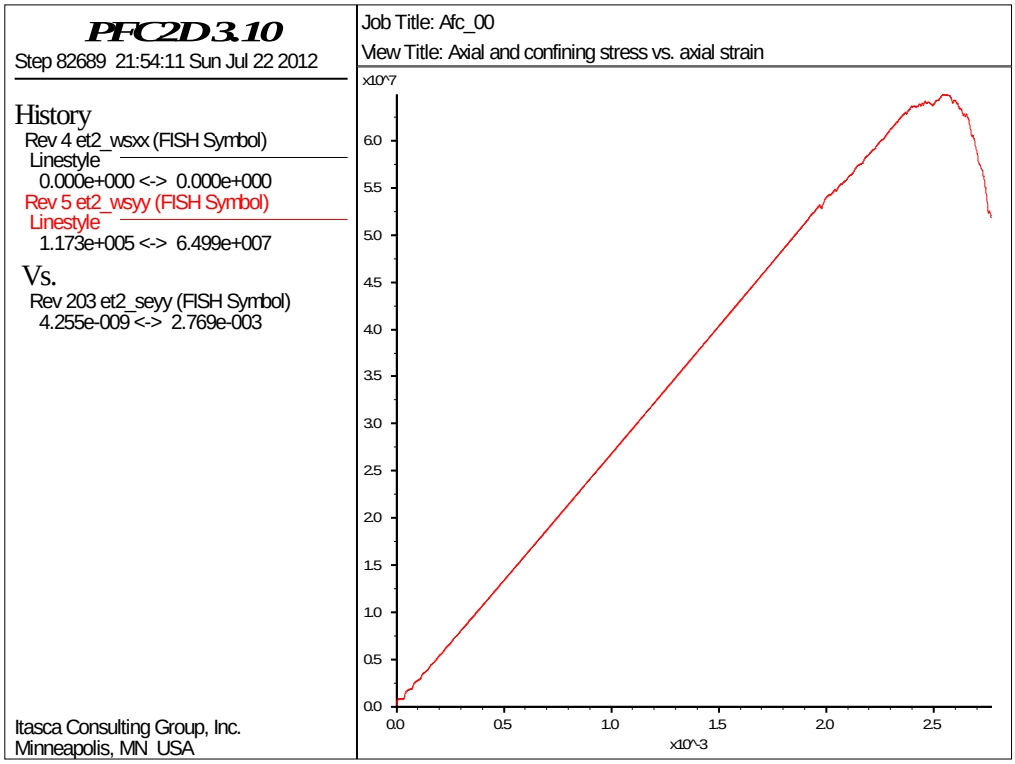


Fig. 5.17 – Representação da tensão axial [Pa] versus a deformação axial [%] na amostra

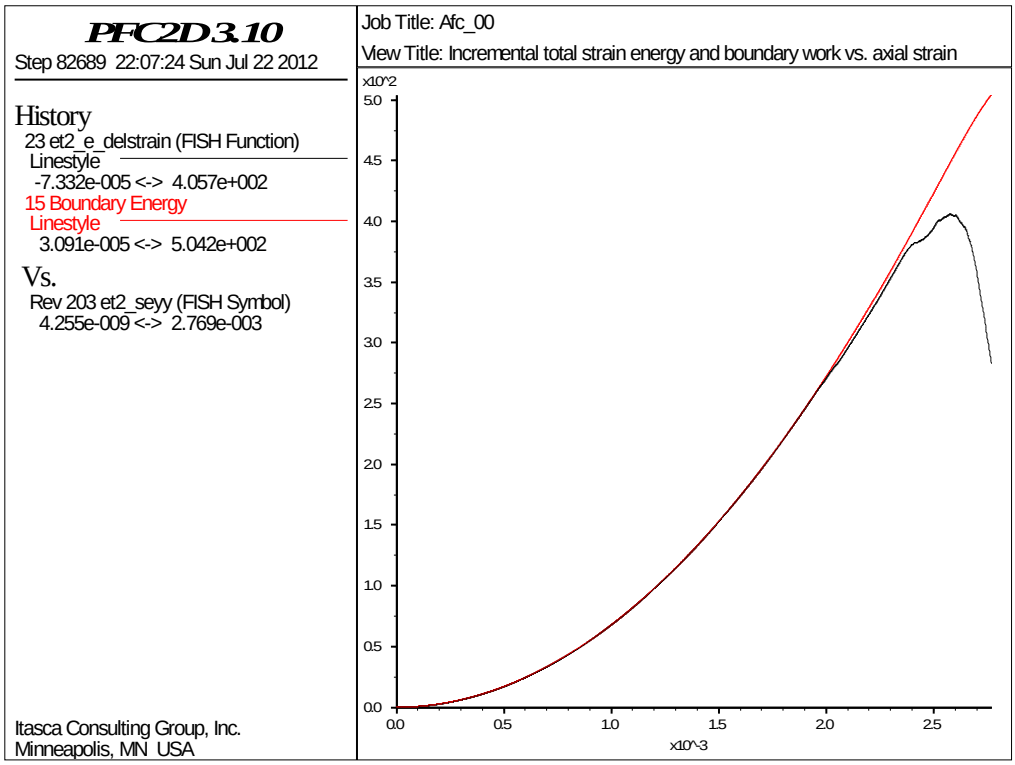


Fig. 5.18 – Representação da quantidade de energia versus a deformação axial [%] na amostra

5.6.1. Geração de Modelos variando o Raio Mínimo das Partículas

Outro dos estudos levados a cabo foi a geração de seis amostras variando o raio mínimo das partículas (R_{min}), porém conservando os restantes parâmetros. Manteve-se também o módulo de contacto partícula-partícula (E_c = 40 GPa) e a razão entre a rigidez das partículas (K_n/K_s = 3,0) os quais se fizeram variar nos testes anteriores. Mantiveram-se estes valores, pois conduziram a um coeficiente de Poisson de 0,3 que representa convenientemente as propriedades de um granito típico.

A dimensão das partículas faz parte das características intrínsecas do material e afeta a resistência, por exemplo à compressão simples num material no PFC2D. Desta forma a dimensão das partículas não pode ser considerada como um parâmetro livre que apenas controla a organização de uma amostra. Modelos organizados mais detalhados, podem ser gerados através da diminuição do raio mínimo (R_{min}) mantendo todas as outras propriedades [24]. Quando se diminui o raio das partículas, o modelo tende a ficar computacionalmente maior e mais pesado.

Na Tabela 5.7 apresentam-se os valores dos parâmetros que foram modificados e os que foram mantidos para proceder à geração das respetivas amostras, sendo que para cada um dos valores de raio mínimo mostrados na tabela abaixo foi criada uma amostra correspondente.

Tabela 5.7 – Parâmetros usados para geração de amostras com o PFC2D, com variação do raio mínimo

Designação FISH	Descrição dos Parâmetros Modificados	Valores
et2_rlo	Raio Mínimo das Partículas – R_{min} [m]	$2{,}0\times10^{-4}$ $2{,}25\times10^{-4}$ $2{,}5\times10^{-4}$ $3{,}0\times10^{-4}$ $5{,}0\times10^{-4}$ $6{,}0\times10^{-4}$
Designação FISH	**Descrição dos Parâmetros Mantidos**	**Valores**
et2_radius_ratio	Relação entre Raio Máximo e Mínimo – R_{max}/R_{min} [-]	1,66
md_dens	Densidade das Partículas – ρ [kg/m^3]	2941,18
md_Ec	Módulo de Contacto Partícula-Partícula – E_c [Pa]	40×10^{9}
md_knoverks	Razão entre a Rigidez das Partículas – K_n/K_s [-]	3,0

Na Figura 5.19 apresenta-se a configuração e respetiva pormenorização das partículas na amostra com R_{min} = 0,2 mm. De igual forma, na Figura 5.20 mostra-se a configuração e o arranjo das partículas na amostra para o valor de R_{min} = 0,6 mm.

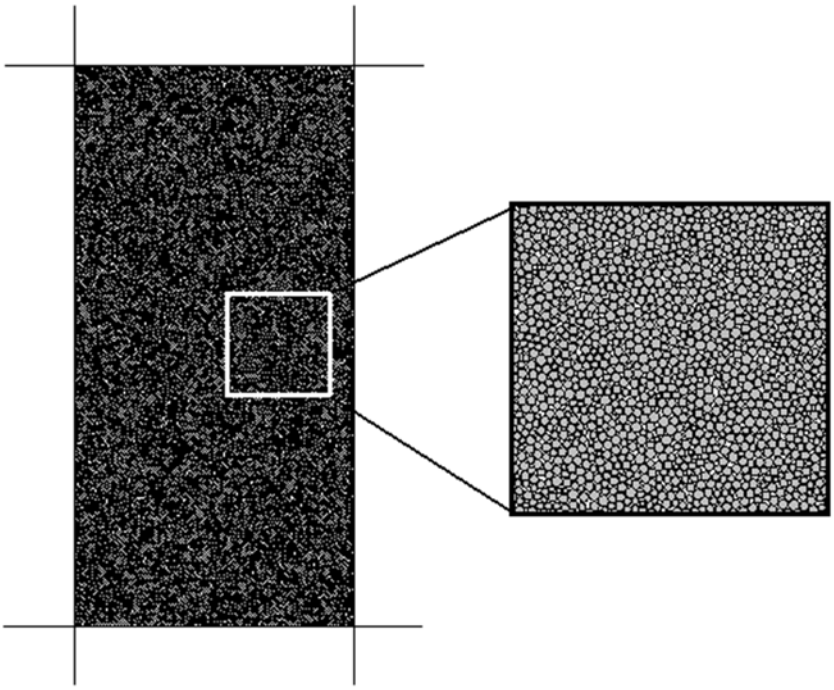


Fig. 5.19 – Configuração da geometria da amostra de granito gerada pelo PFC2D e respetivo arranjo das partículas, resultante do ensaio para R_{min} = 2,0×10^{-4} m

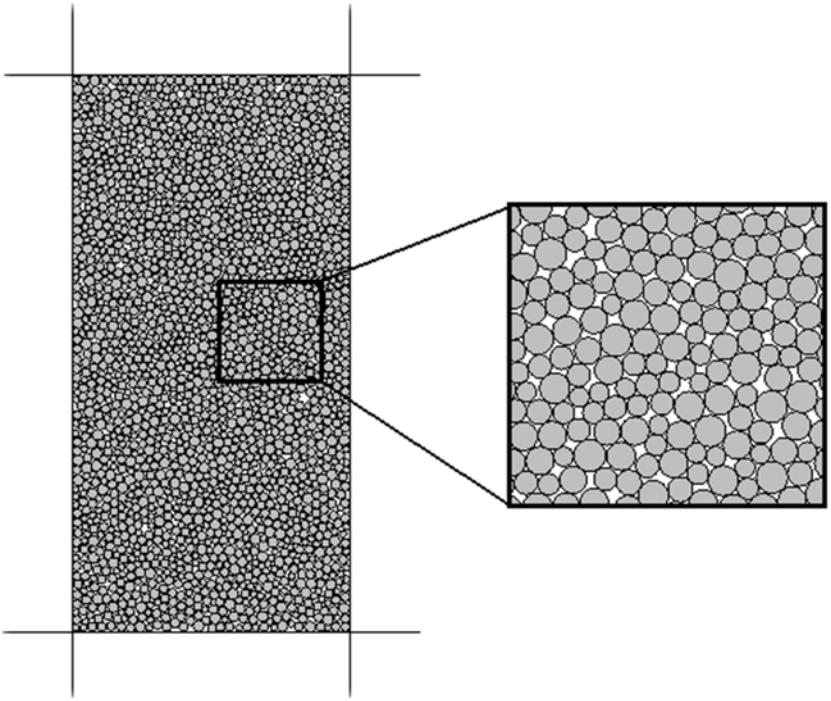


Fig. 5.20 – Configuração da geometria da amostra de granito gerada pelo PFC2D e respetivo arranjo das partículas, resultante do ensaio para o R_{min} = 6,0×10^{-4} m

5.6.2. Geração de Modelos variando a Relação entre o Raio Máximo e Mínimo das Partículas

Complementarmente foram geradas cinco amostras fazendo variar a relação entre o raio máximo e mínimo (R_{max}/R_{min}) mantendo todos os outros parâmetros, inclusive o módulo de contacto entre as partículas (E_c) e a razão entre a rigidez normal e de corte das partículas (K_n/K_s). No presente caso fixou-se igualmente o valor do raio mínimo igual a 0,25 mm, valor que se fez variar no exemplo anterior.

Na Tabela 5.8 apresentam-se os valores dos parâmetros que foram modificados e mantidos. Para cada um dos valores da relação entre o raio máximo e mínimo apresentados foi criada uma amostra respetiva.

Tabela 5.8 – Parâmetros usados para geração das amostras com o PFC2D, variando a relação entre o raio máximo e mínimo das partículas

Designação FISH	Descrição dos Parâmetros Modificados	Valores
		1,0
		1,25
et2_radius_ratio	Relação entre Raio Máximo e Mínimo – R_{max}/R_{min} [-]	1,66
		2,0
		2,5
Designação FISH	**Descrição dos Parâmetros Mantidos**	**Valores**
et2_rlo	Raio Mínimo das Partículas – R_{min} [m]	$2{,}5\times10^{-4}$
md_dens	Densidade das Partículas – ρ [kg/m^3]	2941,18
md_Ec	Módulo de Contacto Partícula-Partícula – E_c [Pa]	40×10^{9}
md_knoverks	Razão entre a Rigidez das Partículas – K_n/K_s [-]	3,0

Apresenta-se na Figura 5.21 a configuração e pormenorização das partículas da amostra que resultou do teste efetuado com a relação R_{max}/R_{min} = 1,0. Identicamente na Figura 5.22 mostra-se a configuração resultante do teste com R_{max}/R_{min} = 2,5. Um modelo de partículas gerado com R_{max}/R_{min} = 1,0 resulta num arranjo de partículas mais pobre e menos complexo, devido ao tamanho uniforme das partículas.

A observação das duas figuras seguintes permite a visualização clara da configuração das amostras para o valor mínimo e máximo da relação R_{max}/R_{min} que foram utilizados na presente análise.

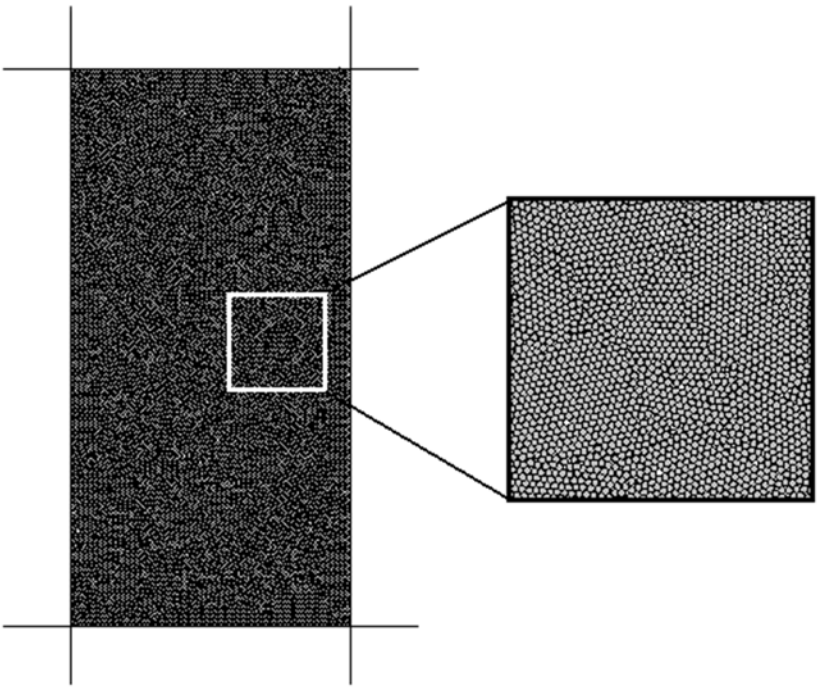


Fig. 5.21 – Configuração da geometria da amostra de granito gerada pelo PFC2D e respetivo arranjo das partículas, resultante do teste com R_{max}/R_{min} = 1,0

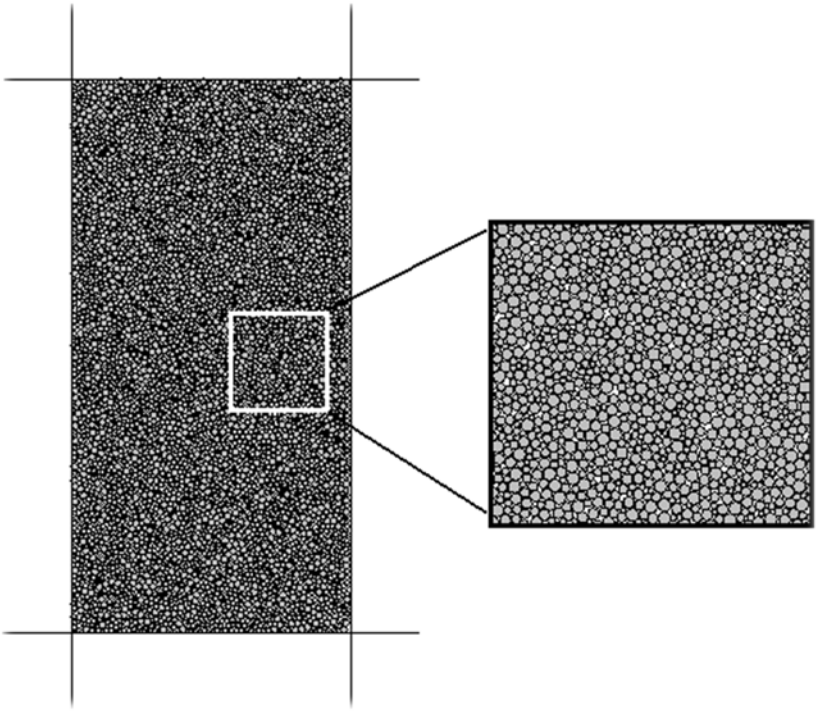


Fig. 5.22 – Configuração da geometria da amostra de granito gerada pelo PFC2D e respetivo arranjo das partículas, resultante do teste com R_{max}/R_{min} = 2,5

5.7. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

A relação entre os parâmetros do modelo e as propriedades dos materiais usualmente medidas só é conhecida à priori para arranjos simples de partículas. No caso geral de amostras geradas com vários milhares de partículas, com arranjo e dimensões arbitrárias, esta relação é encontrada através de um processo de calibração no qual a ocorrência particular de um modelo de partículas ligadas e um conjunto de parâmetros do modelo é usado para simular um conjunto de testes nos materiais.

Ao longo de uma amostra quando o número de partículas é reduzido, a dispersão das propriedades medidas aumenta. Então, deve estar presente no modelo um número suficiente de partículas para que este se possa resolver e permita reproduzir os mecanismos de rotura que influenciam as propriedades de resistência. À medida que o tamanho das partículas diminui, os coeficientes de variação convergem para valores específicos.

No estudo levado a cabo neste trabalho, o número de partículas é suficientemente grande para que se possam obter amostras bem representativas da resposta do material, por isso, espera-se que os valores da resistência e da heterogeneidade dos materiais dos modelos aqui utilizados conduzam a valores próximos dos reais.

Na Tabela 5.9 apresentam-se os resultados da calibração das propriedades macroscópicas dos modelos referentes ao módulo de deformabilidade (E), para os vários valores de E_c e K_n/K_s usados na geração das amostras. A calibração dos modelos é feita a partir de um processo iterativo. Assim, no caso das amostras em estudo foram necessárias duas a três iterações para cada caso.

Na análise dos resultados referentes ao PFC2D estático serão usados os valores relativos ao *Plane Stress* (estado plano de tensão), pois se fossem utilizados os resultados em *Plane Strain* (estado plano de deformação) estar-se-ia a considerar o modelo como uma fatia de um modelo mais espesso. Assim, ao considerar-se os valores de *Plane Stress*, pode afirmar-se que o modelo 2D é considerado como uma fatia isolada. Contudo, para se verificar qual destas duas hipóteses, é de facto a mais correta para simular um provete, seria necessário recorrer a uma análise 3D.

Relativamente à localização da medição das propriedades, procede-se à análise em *Wall Based*, que permite considerar o valor da deformação medido entre os topos, ou seja, o que mais se aproxima dos ensaios laboratoriais. Pois, em *Measurement Based* a deformação e a tensão instaladas são medidas em círculos de medida no interior do modelo.

No entanto, como se pode observar pela Tabela 5.9 os valores do módulo de deformabilidade (E) quer sejam referentes a *Wall Based* ou a *Measurement Based* são muito semelhantes. O mesmo acontece na Tabela 5.10 referente aos valores do coeficiente de Poisson (ν).

Tabela 5.9 – Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao módulo de deformabilidade (*E*)

E_c [GPa]	K_n/K_s	Propriedade Calibrada	Plane Strain		Plane Stress	
			Wall Based	Meas Based	Wall Based	Meas Based
35	1,0	*E* [GPa]	30,6	31,2	30,8	31,5
	1,66		26,9	27,1	27,5	27,7
	2,0		25,4	25,6	26,1	26,4
	2,5		23,7	23,9	24,6	24,9
	3,0		22,4	22,5	23,7	23,7
	3,5		21,2	21,4	22,4	22,6
40	1,0	*E* [GPa]	34,8	35,5	35,0	35,8
	1,66		30,3	30,7	31,0	31,4
	2,0		28,8	29,4	29,9	30,3
	2,5		26,9	27,3	28,2	28,5
	3,0		25,2	25,7	26,8	27,0
	3,5		23,9	24,4	25,6	25,8
45	1,0	*E* [GPa]	39,1	40,0	39,4	40,3
	1,66		34,3	34,7	35,0	35,5
	2,0		32,5	33,1	33,7	34,1
	2,5		30,3	30,8	31,7	32,1
	3,0		28,5	29,0	30,2	30,5
	3,5		27,0	27,5	28,8	29,2
50	1,0	*E* [GPa]	43,2	44,3	43,5	44,6
	1,66		37,9	38,3	38,8	39,2
	2,0		36,1	36,5	37,2	37,7
	2,5		33,6	34,1	35,0	35,5
	3,0		31,7	32,1	33,3	33,7
	3,5		30,0	30,5	31,8	32,2

Tabela 5.9 (continuação) – Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao módulo de deformabilidade (*E*)

E_c [GPa]	K_n/K_s	Propriedade Calibrada	Plane Strain		Plane Stress	
			Wall Based	Meas Based	Wall Based	Meas Based
60	1,0	*E* [GPa]	51,3	52,5	51,7	52,9
	1,66		45,3	46,1	46,4	47,2
	2,0		43,0	43,9	44,5	45,3
	2,5		40,0	40,9	41,9	42,6
	3,0		37,6	38,5	39,8	40,5
	3,5		35,6	36,5	38,0	38,7

A partir dos resultados da calibração expostos na tabela anterior, construíram-se os gráficos das Figuras 5.23 e 5.24.

Na Figura 5.23, verifica-se que para os vários valores usados da razão entre a rigidez normal e de corte das partículas (K_n/K_s), à medida que aumentam os valores do módulo de contacto das partículas (E_c) aumentam proporcionalmente os valores do módulo de deformabilidade (*E*). De salientar que a curva correspondente ao valor de K_n/K_s = 1,0 apresenta valores do módulo de deformabilidade superiores à curva correspondente ao valor K_n/K_s = 3,5 respetivamente o valor mínimo e máximo da relação entre a rigidez normal e de corte das partículas utilizados no presente estudo.

Na Figura 5.24 apresenta-se para os vários valores de E_c usados, a variação da relação entre a rigidez normal e de corte das partículas com o módulo de deformabilidade. Com o aumento de K_n/K_s verifica-se a diminuição de *E*, estes resultados estão de acordo com os apresentados pela curva empírica apresentada na Figura 5.3 do presente trabalho (de salientar que nesta figura atrás apresentada a diferente configuração das curvas deve-se ao facto de no eixo x estar representado K_s/K_n sendo que na figura que de seguida se expõe está representado K_n/K_s nesse eixo). De notar também que, com o aumento de K_n/K_s o valor de *E* tende a estabilizar, ou seja, a variação começa a ser cada vez menos acentuada. Como seria de esperar, para valores superiores de E_c são obtidos maiores valores de *E*.

Nesta fase do trabalho, apenas serão apresentadas as figuras referentes aos resultados de calibração em *plane stress* (*wall based*), pelas razões atrás referidas e para não tornar a apresentação de resultados demasiado exaustiva nesta fase do estudo, pelo que as figuras dos gráficos executados a partir dos resultados da calibração em *plane stress* (*measurement based*), *plane strain* (*wall based*) e *plane strain* (*measurement based*) são expostos nos Anexos A, B e C respetivamente.

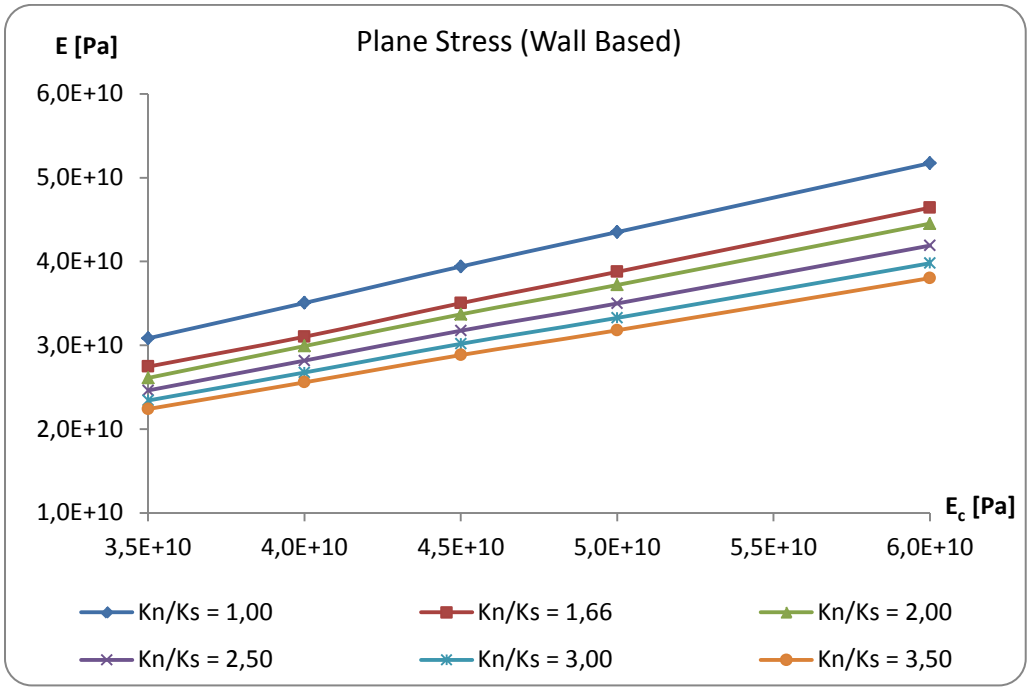


Fig. 5.23 – Variação do módulo de deformabilidade (*E*) com o módulo de contacto das partículas (E_c) para os vários valores de K_n/K_s usados

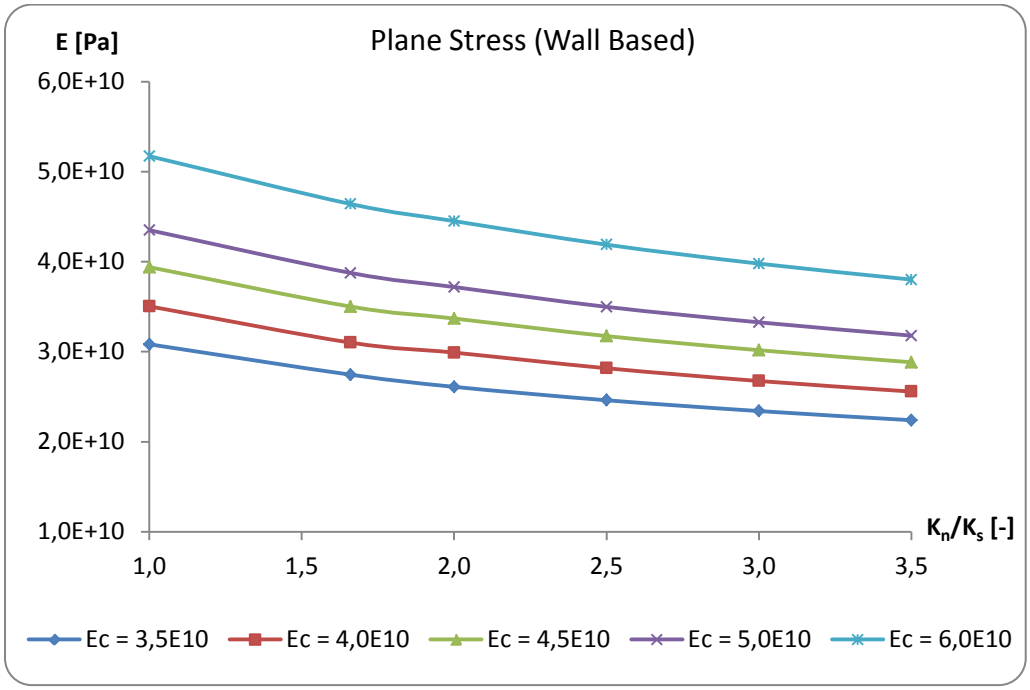


Fig. 5.24 – Variação do módulo de deformabilidade (*E*) com a relação entre a rigidez das partículas (K_n/K_s) para os vários valores de E_c usados

Na Tabela 5.10 apresentam-se os resultados da calibração das propriedades macroscópicas dos modelos, referente ao coeficiente de Poisson (v) para os vários valores de E_c e K_n/K_s com que foram geradas as amostras.

Tabela 5.10 – Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao coeficiente de Poisson (v)

E_c [GPa]	K_n/K_s	Propriedade Calibrada	Plane Strain		Plane Stress	
			Wall Based	Meas Based	Wall Based	Meas Based
35	1,0	v [-]	0,09	0,09	0,10	0,10
	1,66		0,14	0,15	0,17	0,18
	2,0		0,16	0,17	0,20	0,21
	2,5		0,19	0,20	0,23	0,25
	3,0		0,21	0,22	0,27	0,28
	3,5		0,23	0,24	0,29	0,31
40	1,0	v [-]	0,09	0,09	0,09	0,09
	1,66		0,15	0,15	0,18	0,18
	2,0		0,19	0,17	0,23	0,21
	2,5		0,22	0,20	0,28	0,25
	3,0		0,24	0,22	0,31	0,28
	3,5		0,25	0,24	0,34	0,31
45	1,0	v [-]	0,09	0,09	0,09	0,09
	1,66		0,14	0,15	0,17	0,18
	2,0		0,18	0,18	0,23	0,21
	2,5		0,21	0,20	0,27	0,25
	3,0		0,23	0,22	0,30	0,28
	3,5		0,25	0,24	0,33	0,31
50	1,0	v [-]	0,09	0,09	0,10	0,09
	1,66		0,15	0,15	0,17	0,18
	2,0		0,17	0,17	0,21	0,21
	2,5		0,20	0,20	0,25	0,25
	3,0		0,22	0,22	0,28	0,28
	3,5		0,24	0,24	0,31	0,31

Tabela 5.10 (continuação) – Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao coeficiente de Poisson (ν)

E_c [GPa]	K_n/K_s	Propriedade Calibrada	Plane Strain		Plane Stress	
			Wall Based	Meas Based	Wall Based	Meas Based
60	1,0	ν [-]	0,09	0,09	0,10	0,10
	1,66		0,16	0,15	0,19	0,18
	2,0		0,19	0,18	0,23	0,21
	2,5		0,21	0,20	0,27	0,25
	3,0		0,23	0,22	0,31	0,28
	3,5		0,25	0,24	0,34	0,31

De forma idêntica são apresentados nas Figuras 5.25 e 5.26 os gráficos construídos a partir dos resultados da calibração expostos na tabela anterior.

Pode ser observado na Figura 5.25, a variação do coeficiente de Poisson (ν) com o módulo de contacto das partículas (E_c), para os vários valores de K_n/K_s usados. Com o aumento de E_c, verifica-se que os valores do coeficiente de Poisson exibem uma variação pouco significativa, variando em alguns casos apenas na segunda casa decimal. Os valores do coeficiente de Poisson numa das linhas para um dado valor de K_n/K_s são próximos uns dos outros, devendo evidenciar-se que no gráfico a escala do eixo referente a ν pode induzir a leituras ampliadas da variação deste parâmetro. A menores valores de K_n/K_s correspondem também menores valores de coeficiente de Poisson (ν).

A Figura 5.26 mostra a relação entre o coeficiente de Poisson e a razão entre a rigidez das partículas (K_n/K_s) para os vários valores de E_c testados nas amostras que foram geradas reproduzindo as características do granito.

Em geral, o coeficiente de Poisson medido num material unido por ligações de contacto será afetado por K_n/K_s no PFC2D [24]. Portanto como se pode verificar, à medida que aumenta a relação K_n/K_s o coeficiente de Poisson também aumenta. Ainda pela observação da Figura 5.27 retirada do manual do PFC2D constata-se que esta apresenta uma configuração idêntica à Figura 5.26 que foi reproduzida com os respetivos resultados obtidos neste estudo.

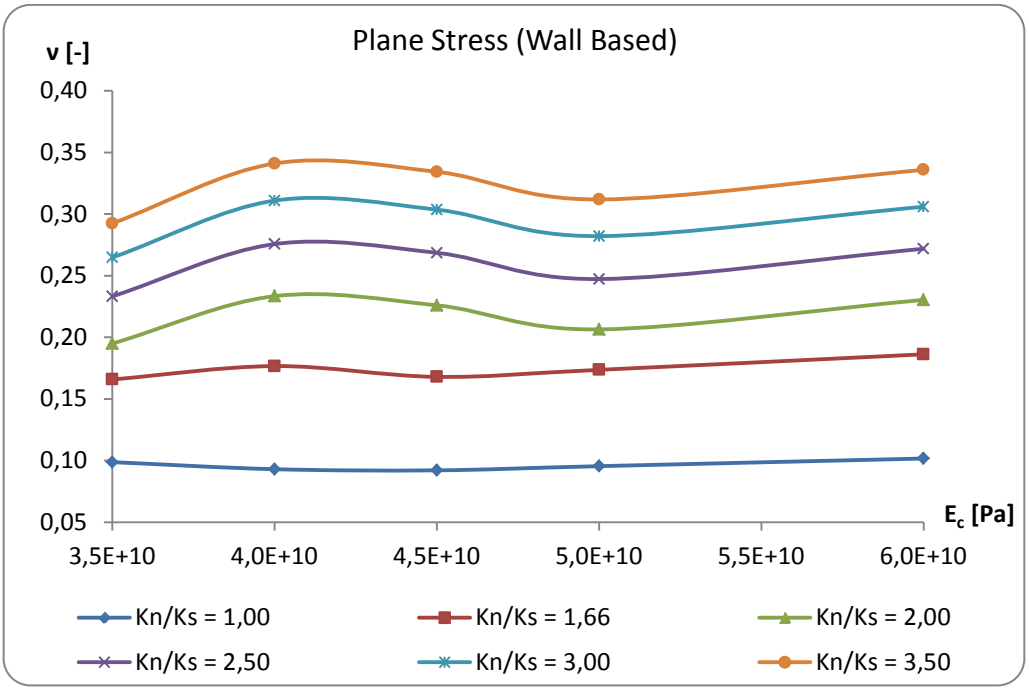


Fig. 5.25 - Variação do coeficiente de Poisson (ν) com o módulo de contacto das partículas (E_c) para os vários valores de K_n/K_s usados

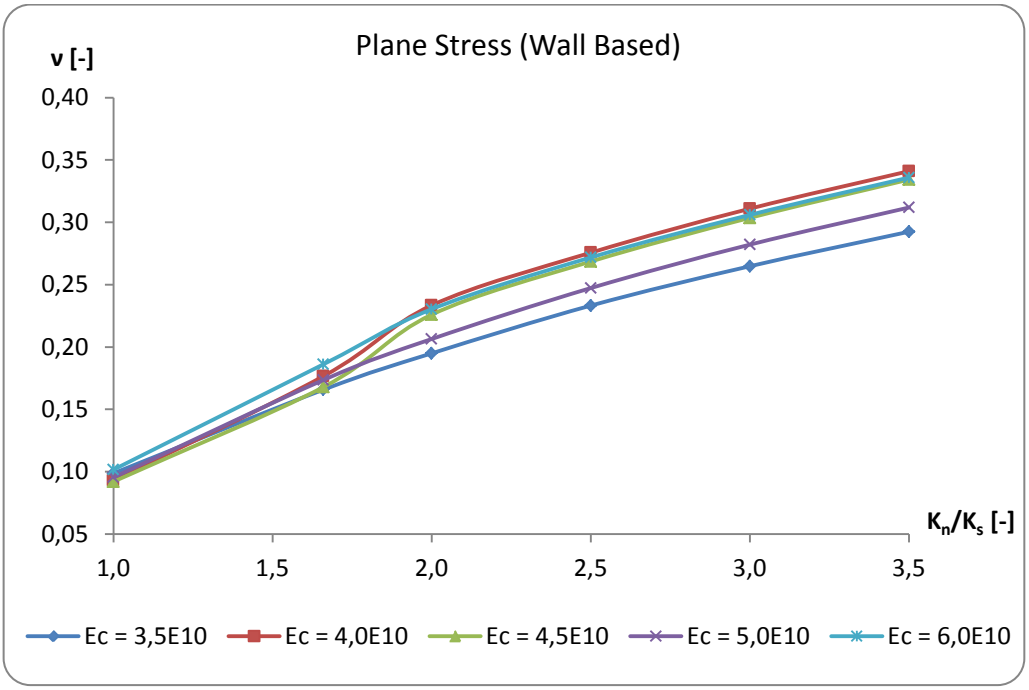


Fig. 5.26 - Variação do coeficiente de Poisson (ν) com a razão da rigidez das partículas (K_n/K_s) para os vários valores de E_c usados

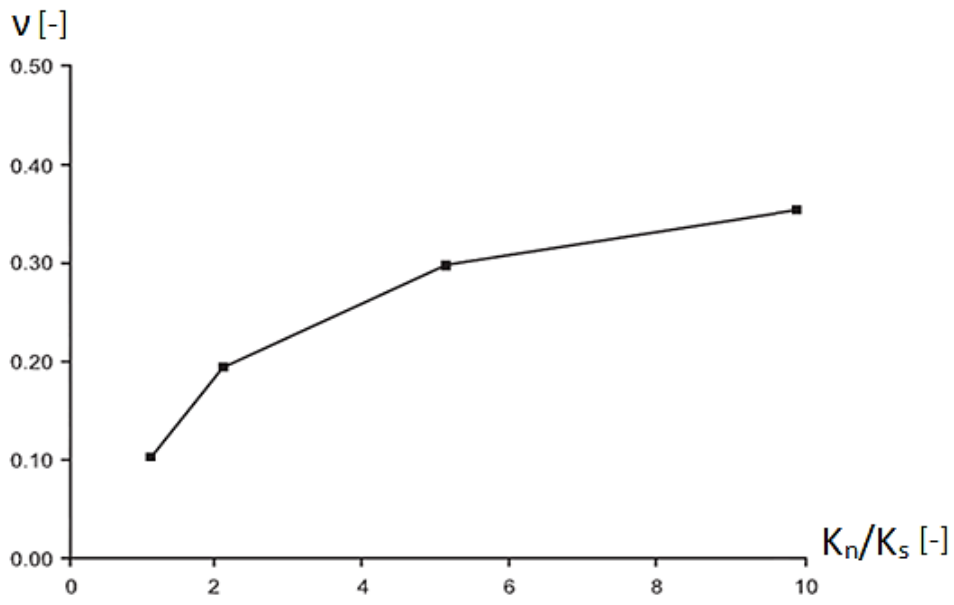


Fig. 5.27 – Variação da relação entre a rigidez das partículas (K_n/K_s) com o coeficiente de Poisson (v) para um granito [adaptado de [30]]

5.7.1. Resultados da Calibração variando o Raio Mínimo das Partículas

A Tabela 5.11 apresenta os resultados da calibração das propriedades macroscópicas, referente ao módulo de deformabilidade (E) dos modelos que resultaram da variação do raio mínimo das partículas (R_{min}).

Tabela 5.11 – Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao módulo de deformabilidade (E)

E_c [GPa]	K_n/K_s	R_{min} [m]	Propriedade Calibrada	Plane Strain		Plane Stress	
				Wall Based	Measurement Based	Wall Based	Measurement Based
40	3,0	$2{,}0\times10^{-4}$	E [GPa]	25,7	25,9	26,9	27,2
		$2{,}25\times10^{-4}$		25,4	25,8	26,6	27,0
		$2{,}5\times10^{-4}$		25,2	25,7	26,8	27,0
		$3{,}0\times10^{-4}$		25,2	26,0	26,6	27,3
		$5{,}0\times10^{-4}$		24,9	25,8	26,3	27,1
		$6{,}0\times10^{-4}$		25,1	25,8	26,4	27,1

As constantes elásticas macroscópicas (módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson) em geral são independentes das dimensões das partículas para o material no PFC2D [24].

Potyondy e Cundall verificaram em estudos anteriores efetuados com modelos discretos de partículas simulando amostras de granito, que os valores do coeficiente de Poisson são aproximadamente os mesmos para todas as dimensões das partículas.

A partir dos resultados obtidos e que constam na tabela anterior, foi realizada a Figura 5.28 que permite concluir que para os vários valores do módulo de deformabilidade obtidos em *plane stress* (*wall* e *meas based*) e *plane strain* (*wall* e *meas based*) estes mantêm-se sempre constantes para os vários valores de R_{min} testados, ou seja, para as várias amostras o valor de E não é afetado pelo raio mínimo logo pela dimensão das partículas.

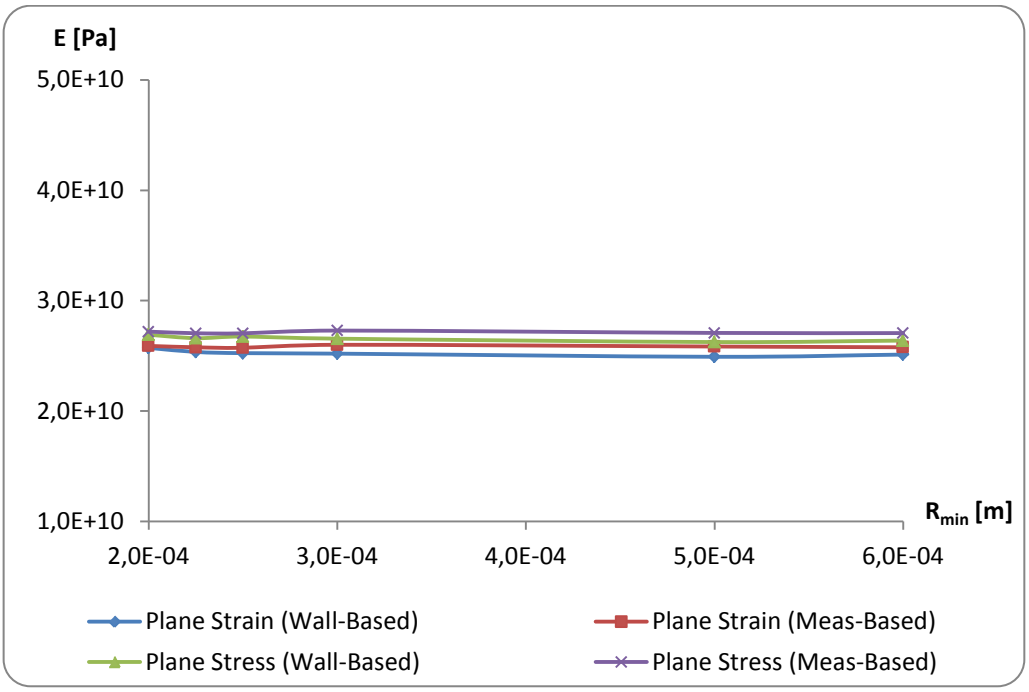


Fig. 5.28 - Variação do módulo de deformabilidade (E) com o raio mínimo das partículas (R_{min}), para ambas as medições efetuadas em estado plano de tensão (*plane stress*) e estado plano de deformação (*plane strain*)

Na Tabela 5.12 apresentam-se os resultados da calibração das propriedades macroscópicas, referente ao coeficiente de Poisson (ν) que resultaram da variação do raio mínimo das partículas (R_{min}).

Tabela 5.12 – Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao coeficiente de Poisson (ν)

E_c [GPa]	K_n/K_s	R_{min} [m]	Propriedade Calibrada	Plane Strain		Plane Stress	
				Wall Based	Measurement Based	Wall Based	Measurement Based
40	3,0	$2{,}0\times10^{-4}$	ν [-]	0,21	0,22	0,27	0,28
		$2{,}25\times10^{-4}$		0,22	0,22	0,28	0,28
		$2{,}5\times10^{-4}$		0,24	0,22	0,31	0,28
		$3{,}0\times10^{-4}$		0,23	0,22	0,29	0,28
		$5{,}0\times10^{-4}$		0,23	0,21	0,29	0,27
		$6{,}0\times10^{-4}$		0,22	0,22	0,28	0,28

Na Figura 5.29 verifica-se que nas condições anteriores o coeficiente de Poisson não varia muito significativamente com o aumento do raio mínimo. A maior variação diz respeito ao valor de R_{min} = 0,25 mm e é mais notória nas medições efetuadas em *plane stress* (estado plano de tensão), esta variação é da ordem de duas centésimas, não sendo estes valores muito díspares em relação aos restantes.

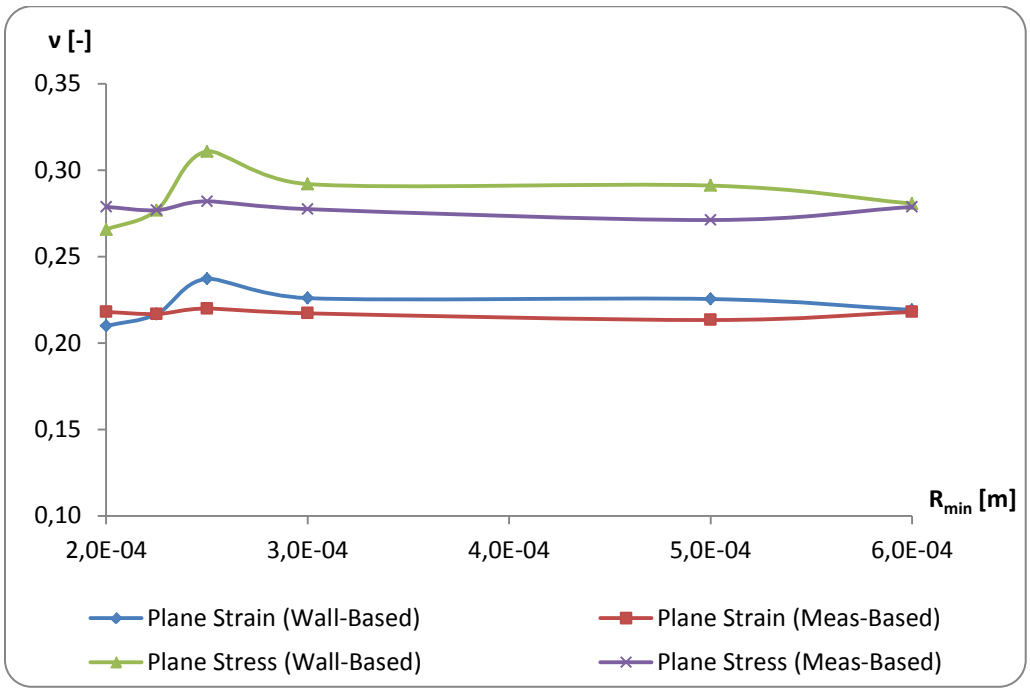


Fig. 5.29 - Variação do coeficiente de Poisson (ν) com o raio mínimo das partículas (R_{min}), para as medições efetuadas em estado plano de tensão (*plane stress*) e estado plano de deformação (*plane strain*)

5.7.2. Resultados da Calibração variando a Relação entre o Raio Máximo e Mínimo das Partículas.

Na Tabela 5.13 apresentam-se os resultados da calibração das propriedades macroscópicas, referentes ao módulo de deformabilidade (*E*) das amostras resultantes da variação da relação entre o raio máximo e mínimo das partículas (R_{max}/R_{min}).

Tabela 5.13 – Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao módulo de deformabilidade (*E*)

E_c [GPa]	K_n/K_s	R_{max}/R_{min}	Propriedade Calibrada	Plane Strain		Plane Stress	
				Wall Based	Measurement Based	Wall Based	Measurement Based
40	3,0	1,0		29,0	29,4	30,5	30,8
40	3,0	1,25		24,9	25,5	26,3	26,8
40	3,0	1,66	*E* [GPa]	25,2	25,7	26,8	27,0
40	3,0	2,0		26,0	26,3	27,1	27,6
40	3,0	2,5		26,1	26,6	27,4	27,9

A Figura 5.30 mostra que a variação do módulo de deformabilidade (*E*) com a variação da relação entre o raio máximo e mínimo é pouco significativa, apresentando valores muito próximos quer a análise seja feita em *plane stress* ou *plane strain*.

Os valores médios de *E* são ligeiramente superiores para R_{max}/R_{min} = 1,0. Este valor conduz a uma amostra formada por milhares de partículas com dimensões muito reduzidas e uniformes. A média do módulo de deformabilidade para R_{max}/R_{min} = 1,0 é 29,9 GPa e para R_{max}/R_{min} = 1,25 é 25,9 GPa sendo estas as situações em que se verificaram as maiores diferenças de *E*.

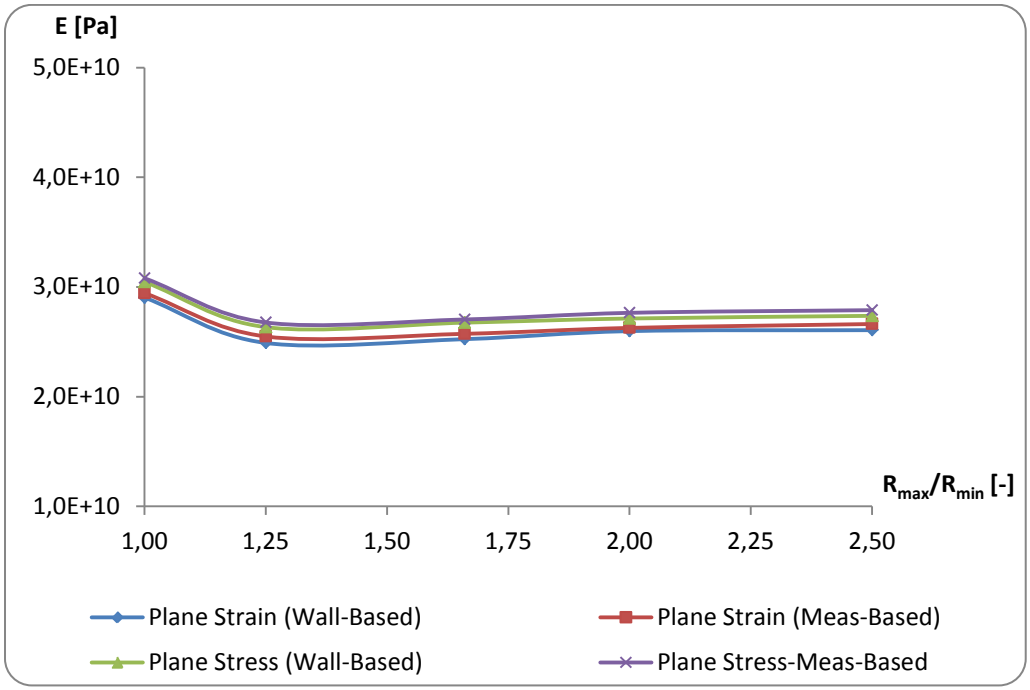


Fig. 5.30 - Variação do módulo de deformabilidade (*E*) com a relação entre o raio máximo e mínimo das partículas (R_{max}/R_{min}), para as medições efetuadas em estado plano de tensão (*plane stress*) e estado plano de deformação (*plane strain*)

Identicamente na Tabela 5.14 apresentam-se os resultados da calibração das propriedades macroscópicas dos modelos, referentes ao coeficiente de Poisson (v) que resultaram da variação da relação entre o raio máximo e mínimo das partículas (R_{max}/R_{min}).

Tabela 5.14 – Resultados da calibração das propriedades macroscópicas do modelo, referente ao coeficiente de Poisson (v)

E_c [GPa]	K_n/K_s	R_{max}/R_{min}	Propriedade Calibrada	Plane Strain		Plane Stress	
				Wall Based	Measurement Based	Wall Based	Measurement Based
40	3,0	1,0		0,22	0,21	0,28	0,27
40	3,0	1,25		0,23	0,22	0,31	0,28
40	3,0	1,66	v [-]	0,24	0,22	0,31	0,28
40	3,0	2,0		0,21	0,22	0,26	0,29
40	3,0	2,5		0,22	0,21	0,28	0,27

Na Figura 5.31 é mostrada a variação do coeficiente de Poisson (ν) com os vários valores de R_{max}/R_{min} usados. Pode constatar-se que em *plane strain* os valores de ν não apresentam variações muito significativas, sendo que as maiores variações verificam-se nas medições efetuadas em *plane stress*. Para os valores correspondentes ao R_{max}/R_{min} = 1,0 e R_{max}/R_{min} = 2,5 os valores quer sejam em plane stress ou *plane strain* são quase coincidentes, ocorrendo as maiores variações para os restantes valores de R_{max}/R_{min}. De focar também que para os cálculos em *plane stress* (estado plano de tensão) obtiveram-se valores mais elevados de ν do que para *plane strain* (estado plano de deformação).

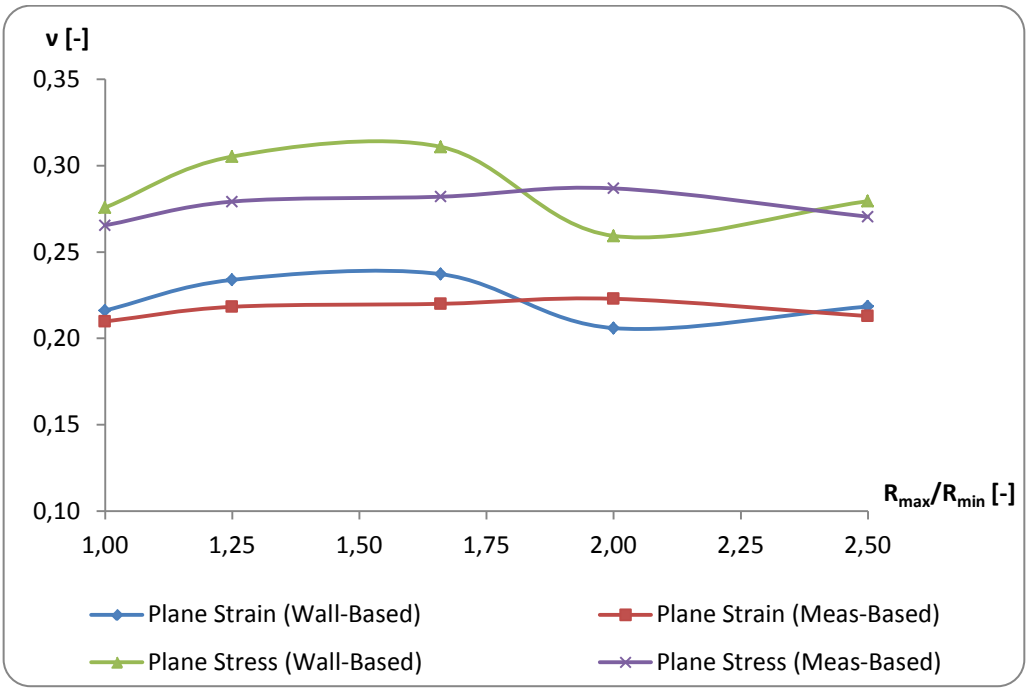


Fig. 5.31 - Variação do coeficiente de Poisson (ν) com a variação da relação entre o raio máximo e mínimo das partículas (R_{max}/R_{min}), para as medições efetuadas em estado plano de tensão (*plane stress*) e estado plano de deformação (*plane strain*)

Nesta fase do estudo, é possível concluir que o processo de calibração das propriedades macroscópicas fornece soluções computacionalmente céleres e fiáveis na geração de amostras com características estáticas bem definidas. As propriedades elásticas das amostras são influenciadas pela rigidez dos contactos. A dimensão das partículas faz também parte das características do material afetando a sua resistência, sendo que a presença de um número reduzido de partículas numa amostra faz aumentar a dispersão nas propriedades medidas. As constantes macroscópicas (E e ν) em geral não são afetadas pela dimensão das partículas.

6

MODELAÇÃO DINÂMICA DAS AMOSTRAS

6.1. PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM MACIÇOS ROCHOSOS COM MODELOS DE PARTÍCULAS

Em geral, para se modelar o atravessamento do material rochoso pelas ondas de tensão, é necessário entender como se propagam e como são alteradas as ondas em conjuntos densos e não organizados de partículas ligadas. Por este motivo, o estudo da mecânica dos meios de partículas tem sido objeto de pesquisa ao longo de várias décadas. São algumas as dificuldades a ultrapassar [1]:

- A estrutura dos conjuntos de partículas é caótica;
- A rigidez dos contactos pode ser ou não constante, aumentando com a penetração das partículas;
- A rigidez normal e de corte são geralmente diferentes;
- O deslizamento pode ocorrer sob determinadas condições de atrito;
- As cargas anteriores e o estado de tensão têm influência na resposta das partículas;
- As partículas reais não são perfeitamente redondas e têm diâmetros variados.

Alguns dos primeiros trabalhos sobre a teoria matemática das pequenas deformações de meios granulares compactos foram resumidos, contribuindo posteriormente para a derivação das relações tensão-deformação dos arranjos organizados de discos. Nestes trabalhos as relações analíticas tensão-deformação e consequentemente velocidades de onda em conjuntos organizados de partículas simples (retangular, hexagonal) foram derivadas, sendo úteis para avaliação do desempenho dos códigos de partículas em casos mais complexos [36].

Contudo, as propriedades mecânicas dos conjuntos não estruturados ou de partículas com diâmetros não uniformes não podem ser determinadas analiticamente. Apenas é possível caraterizar estatisticamente a estrutura das partículas através da distribuição do tamanho, do número de coordenação (número de contactos médios por partícula) e densidade ou porosidade das partículas [37].

6.1.1. PROPRIEDADES DINÂMICAS DE CONJUNTOS DE PARTÍCULAS ORGANIZADOS E NÃO ORGANIZADOS

Estão disponíveis soluções analíticas que são facilmente deduzidas para os modos de organização de partículas circulares mais simples. Considerando a equivalência entre uma organização retangular ou hexagonal de partículas de raio constante, podem ser encontradas para ambas as disposições as propriedades dinâmicas.

Num arranjo retangular de discos com raio constante indeformável, cada partícula está em contacto com outras 4 partículas, cujos centros estão inicialmente separados por um diâmetro. Neste tipo de agrupamento, não há imbricamento de partículas de modo que o coeficiente de Poisson é nulo. Em arranjos hexagonais cada partícula está em contacto com outras seis partículas vizinhas, assim quando a rigidez normal e de corte é constante, o coeficiente de Poisson é de aproximadamente 0,25 [27]. A Figura 6.1 mostra ambas as disposições de partículas que se acabaram de descrever.

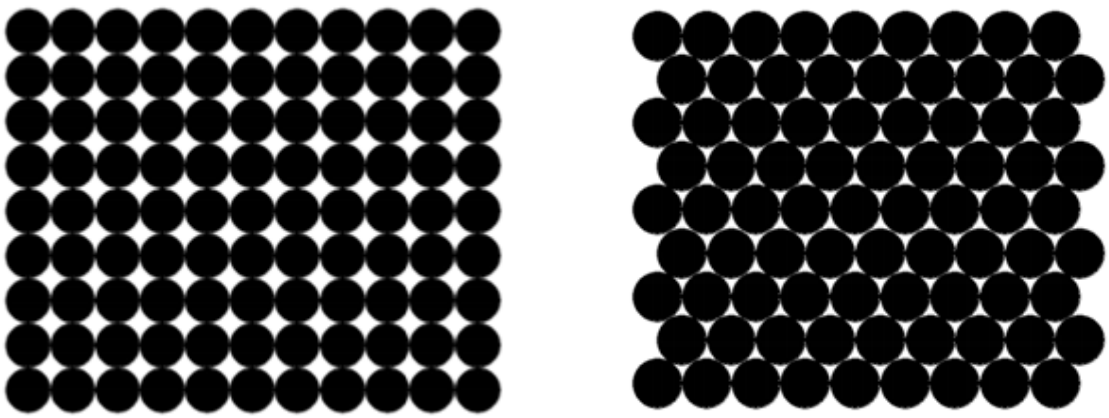


Fig. 6.1 – Arranjo retangular de partículas (esquerda), arranjo hexagonal de partículas (direita) [adaptado de [38]]

Os modelos de contacto ligados, gerados através dos métodos explicitados no capítulo 5 têm uma porosidade de 14 a 16 %. A estratégia usada para chegar a uma correspondência entre as micro propriedades e a velocidade de propagação num arranjo retangular de partículas é diferente da usada para um arranjo hexagonal. Enquanto nos cálculos estáticos é indiferente a utilização de discos ou esferas (desde que o peso próprio seja calculado corretamente), em cálculos dinâmicos a massa da partícula tem influência na velocidade das ondas. Equações mostram que em conjuntos de discos a velocidade das ondas é independente do raio.

Se o arranjo de partículas for não-organizado, devido ao tamanho irregular e à distribuição das propriedades, nenhuma solução analítica está disponível. Assim, a velocidade da onda deve ser calculada para cada conjunto, pela execução de ondas de tensão através do modelo e medição da respetiva velocidade.

6.2. Geração e Receção de Ondas P e S

Depois de criadas as amostras e calibradas as suas propriedades estáticas macroscópicas (capítulo 5), o modelo está em condições de ser ensaiado através da emissão de ondas sísmicas. Para isso, em primeiro lugar, é necessário proceder a uma passagem do cálculo estático realizado até aqui, para o cálculo dinâmico. Assume-se por simplificação que o amortecimento dinâmico é igual a zero. Esta simplificação é aceitável pois os tipos de rocha ensaiados no presente trabalho, apresentam valores de amortecimento por natureza muito baixos.

Conjuntamente aumentaram-se para valores muito elevados os valores da resistência média normal e de corte dos contactos, de modo que não ocorram quebras dos mesmos, isto é, de modo que o comportamento do modelo se mantenha sempre elástico linear.

Perante estas novas circunstâncias o modelo está em condições de receber as ondas sísmicas que irão percorrer a amostra. As ondas sísmicas estudadas neste trabalho foram numericamente geradas de duas formas distintas. Para simular uma onda P, imprimiu-se uma velocidade imposta com direção vertical às partículas na base da amostra e para simular uma onda S imprimiu-se uma velocidade imposta com direção horizontal também aplicada na base da amostra. As ondas podem ainda ser geradas sob a forma de uma carga aplicada (uma força) segundo as direções atrás referidas.

No entanto, os resultados que serão apresentados são referentes apenas a ondas simuladas imprimindo uma velocidade, pois as ondas geradas através da simulação de uma carga aplicada, devido à sua complexidade, tornam mais difícil a deteção do tempo de chegada das ondas de forma fiável, levando por isso a uma maior dispersão de resultados.

Nas simulações dinâmicas, é importante a definição do tipo de fronteiras a utilizar. A utilização de fronteiras refletoras gera gráficos de propagação mais complexos, apesar disso, preferiu-se a utilização deste tipo de fronteira, porque para a análise pretendida apenas interessa conhecer o primeiro tempo de chegada da onda, que é facilmente detetável pela observação dos gráficos. Contudo, devido à complexidade das ondas captadas, verificaram-se algumas dificuldades acrescidas na deteção dos tempos de chegada das ondas. Para diminuir este problema, optou-se então por bloquear os movimentos na base e nas fronteiras laterais, assim, quando é gerada uma onda S, o movimento vertical nas fronteiras laterais é bloqueado, contrariamente quando se gera uma onda P são bloqueadas as fronteiras laterais ao movimento horizontal.

Estes pressupostos não simulam na totalidade os ensaios laboratoriais, mas permitem a obtenção de ondas mais limpas e uma maior facilidade na deteção do tempo de chegada, refletindo-se assim em resultados mais fiáveis para poderem ser comparados com os resultados laboratoriais.

6.2.1. Análise Estática para Análise Dinâmica

Regularmente análises dinâmicas são precedidas por cálculos estáticos onde um estado de tensão está instalado no modelo. Quando termina o cálculo estático, o modelo está quase em repouso já que as forças em desequilíbrio são pequenas quando comparadas com as forças repulsivas entre as partículas [39].

Portanto, depois de atingido o equilíbrio estático, as condições de fronteira estáticas são substituídas por condições de velocidade, ou seja, as forças externas são eliminadas e são fixas as bolas. Quando a estabilização do modelo é alcançada o modo dinâmico é ligado, correspondendo à atribuição de um coeficiente de amortecimento dinâmico correto à rocha.

O dimensionamento da densidade é desligado, ou seja, os valores da massa das partículas retornam ao seu valor real, que geralmente é de várias ordens de grandeza inferior, este consiste no primeiro passo do cálculo. O segundo passo consiste na injeção de uma história de velocidade na base do modelo. A amplitude das ondas que serão injetadas nos modelos não pode ser escolhida arbitrariamente. As ondas de tensão devem ser pelo menos duas ou três ordens de grandeza maiores que o nível de “ruído” no modelo.

Como se acabou de descrever, o primeiro passo após a definição do modelo consiste então no estabelecimento do seu equilíbrio inicial, alcançado através da aplicação de ciclos de cálculo suficientes para que o assentamento sob o efeito do peso próprio estabilize. Para perceber se isso já aconteceu é necessário verificar o campo vetorial das velocidades, apurando se a orientação é coerente ou aleatória (Figura 6.2). Um campo de velocidades coerente indica um assentamento das partículas ainda a decorrer, o que significa que o modelo ainda não chegou a um estado de equilíbrio. Por sua vez um aspeto aleatório dos vetores de velocidade indica um arranjo esporádico das partículas, comprovando o estado de equilíbrio [1].

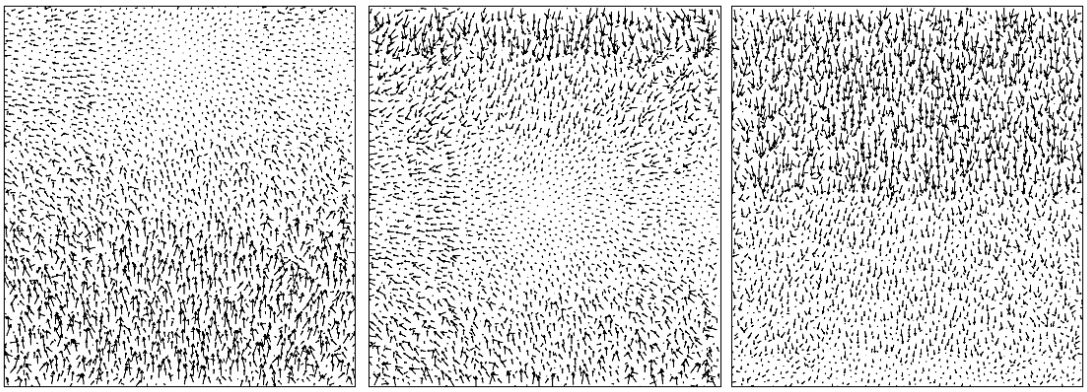


Fig. 6.2 – Campos de velocidades aleatórios [adaptado de [1]]

Este estado de equilíbrio é igualmente comprovado pela Figura 6.3 que representa o gráfico da média das forças desequilibradas, que deve ter um valor final próximo de zero, se as forças estiverem em equilíbrio.

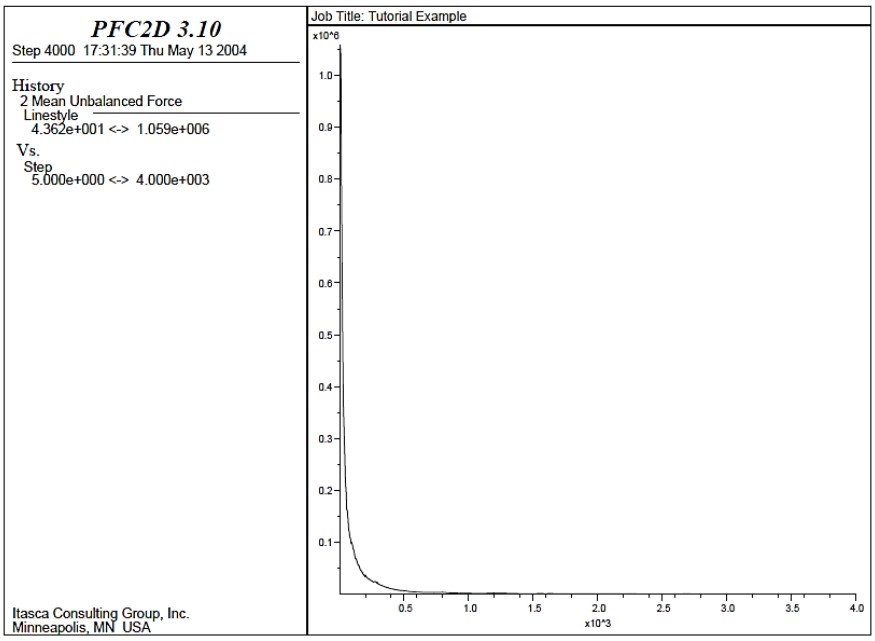


Fig. 6.3 – Média das forças desequilibradas do modelo em equilíbrio [adaptado de [30]]

Nos modelos em estudo foram aplicados três ciclos de cálculo para estabilização do assentamento sob o efeito do peso próprio. O primeiro ciclo com trinta mil passos, o segundo também com trinta mil passos, e por último o terceiro com dez mil passos, permitindo assim que a vibração na amostra desaparecesse. Na Figura 6.4 expõem-se os vetores da velocidade no último ciclo de cálculo (dez mil passos). Nesta figura é bem visível a aleatoriedade dos vetores da velocidade.

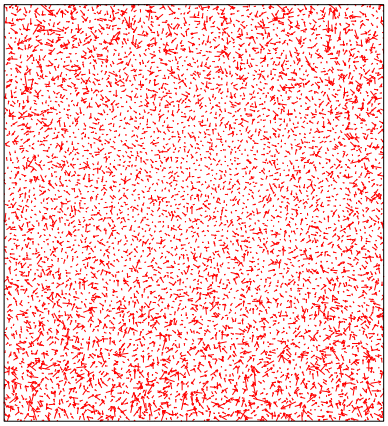


Fig. 6.4 – Vetores das velocidades no fim do terceiro ciclo de cálculo

6.2.2. Medição do Tempo de Chegada das Ondas

Em cada um dos modelos gerados, de modo a ser possível identificar os tempos de chegada das ondas simuladas, foram nomeadas três secções: secção S1, secção S2 e secção S3. A secção S1 corresponde à base da amostra, a secção S2 à zona central e a secção S3 ao topo da amostra. Para posterior comparação com outros resultados apenas terá maior interesse o tempo de chegada da onda à secção S3.

Quando é gerada uma onda de compressão (movimento vertical das partículas) as fronteiras laterais são bloqueadas ao movimento horizontal, contrariamente quando se gera uma onda de corte (movimento horizontal das partículas) é bloqueado o movimento vertical nas fronteiras laterais. Assim a velocidade vertical (Y) corresponde à velocidade da onda de compressão e a velocidade horizontal (X) corresponde à velocidade da onda de corte.

Em cada uma das secções são definidas as posições de cinco partículas, numeradas tal como se apresenta na Figura 6.5.

Esta numeração é feita de acordo com o tipo de onda que é emitida (primeiro algarismo), a secção onde a partícula se encontra (segundo algarismo) e com a posição que esta ocupa na respetiva secção da amostra (terceiro algarismo). A título de exemplo, numa amostra, uma partícula com a numeração 131, significa que nesta efetua-se a medição do tempo de chegada de uma onda de compressão (onda P), que a partícula se encontra na secção S3 e ocupa a primeira posição nesta secção. De igual forma, numa partícula numerada com 231, faz-se a medição do tempo de chegada de uma onda de corte (onda S), estando a partícula localizada na secção S3, ocupando a primeira posição nesta secção da amostra.

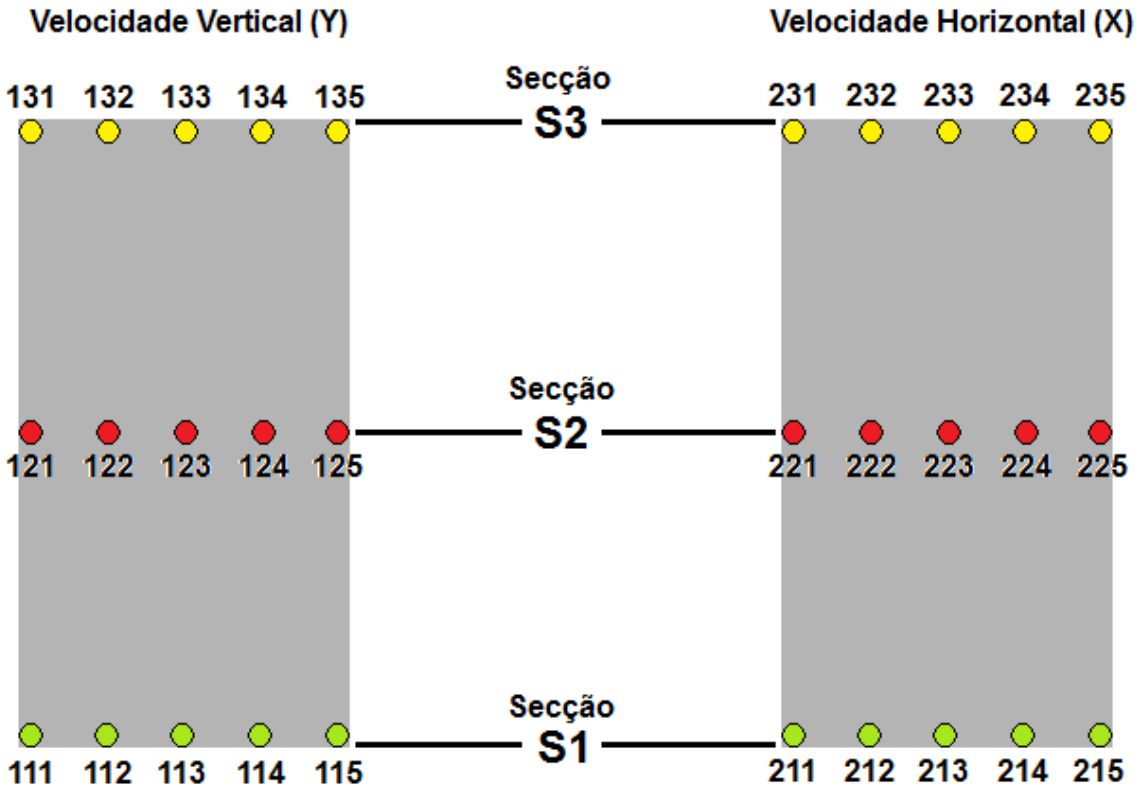


Fig. 6.5 – Esquema geral de uma amostra com indicação das secções e respetiva numeração das partículas para medição das ondas P (esquerda) e ondas S (direita)

Na figura seguinte, apresenta-se a configuração de uma das amostras estudadas e correspondente pormenorização de cada uma das secções e as respetivas partículas com posições fixas que permitem a medição dos tempos de chegada das ondas P e S a cada uma das respetivas secções.

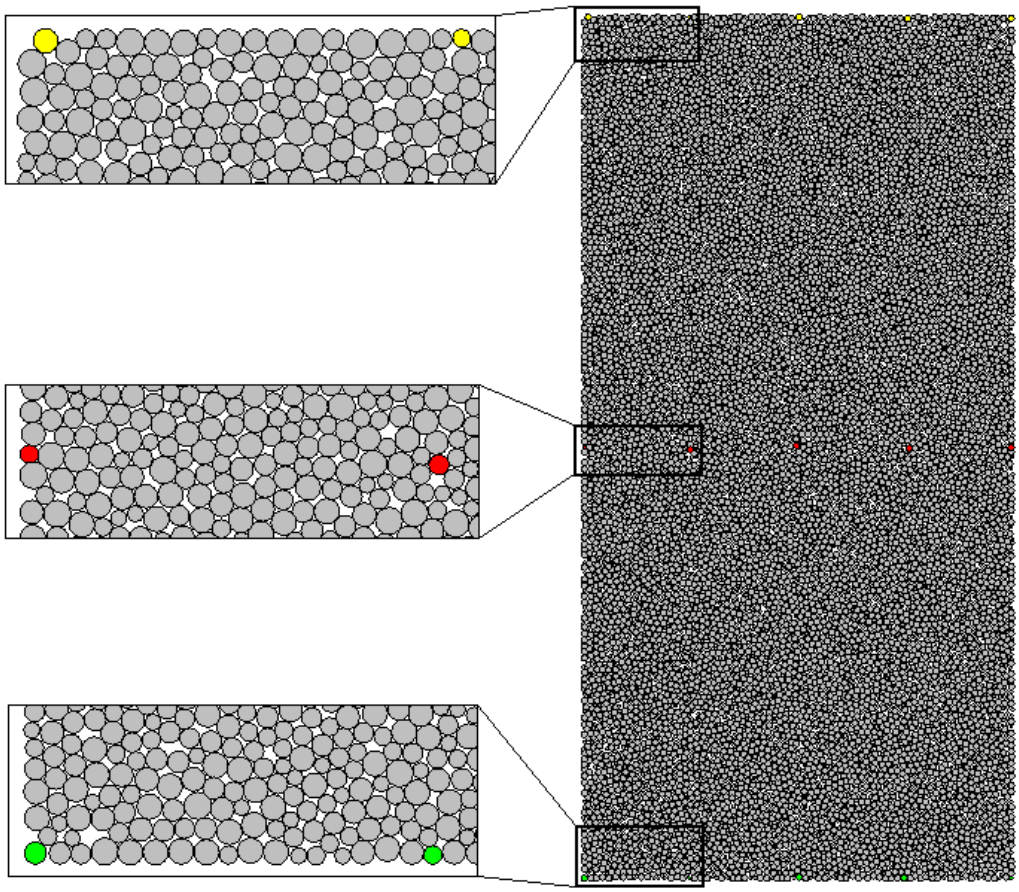


Fig. 6.6 – Configuração de uma das amostras ensaiada e respetivas partículas onde foram medidos os tempos de chegada das ondas nas várias secções

No decorrer deste trabalho, notou-se que a velocidade de propagação das ondas sísmicas é pouco sensível à alteração das frequências, apesar disso foram utilizadas ondas de compressão com uma frequência de 150 kHz e para as ondas de corte utilizou-se uma frequência de 90 kHz (frequência que geralmente é utilizada nos ensaios laboratoriais de ultrassons).

Após a emissão das ondas, é possível analisar os tempos de chegada a cada uma das secções da amostra. Portanto, no fim de um teste numa amostra através da emissão de ondas no PFC2D este gera-nos um ficheiro com os tempos de chegada das ondas a cada uma das partículas previamente identificadas. Neste trabalho apenas será alvo de análise o tempo de chegada da onda à secção S3, nesse caso, através da expressão 6.1 é possível calcular facilmente a velocidade da onda:

$$V = \frac{h}{t} \qquad (6.1)$$

onde, V corresponde à velocidade da onda (m/s), h é a altura da amostra (m) e t é o tempo de chegada (s) da onda à secção onde se efetua a medição. Após a determinação dos tempos de chegada das ondas através da modelação numérica são obtidas as velocidades das ondas sísmicas pela expressão anterior

e posteriormente são utilizadas as seguintes equações para a determinação dos valores de módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson.

$$E = \rho V_S^2 \frac{3 V_P^2 - 4 V_S^2}{V_P^2 - V_S^2} \qquad (6.2)$$

$$\nu = \frac{(V_P/V_S)^2 - 2}{2 .(V_P/V_S)^2 - 2} \qquad (6.3)$$

A Figura 6.7 reproduz o gráfico de propagação das ondas de compressão numa das amostras estudadas para cada uma das partículas com posição definida na secção S3. Analisando esta figura pode constatar-se que o tempo de chegada das ondas P, às partículas 131, 132, 133, 134, e 135 é aproximadamente igual para todas elas, ou seja, cerca de $2{,}77\times10^{-5}$ s o qual corresponde a uma velocidade aproximada de 3610 m/s visto que h = 0,1 m.

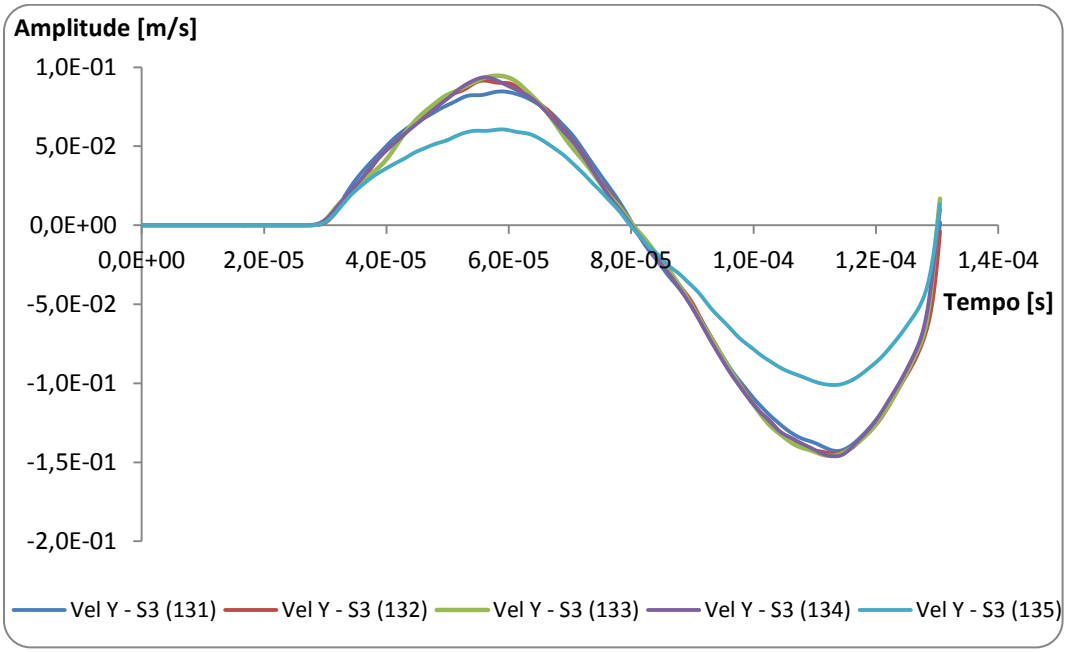


Fig. 6.7 – Gráfico de propagação e respetiva chegada das ondas P às várias partículas com posições definidas, na secção S3 da amostra

De forma similar na Figura 6.8 exibe-se o gráfico de propagação das ondas de corte, para as partículas 231, 232, 233, 234 e 235 definidas na Secção S3 da amostra.

Especial cuidado deverá ser tido em conta, quando se procede à análise de um gráfico de propagação de uma onda S, pois é possível verificar a chegada de uma onda P em primeiro lugar, devendo-se isto ao facto de não ser possível gerar uma onda S pura neste tipo de geometria. Assim o ponto de chegada de uma onda S poderá não coincidir com o ponto de chegada representado no gráfico de propagação, pelo que é necessário no caso das ondas S, uma observação mais pormenorizada e rigorosa da sua chegada às partículas.

De qualquer modo, o tempo de chegada das ondas S é aproximadamente idêntico às várias partículas com posições definidas na secção S3, isto é, as ondas chegam sensivelmente ao mesmo tempo quer as partículas se encontrem na zona central ou nas zonas laterais do topo da amostra. O tempo aproximado de chegada das ondas S às partículas da secção S3 é cerca de $4{,}93\times10^{-5}$ s o qual corresponde a uma velocidade das ondas de corte de aproximadamente 2028 m/s visto que h = 0,1 m.

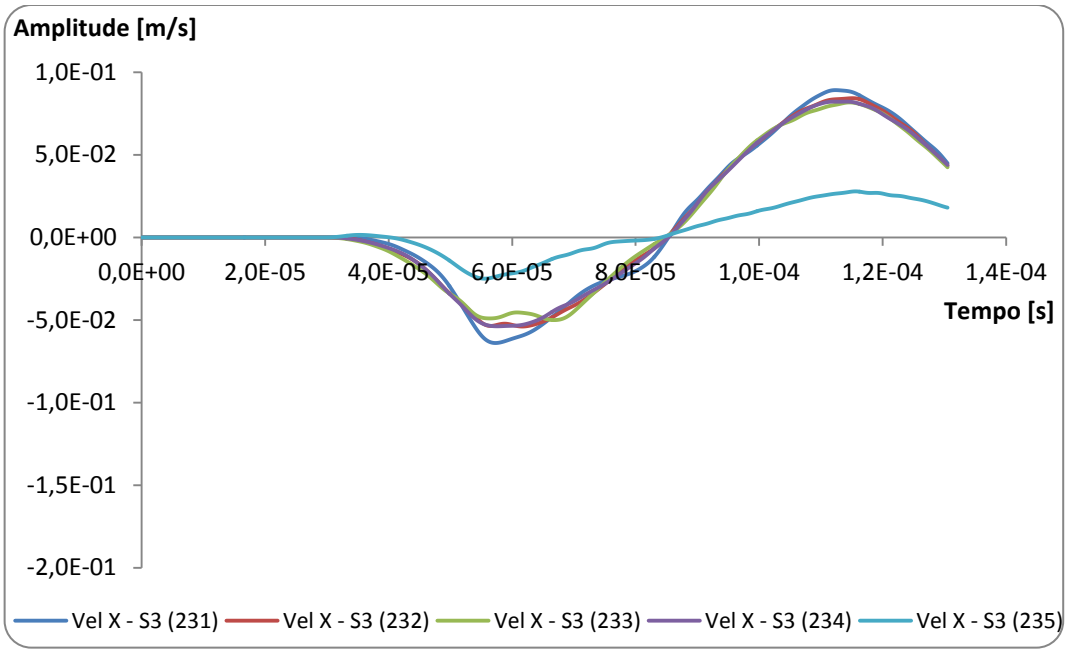


Fig. 6.8 – Gráfico de propagação e respetiva chegada das ondas S às várias partículas com posições definidas, na secção S3 da amostra

Dado que os tempos de chegada das ondas P são aproximadamente análogos para as várias partículas (131, 132, 133, 134 e 135) no presente estudo foram utilizados os tempos de chegada das ondas de compressão à partícula 133 para posterior determinação da velocidade. De forma idêntica para os tempos de chegada das ondas S, foram usados as medições relativas à partícula 233, ou seja, à partícula central da secção S3 do topo da amostra.

As diferenças na amplitude das ondas P e S, que se podem observar nas figuras anteriores, relativamente às partículas 135 e 235 quando comparadas com as amplitudes das outras partículas onde se efetuaram as medições, devem-se à fraca ligação das partículas 135 e 235 às partículas vizinhas, tal pode ser observado na Figura 6.9 onde se apresentam as ligações de contacto (esquerda) e as forças de contacto entre as partículas (direita).

A partícula representada a amarelo, diz respeito às partículas 135 ou 235, e como se pode verificar está unida por apenas uma ligação de contacto às partículas vizinhas, não estando sujeita a forças de contacto de compressão (negro) ou tração (vermelho).

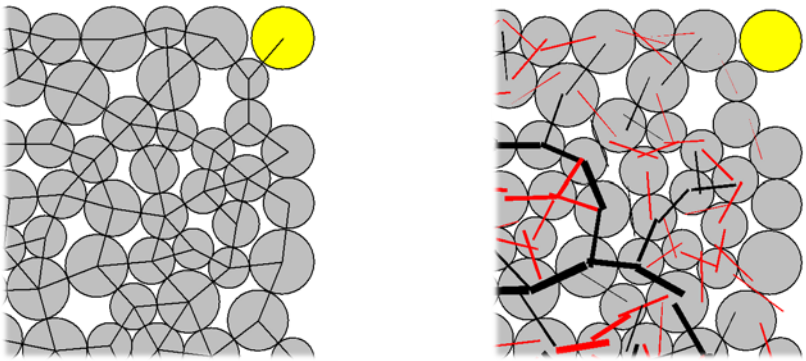


Fig. 6.9 – Pormenorização da partícula 135 ou 235, e respetivas ligações de contacto (esquerda) e forças de contacto entre partículas (direita)

6.3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Depois de serem emitidas as ondas e analisados os tempos de chegada das mesmas às partículas 133 e 233 localizadas na secção S3 das diversas amostras em estudo, determinaram-se os valores das velocidades das ondas P e S (expressão 6.1) e posteriormente os valores do módulo de deformabilidade (expressão 6.2) e do coeficiente de Poisson (expressão 6.3) para cada uma das amostras ensaiadas.

Tal como foi dito atrás, na análise de um gráfico da chegada de uma onda S, é possível verificar a chegada de uma onda P (de maior amplitude) em primeiro lugar, o que pode causar dificuldades na identificação do tempo de chegada da onda de corte. Nesse caso, por observação dos gráficos referentes à propagação de uma onda P, deve ser notado que esta apresenta sempre uma chegada mais limpa, sendo por isso mais fácil a sua identificação.

As medições dos tempos de chegada das ondas P na partícula 133 e das ondas S na partícula 233 foram efetuadas em gráficos de propagação de ondas, semelhantes aos que se apresentam nas figuras seguintes que foram geradas a partir da modelação dinâmica. As medições dos tempos de chegada para ambas as ondas foram efetuadas nos pontos que estão assinalados nas Figuras 6.10 a 6.15. Os gráficos expostos apesar de serem aqui representados juntos, foram obtidos separadamente, por emissão numa primeira fase de uma onda de compressão e posteriormente numa segunda fase por emissão de uma onda de corte.

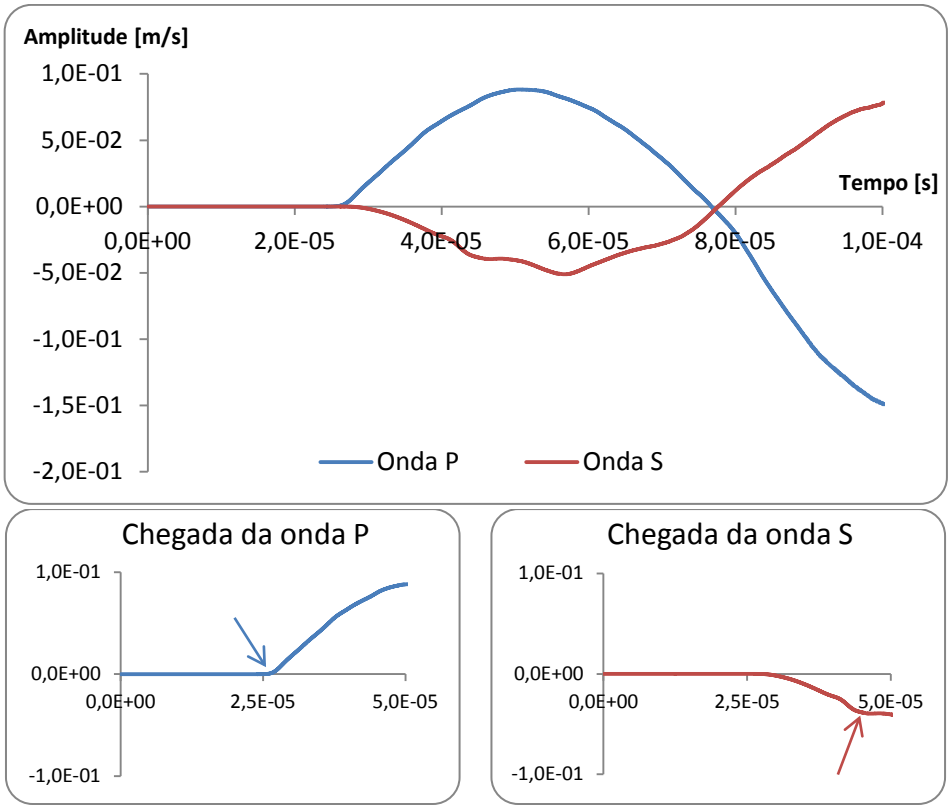


Fig. 6.10 – Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 1,0

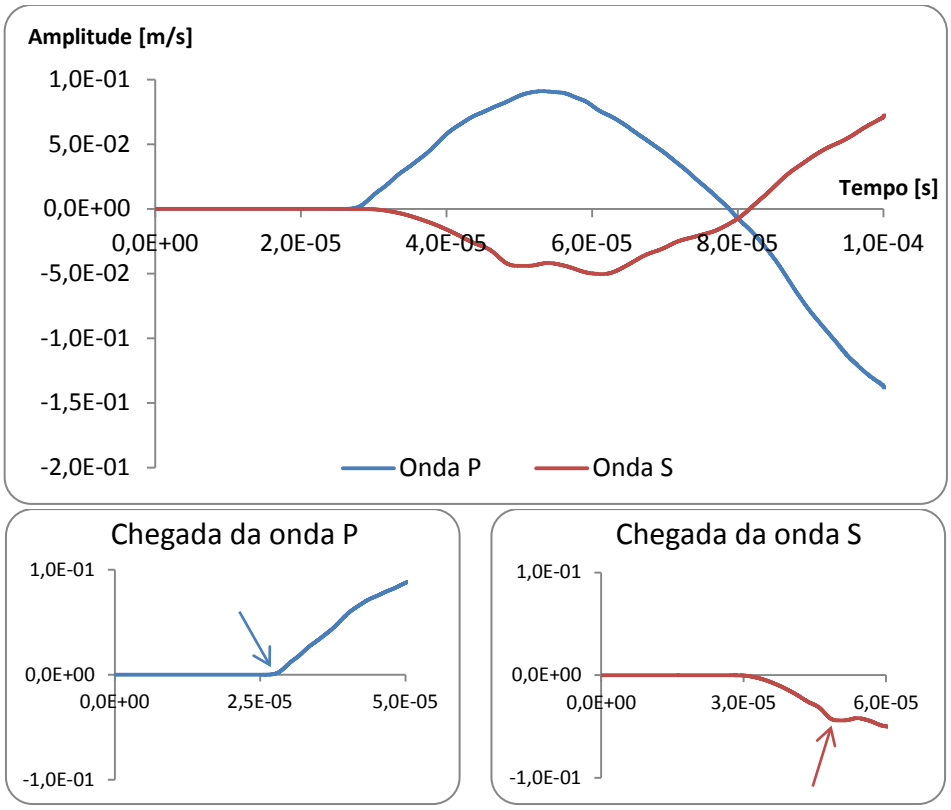


Fig. 6.11 – Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 1,66

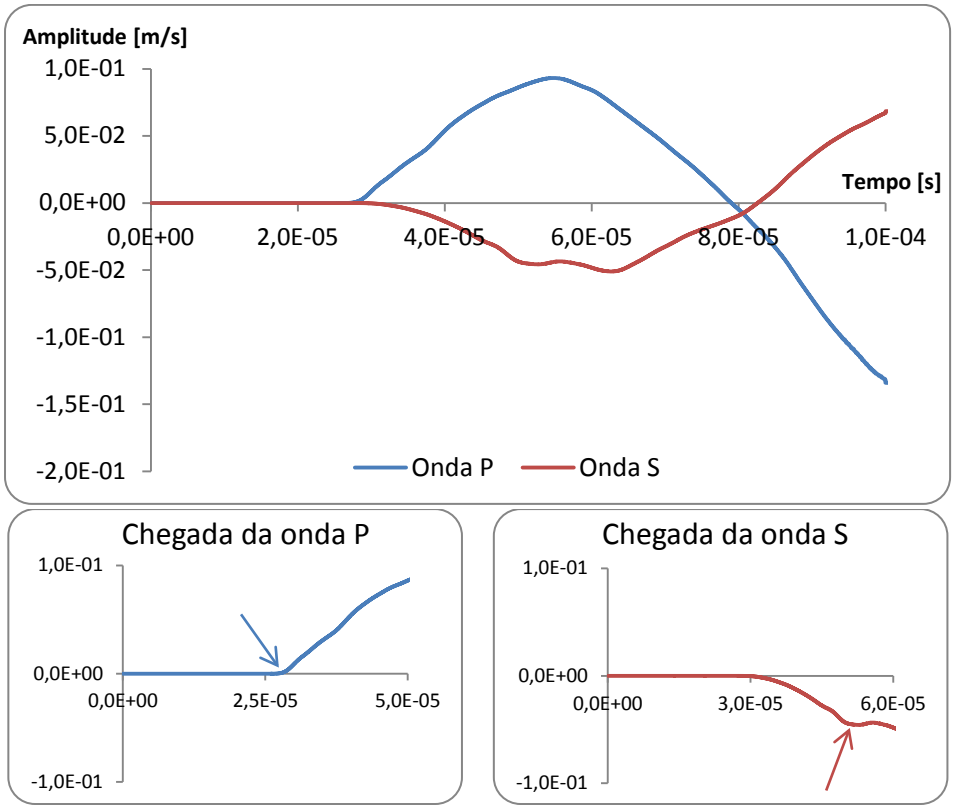


Fig. 6.12 – Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 2,0

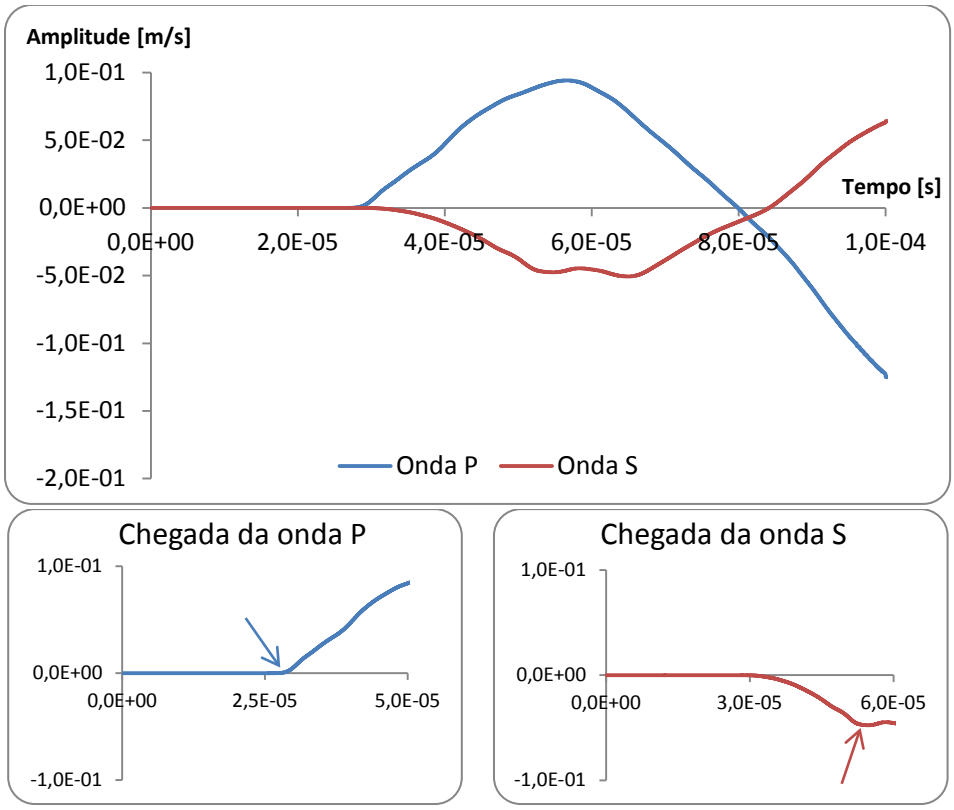


Fig. 6.13 – Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 2,5

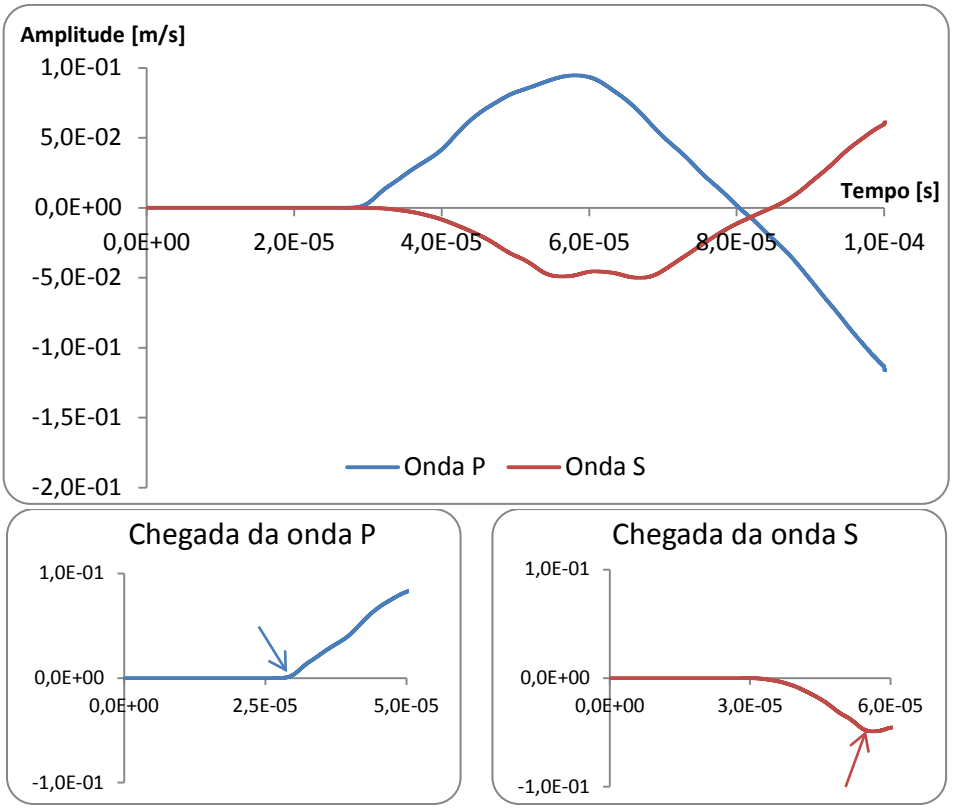


Fig. 6.14 – Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 3,0

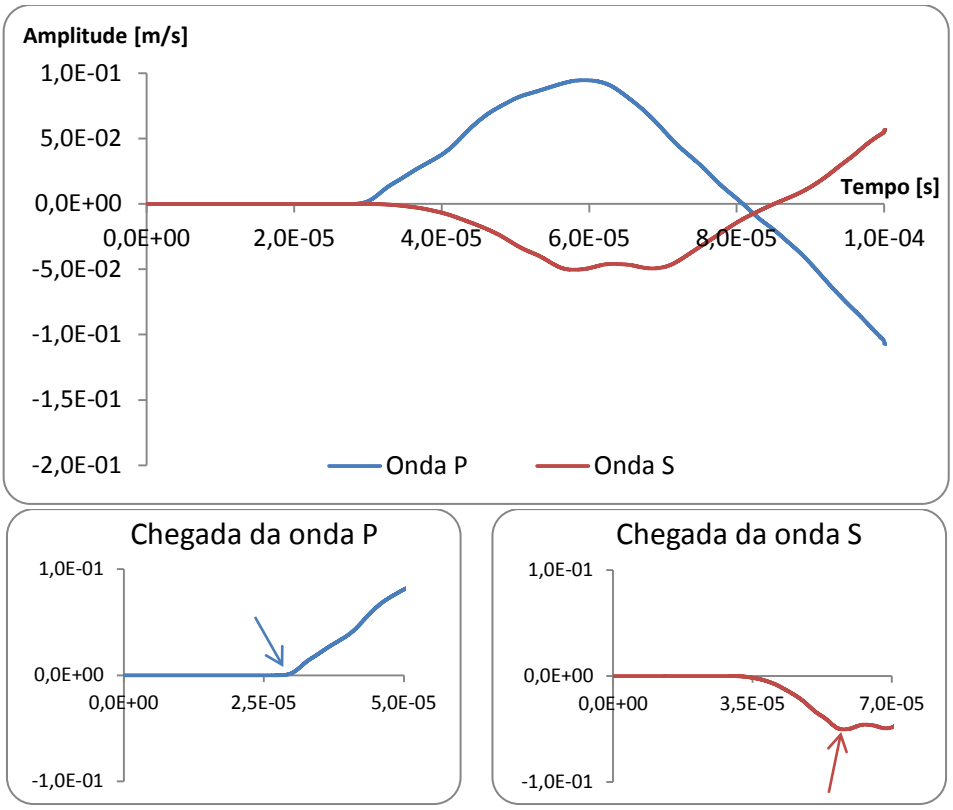


Fig. 6.15 – Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com E_c = 40 GPa e K_n/K_s = 3,5

Por análise dos gráficos das figuras anteriores, conclui-se que na utilização do PFC2D existem diferentes dificuldades consoante a onda gerada, sendo sempre mais fácil a deteção do tempo de chegada de uma onda de compressão. Isto acontece porque o modelo de partículas reproduz com bastante fidelidade o comportamento real, podendo ser usado para estudar estratégias de melhoria dos ensaios laboratoriais.

Na Tabela 6.1 apresentam-se os valores das velocidades das ondas P e das ondas S, para cada uma das amostras. Estes valores foram obtidos após leitura dos tempos de chegada nos gráficos de propagação e posterior colocação destes na expressão (6.1) possibilitando assim a determinação dos valores das velocidades. Como seria de esperar a velocidade das ondas P é sempre superior à das ondas S. Verifica-se também que a velocidade das ondas P aumenta com o aumento do módulo de contacto partícula-partícula (E_c) e diminui com o aumento da razão entre a rigidez das partículas (K_n/K_s). O mesmo acontece com a velocidade das ondas S.

Tabela 6.1 – Valores das velocidades das ondas P e S na secção S3, depois de serem emitidas as ondas para as várias amostras

E_c [Gpa]	K_n/K_s	PFC Dinâmico	
		V_P [m/s]	V_S [m/s]
35	1,0	3610	2353
	1,66	3584	2208
	2,0	3509	2066
	2,5	3497	1969
	3,0	3425	1965
	3,5	3401	1880
40	1,0	3817	2545
	1,66	3774	2336
	2,0	3759	2331
	2,5	3676	2217
	3,0	3610	2123
	3,5	3546	2058
45	1,0	4237	2841
	1,66	4000	2513
	2,0	3992	2392
	2,5	3906	2331
	3,0	3891	2273
	3,5	3831	2155

Tabela 6.1 (continuação) – Valores das velocidades das ondas P e S na secção S3, depois de serem emitidas as ondas para as várias amostras

E_c [Gpa]	K_n/K_s	PFC Dinâmico	
		V_P [m/s]	V_S [m/s]
50	1,0	4464	2874
	1,66	4292	2625
	2,0	4202	2513
	2,5	4082	2410
	3,0	3984	2358
	3,5	3937	2273
60	1,0	4831	3125
	1,66	4739	2778
	2,0	4695	2695
	2,5	4505	2618
	3,0	4405	2532
	3,5	4348	2457

A Figura 6.16 permite visualizar como evoluem as velocidades das ondas de compressão e das ondas de corte com o aumento dos valores de K_n/K_s para os vários valores de E_c que foram utilizados para gerar as amostras. Verifica-se que mantendo o valor de K_n constante (sendo E_c diretamente proporcional a K_n) e diminuindo o valor de K_s é percetível que os valores de V_P e V_S também irão diminui, tal como pode ser observado na figura seguinte.

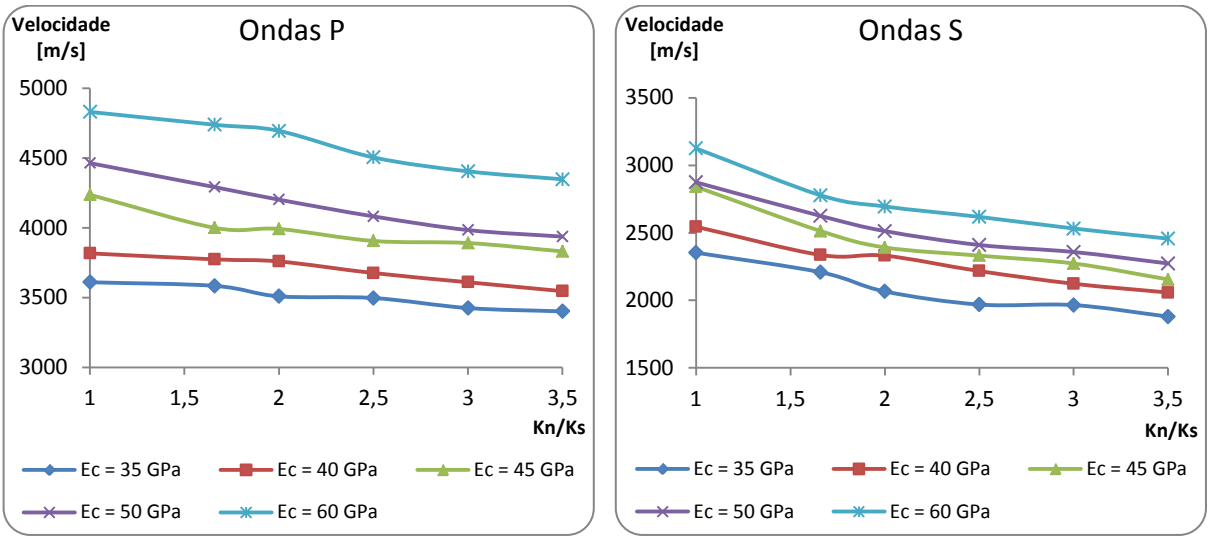


Fig. 6.16 – Velocidades das ondas P e S que foram obtidas para as amostras que inicialmente formam geradas com os vários valores de E_c

6.3.1. Comparação dos Resultados Numéricos Estáticos e Dinâmicos

Os valores das velocidades das ondas P e S apresentados na Tabela 6.1 foram colocados nas equações 6.2 e 6.3 atrás apresentadas, permitindo a determinação dos valores do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson dinâmicos, sendo apresentados na Tabela 6.2 em paralelo com os valores estáticos.

Tabela 6.2 – Resultados do módulo de deformabilidade (*E*) e do coeficiente de Poisson (*v*) para o cálculo estático e cálculo dinâmico, para as várias amostras

E_c [GPa]	K_n/K_s	Plane Stress (Wall Based)			
		PFC Estático		PFC Dinâmico	
		E [GPa]	*v* [-]	*E* [GPa]	*v* [-]
35	1,0	30,8	0,10	31,3	0,13
	1,66	27,5	0,17	29,1	0,19
	2,0	26,1	0,20	26,4	0,23
	2,5	24,6	0,23	24,6	0,27
	3,0	23,7	0,27	24,6	0,25
	3,5	22,4	0,29	22,6	0,28
40	1,0	35,0	0,09	35,6	0,10
	1,66	31,0	0,18	32,5	0,19
	2,0	29,9	0,23	32,3	0,19
	2,5	28,2	0,28	29,8	0,21
	3,0	26,8	0,31	27,8	0,24
	3,5	25,6	0,34	26,4	0,25
45	1,0	39,4	0,09	44,1	0,09
	1,66	35,0	0,17	37,1	0,17
	2,0	33,7	0,23	34,9	0,22
	2,5	31,7	0,27	33,2	0,22
	3,0	30,2	0,30	32,1	0,24
	3,5	28,8	0,33	29,5	0,27
50	1,0	43,5	0,10	47,3	0,15
	1,66	38,8	0,17	41,4	0,20
	2,0	37,2	0,21	38,6	0,22
	2,5	35,0	0,25	35,8	0,23
	3,0	33,3	0,28	34,2	0,23
	3,5	31,8	0,31	32,3	0,25

Tabela 6.2 (continuação) – Resultados do módulo de deformabilidade (*E*) e do coeficiente de Poisson (*v*) para o cálculo estático e cálculo dinâmico, para as várias amostras

E_c [GPa]	K_n/K_s	Plane Stress (Wall Based)			
		PFC Estático		PFC Dinâmico	
		E [GPa]	*v* [-]	*E* [GPa]	*v* [-]
60	1,0	51,7	0,10	55,7	0,14
	1,66	46,4	0,19	47,8	0,24
	2,0	44,5	0,23	45,5	0,25
	2,5	41,9	0,27	42,7	0,25
	3,0	39,8	0,31	40,2	0,25
	3,5	38,0	0,34	38,2	0,27

As figuras que se seguem representam a evolução dos módulos de deformabilidade e dos coeficientes de Poisson estáticos e dinâmicos obtidos neste trabalho. Os resultados que permitiram a obtenção destes gráficos resultam das análises com recurso ao PFC2D estático, apresentado no capítulo anterior, e com recurso ao PFC2D dinâmico em estudo no presente capítulo. Tal como é possível observar, em geral, os valores do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos, têm valores próximos uns dos outros, mas com os valores dinâmicos sempre ligeiramente superiores aos valores estáticos.

Analisando os gráficos, conclui-se que os valores do módulo de deformabilidade estático e dinâmico diminuem com o aumento da razão entre a rigidez normal e de corte das partículas (K_n/K_s) e aumentam com o aumento do módulo de contacto entre as partículas E_c, tal como seria de esperar.

Relativamente aos coeficientes de Poisson estáticos e dinâmicos, estes aumentam com o aumento da razão entre a rigidez normal e de corte das partículas (K_n/K_s controla ν) para os vários valores de E_c testados. Por observação dos gráficos, apura-se que para valores mais baixos de K_n/K_s os coeficientes de Poisson dinâmicos apresentam valores superiores aos resultantes para os coeficientes de Poisson estáticos, acontecendo o contrário para valores superiores de K_n/K_s.

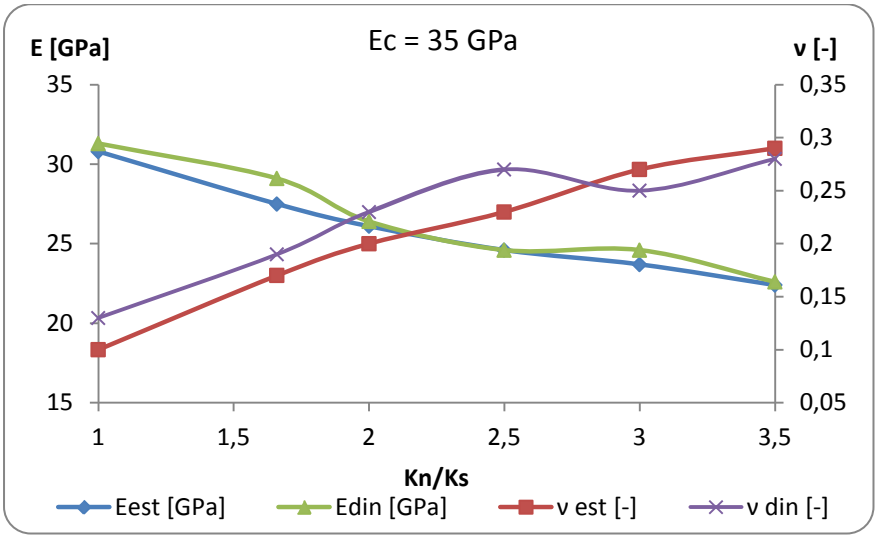


Fig. 6.17 – Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 35 GPa

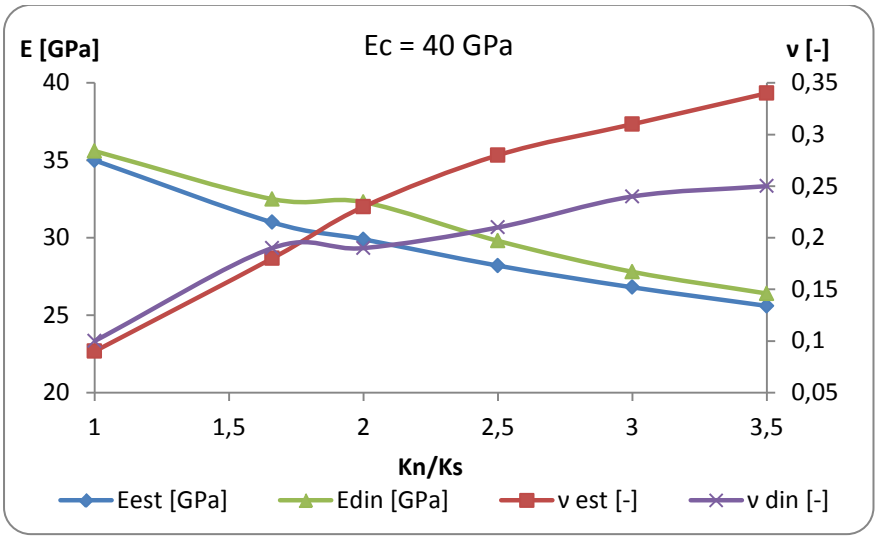


Fig. 6.18 – Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 40 GPa

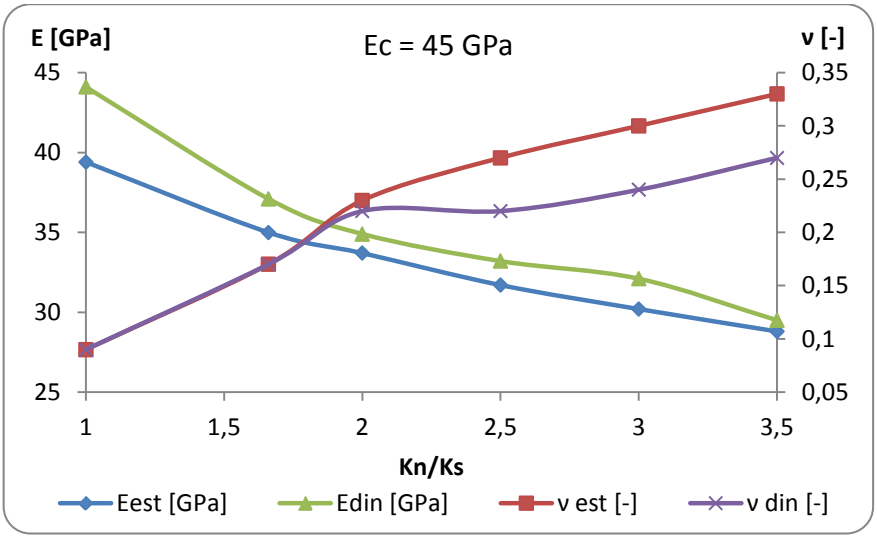


Fig. 6.19 – Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 45 GPa

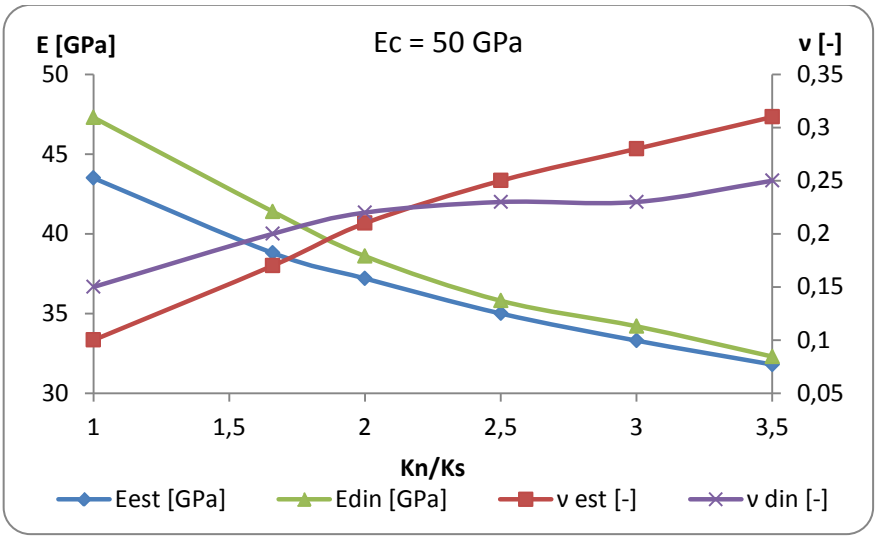


Fig. 6.20 – Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 50 GPa

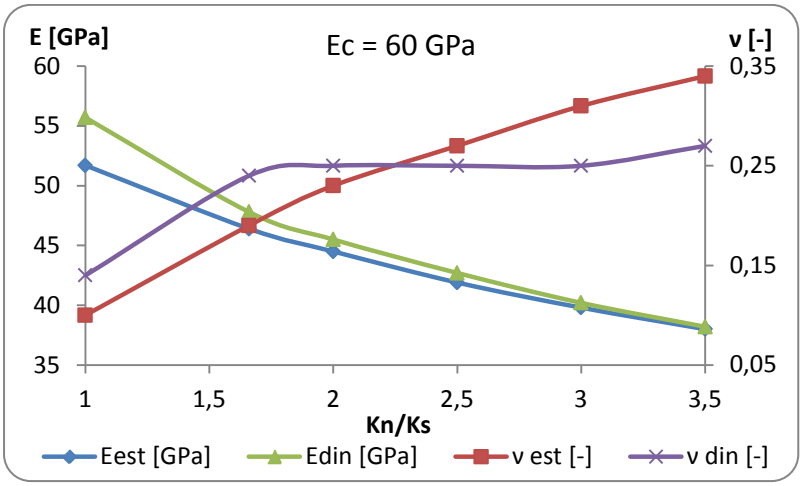


Fig. 6.21 – Evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos com K_n/K_s, referente à amostra gerada inicialmente com E_c = 60 GPa

6.3.2. Resultados da Modelação Dinâmica para as Amostras Geradas com a Variação do R_{MIN}

Na Figura 6.22 apresenta-se um dos gráficos de propagação das ondas P e S, resultante da medição das ondas nas partículas 133 (onda P) e 233 (onda S), localizadas na secção S3 das amostras que foram geradas para o estudo da variação do raio mínimo. O R_{min} é importante na medida em que o raio das partículas deve representar o tamanho dos grãos da rocha, mas valores baixos deste implicam o aumento do tempo de cálculo. As partículas usadas têm raio entre o R_{min} e 1,6 × R_{min} seguindo uma distribuição estatística uniforme.

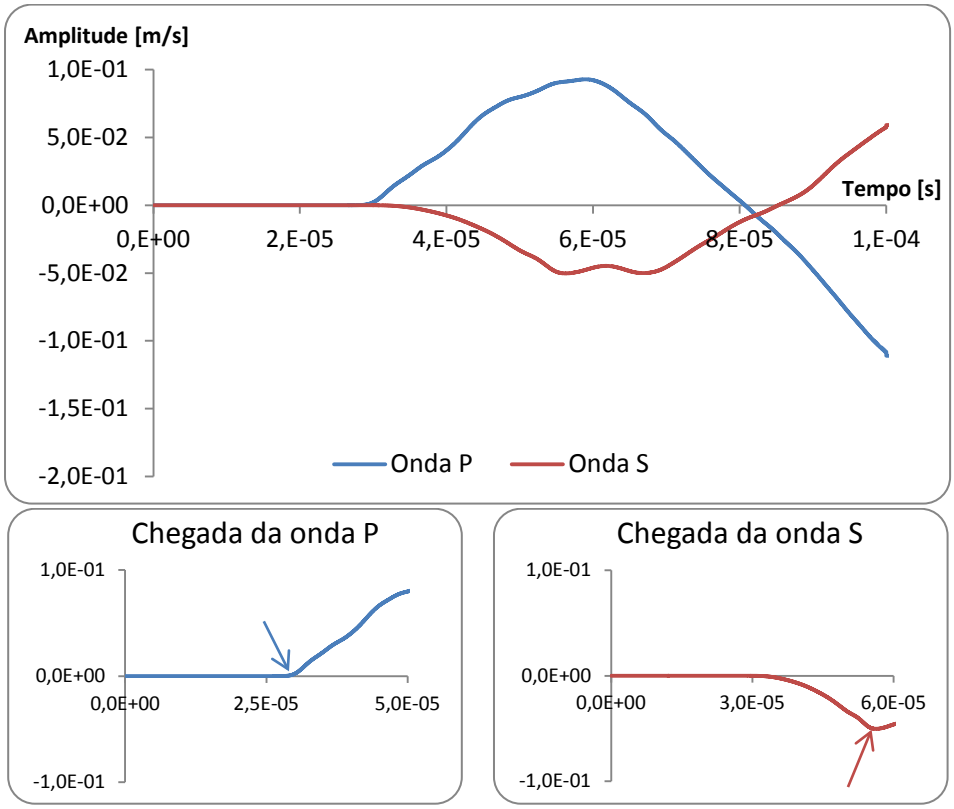


Fig. 6.22 – Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com R_{min} = 2,5×10^{-4} m

Na Tabela 6.3 apresentam-se os valores das velocidades das ondas P e S, que foram obtidos a partir dos gráficos de propagação das ondas aplicando a expressão 6.1. São apresentados os resultados para cada uma das amostras obtidas por variação do raio mínimo (R_{min}).

Tabela 6.3 – Valores das velocidades das ondas P e S na secção S3, para as amostras geradas com os vários valores de R_{min}

E_c [GPa]	K_n/K_s	R_{min} [m]	PFC Dinâmico	
			V_P [m/s]	V_S [m/s]
40	3,0	$2{,}0\times10^{-4}$	3521	2119
		$2{,}25\times10^{-4}$	3534	2114
		$2{,}5\times10^{-4}$	3559	2096
		$3{,}0\times10^{-4}$	3584	2083
		$5{,}0\times10^{-4}$	3597	2075
		$6{,}0\times10^{-4}$	3636	2058

Analisando as velocidades das ondas P e S que constam da tabela anterior juntamente com a observação da Figura 6.23 facilmente se verifica que a velocidade das ondas P aumenta ligeiramente com o aumento do raio mínimo das partículas. De modo contrário a velocidade das ondas S diminui com o aumento do raio mínimo. Apesar da velocidade das ondas P aumentar, e a velocidade das ondas S diminuir, as variações nos valores não são muito consideráveis.

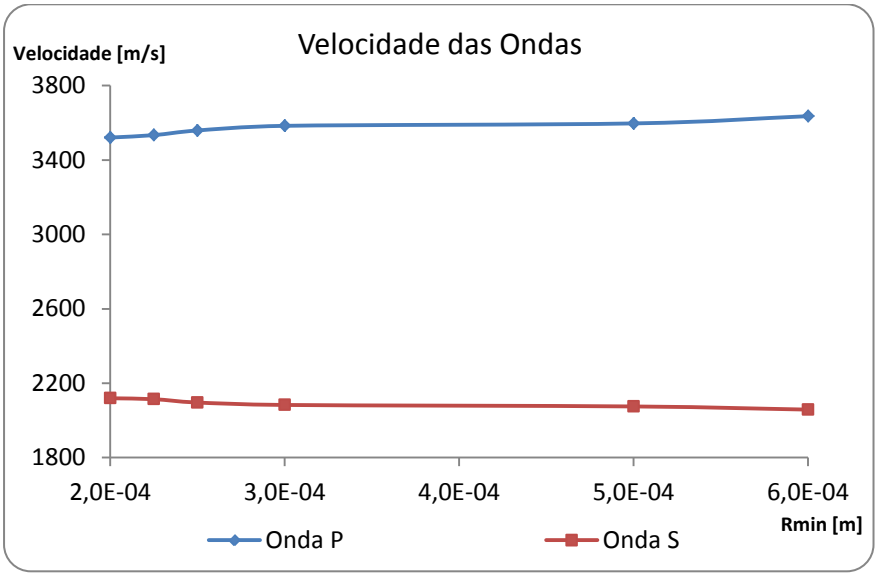


Fig. 6.23 – Velocidade das ondas P e S obtidas para as amostras geradas variando o raio mínimo das partículas (R_{min})

Mostram-se na Tabela 6.4 os valores do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson para o caso estático e para o caso dinâmico decorrentes da obtenção das velocidades das ondas sísmicas.

Tabela 6.4 – Resultados do módulo de deformabilidade (*E*) e do coeficiente de Poisson (*v*) para o cálculo estático e cálculo dinâmico, das amostras geradas com os vários valores usados de R_{min}

E_c [Gpa]	K_n/K_s	R_{min} [m]	Plane Stress (Wall Based)			
			PFC Estático		PFC Dinâmico	
			E [GPa]	*v* [-]	*E* [GPa]	*v* [-]
40	3,0	$2{,}0\times10^{-4}$	26,9	0,27	27,3	0,22
		$2{,}25\times10^{-4}$	26,6	0,28	27,3	0,22
		$2{,}5\times10^{-4}$	26,8	0,28	27,1	0,23
		$3{,}0\times10^{-4}$	26,6	0,28	27,0	0,24
		$5{,}0\times10^{-4}$	26,3	0,27	26,9	0,25
		$6{,}0\times10^{-4}$	26,4	0,28	26,8	0,26

Na figura seguinte mostra-se como evoluem os módulos de deformabilidade e os coeficientes de Poisson no caso estático e caso dinâmico para os vários valores de R_{min} utilizados. Observa-se que os valores estáticos e dinâmicos de *E* são próximos, sendo os valores relativos ao caso dinâmico mais elevados que os do caso estático. Relativamente aos resultados do coeficiente de Poisson estático, este apresenta valores também próximos entre si, e sempre superiores aos resultados do coeficiente de Poisson dinâmico. Neste último pode constatar-se o aumento dos valores com o aumento do raio mínimo das partículas, mas nunca ultrapassando os valores estáticos do coeficiente de Poisson.

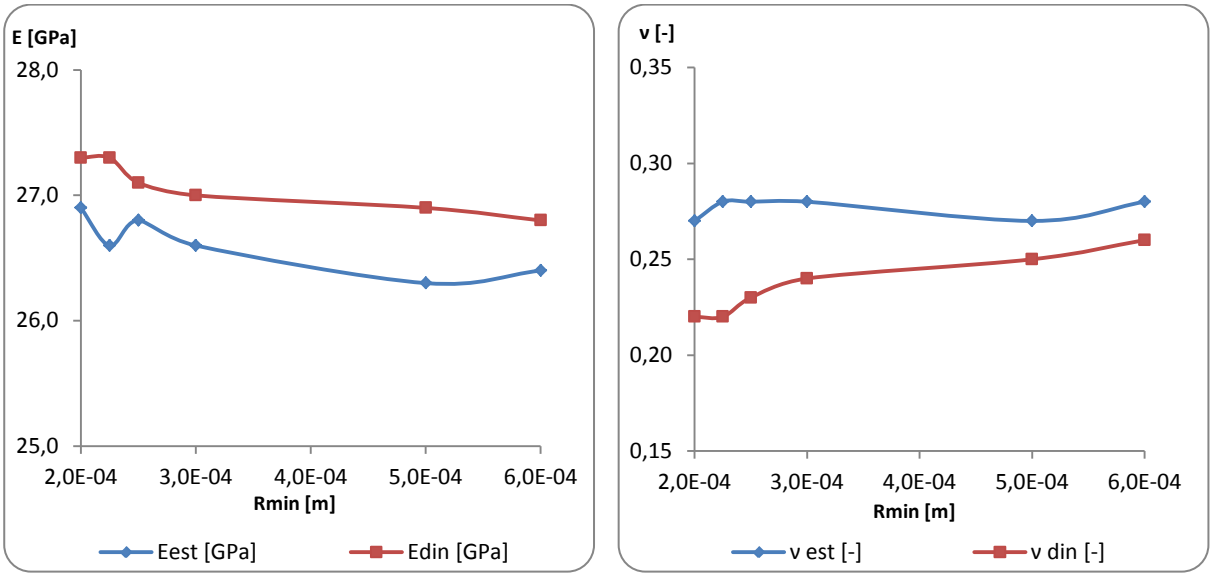


Fig. 6.24 – Gráficos do módulo de deformabilidade (esquerda) e do coeficiente de Poisson (direita) para o caso estático e caso dinâmico com os vários valores de R_{min}

Conclui-se que esta avaliação não é muito importante, tanto nas propriedades estáticas como dinâmicas, tal como indica o manual do PFC2D.

6.3.3. Resultados da Modelação Dinâmica para as Amostras Geradas com a Variação da Relação R_{MAX}/R_{MIN}

A Figura 6.25 exposta de seguida diz respeito ao gráfico de propagação das ondas gerado a partir da modelação dinâmica de uma das amostras obtidas por variação da relação entre o raio máximo e mínimo das partículas (R_{max}/R_{min}). Neste caso, manteve-se constante R_{min} variando-se o valor de R_{max}.

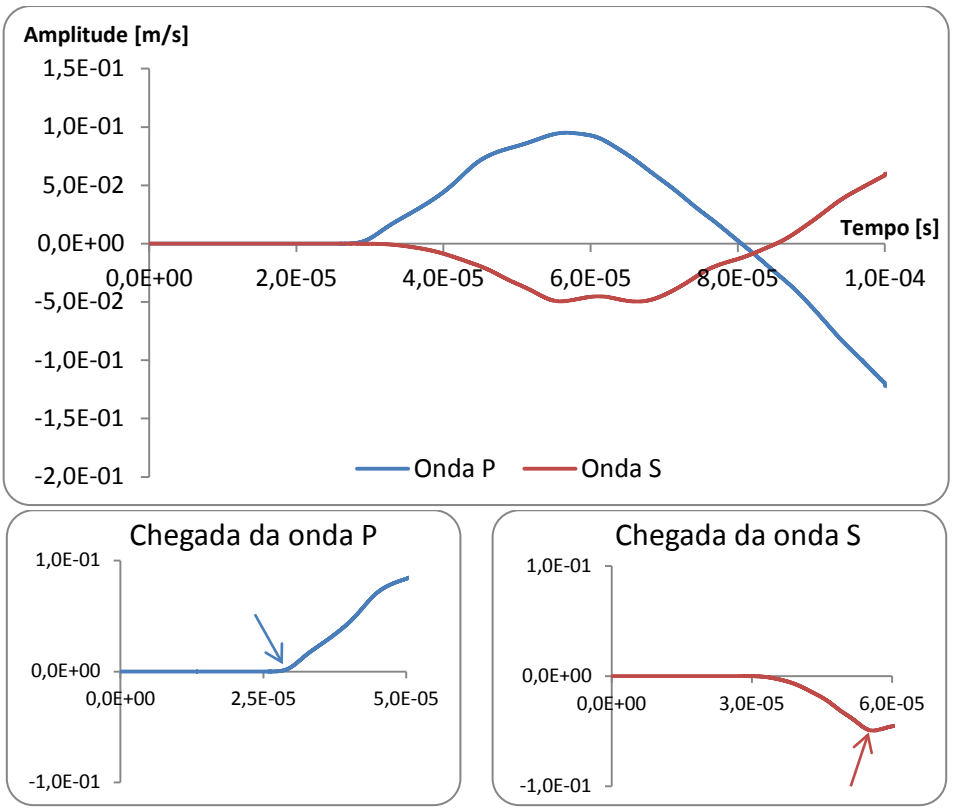


Fig. 6.25 – Gráfico de propagação das ondas na secção S3 da amostra gerada com R_{max}/R_{min} = 2,5

Na Tabela 6.5 apresentam-se os valores das velocidades para as ondas P e S. Por observação dos valores abaixo, depreende-se que a velocidade das ondas P cresce com o aumento da relação entre o raio máximo e mínimo, exceto para R_{max}/R_{min} = 1,0 que apresenta o maior valor da velocidade das ondas P. Relativamente às ondas S, o oposto acontece, a sua velocidade diminui com o aumento da relação entre os raios das partículas, à exceção, uma vez mais, do valor de R_{max}/R_{min} = 1,0. As diferenças verificadas nos valores das velocidades das ondas P e S para R_{max}/R_{min} = 1,0 devem-se ao facto de este valor conduzir a uma amostra onde as "bolas" são todas iguais, contribuindo assim para uma menor complexidade dos arranjos. O manual do PFC2D indica como valor de referência R_{max}/R_{min} = 1,66.

Tabela 6.5 – Valores das velocidades das ondas P e S na secção S3, para as amostras geradas com os vários valores de R_{max}/R_{min}.

E_c [Gpa]	K_n/K_s	R_{max}/R_{min}	PFC Dinâmico	
			V_P [m/s]	V_S [m/s]
40	3,0	1,0	3731	2247
		1,25	3534	2128
		1,66	**3546**	**2123**
		2,0	3597	2101
		2,5	3650	2092

A observação da Figura 6.26 permite de forma mais explícita verificar como evoluem as velocidades das ondas sísmicas com o aumento da relação R_{max}/R_{min}. De um modo geral, apesar da velocidade da onda P aumentar, e da velocidade da onda S diminuir, é de salientar que as variações nestes valores não são muito consideráveis.

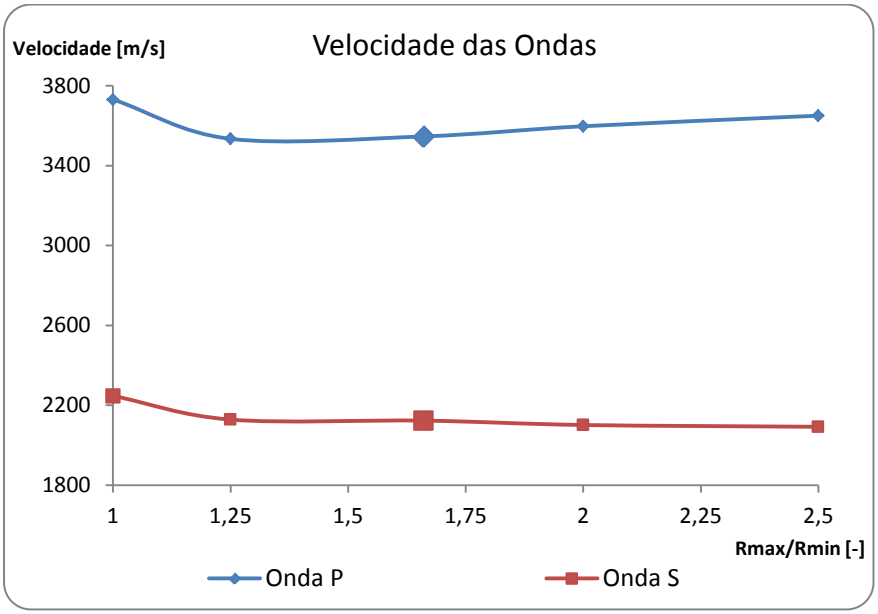


Fig. 6.26 – Velocidade das ondas P e S obtidas para as amostras geradas por variação da relação entre o raio máximo e mínimo das partículas (R_{max}/R_{min})

Na Tabela 6.6 apresentam-se os resultados estáticos e dinâmicos da modelação, ou seja, os valores do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson para ambos os casos.

Tabela 6.6 – Resultados do módulo de deformabilidade (*E*) e do coeficiente de Poisson (*v*) para o cálculo estático e cálculo dinâmico, nas amostras geradas para os valores de R_{max}/R_{min} usados

E_c [Gpa]	K_n/K_s	R_{max}/R_{min}	Plane Stress (Wall Based)			
			PFC Estático		PFC Dinâmico	
			E [GPa]	v [-]	E [GPa]	v [-]
40	3,0	1,0	30,5	0,28	30,7	0,22
		1,25	26,3	0,31	27,5	0,22
		1,66	**26,8**	**0,31**	**27,5**	**0,22**
		2,0	27,1	0,26	27,4	0,24
		2,5	27,4	0,28	27,5	0,26

A Figura 6.27 exibe a evolução do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson para o caso estático e dinâmico com os vários valores da relação entre o raio máximo e mínimo usados.

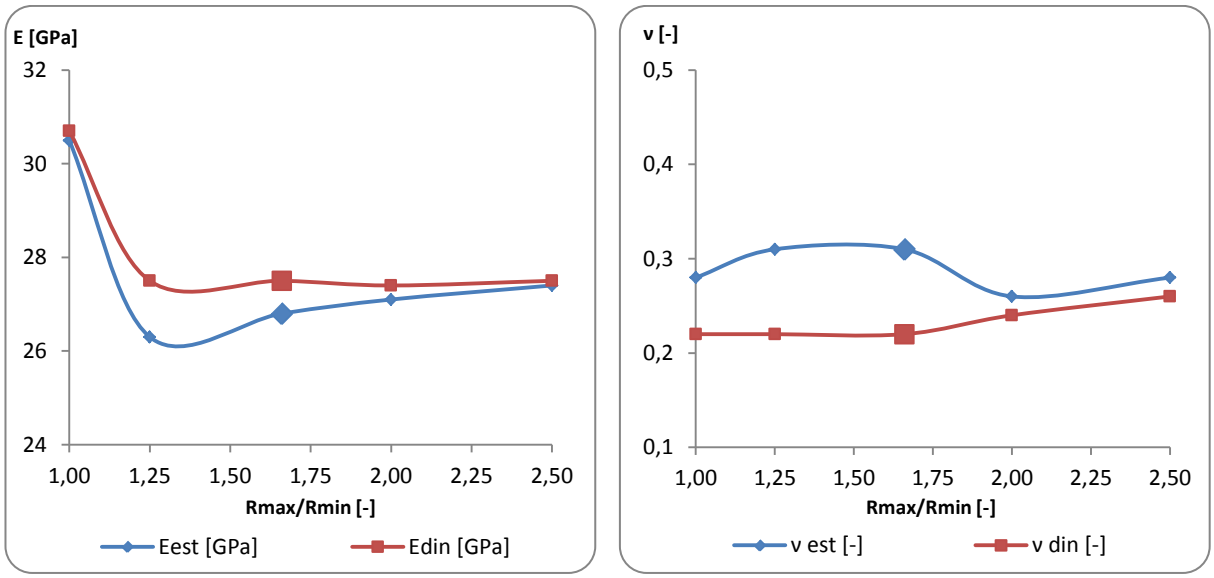


Fig. 6.27 – Gráficos do módulo de deformabilidade (esquerda) e do coeficiente de Poisson (direita) para o caso estático e caso dinâmico com os vários valores de R_{max}/R_{min}

Percebe-se pela análise do gráfico relativo aos valores de E estáticos e dinâmicos que estes são próximos, sendo os valores relativos ao caso dinâmico mais elevados. O maior valor de E para ambos os casos corresponde a R_{max}/R_{min} = 1,0 onde se verifica um comportamento instável das curvas, sendo que os restantes apresentam um comportamento estável convergindo para valores semelhantes em R_{max}/R_{min} = 2,5. Relativamente aos resultados do coeficiente de Poisson para o caso estático são superiores aos resultados do coeficiente de Poisson para o caso dinâmico. Com o aumento de R_{max}/R_{min}, verifica-se que no caso estático os valores de ν variam de forma mais acentuada, sendo que os valores no caso dinâmico mantêm-se na parte inicial, crescendo ligeiramente na parte final, tendência que também é observada nos valores de ν estáticos.

Depois de analisados os resultados numéricos estáticos e dinâmicos é permitido concluir que, globalmente, os modelos micromecânicos aproximam bastante bem os valores do módulo de deformabilidade estático e dinâmico. Uma análise pormenorizada aos resultados estáticos e dinâmicos do PFC2D permite verificar que os valores na generalidade são muito próximos entre si, sendo os resultados dinâmicos do módulo de deformabilidade mais elevados, o que é expectável. Apesar de, por vezes, existirem algumas dificuldades na leitura da chegada das ondas S, a modelação micromecânica reproduz de forma eficaz a realidade com bastante fiabilidade.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

Os modelos numéricos neste trabalho são empregues para simular a transmissão das ondas de tensão tornando possível a diminuição da incerteza associada à propagação de ondas em maciços rochosos com geometrias e propriedades complexas. Estes modelos servem também de apoio à conceção e planeamento de trabalhos de desmonte e fragmentação de rocha, e às medidas de controlo e mitigação, sendo uma das suas principais vantagens poder ser utilizado antes do começo de determinados trabalhos ajudando a compreender os fenómenos de propagação das vibrações. Ao ajudarem a compreensão destes fenómenos permitem o estudo para uma grande multiplicidade de situações que não se encontram em cenários reais.

Nos modelos de partículas, constituídos por vários milhares de partículas com arranjos e dimensões arbitrárias, a relação entre os parâmetros dos modelos e as propriedades dos materiais é encontrada através de um processo de calibração, sendo necessária a presença de um número suficiente de partículas para que se possam reproduzir os mecanismos de rotura que influenciam as propriedades de resistência.

De forma a efetuar a validação entre os resultados estáticos e dinâmicos dos ensaios, foi utilizado o código PFC2D, um programa de modelação micromecânica com recurso ao método de elementos discretos. Gerou-se um conjunto de amostras em que se variaram as propriedades mais importantes: rigidez dos contactos e raio das partículas tendo-se determinado o módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson estáticos de cada assemblagem. Posteriormente, as mesmas amostras foram sujeitas à passagem de ondas P e ondas S com frequências semelhantes às utilizadas nos ensaios laboratoriais e foi determinado, para cada caso, o módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson dinâmicos.

Os resultados estáticos foram comparados com os resultados dinâmicos. Esta comparação de resultados permitiu aferir a adequabilidade desta técnica a materiais rochosos e a potencialidade da modelação numérica micromecânica de traduzir fielmente a propagação das ondas sísmicas em termos computacionais. Analisando os resultados da modelação, verifica-se que os valores do módulo de deformabilidade dinâmico são sempre superiores aos valores do módulo de deformabilidade estático, como seria expectável.

Apesar das dificuldades inerentes à interpretação dos resultados, como as leituras dos tempos de chegada principalmente das ondas S, considera-se que a modelação numérica é um método que

reproduz de forma eficaz a realidade, com procedimento relativamente simples e de baixo custo computacional.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Relativamente a desenvolvimentos futuros e novas aplicações destes modelos, existe uma ampla multiplicidade de campos de investigação que podem ser seguidos.

Na modelação efetuada foi adotado um amortecimento igual a zero, de modo a simplificar o problema, no entanto, seria de grande interesse fazer toda a análise mas recorrendo a valores de amortecimento mais altos para uma maior aproximação da modelação à realidade.

Poderia também desenvolver-se uma metodologia de leitura do tempo de chegada da onda menos subjetiva, para evitar problemas associados a essa subjetividade.

Com a utilização do método dos elementos discretos (PFC), uma vez que este tem disponíveis duas versões, 2D e 3D, seria de grande interesse fazer a modelação mais pormenorizada da propagação das ondas, ou seja, utilizando a versão tridimensional do software, para posteriormente melhor poder compreender e visualizar todo o processo de transmissão e receção das ondas sísmicas.

Uma análise interessante, e para a qual existem no PFC os meios necessários ao seu estudo, seria relativamente à propagação de ondas em provetes de rocha, verificando de maneira mais efetiva a influência das condições de fronteira laterais na velocidade de propagação.

Não menos interessante seria analisar a influência da forma de carregamento na amostra, comparando o carregamento em toda a base do modelo com o carregamento usado por exemplo nos ensaios de ultra-sons e de bender-elements. A verificação da eficácia das fronteiras absorventes contra ondas mistas (P e S) e ondas oblíquas poderia ser igualmente interessante.

BIBLIOGRAFIA

[1] Resende, R., *An Investigation of Stress Wave Propagation through Rock Joints and Rock Masses*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, (2010).

[2] Resende, R., *Um Modelo para o Estudo de Cenários de Rotura de Fundações Rochosas de Barragens*. Tese de Mestrado em Engenharia de Estruturas, LNEC, (2003).

[3] Jing, L., Hudson J., *Numerical Methods in Rock Mechanics*. Internacional Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39, (2002), pp. 409-427, Division of Engineering Geology, Royal Institute of Technology.

[4] http://ecidadania.blogspot.pt. Consultado em Março de 2012.

[5] Hartman, H.L., *Mining Engineering Handbook*. Segunda Edição, Volume I, (1992). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Colorado, E. U. A.

[6] Bernardo, P., *Impactes Ambientais do Uso de Explosivos na Escavação de Rochas, com Ênfase nas Vibrações*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia de Minas, Universidade Técnica de Lisboa, (2004).

[7] Jimeno, E.L., *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. 2ª Edição, (2003), ITGE, Espanha.

[8] Fortunato, E., *Renovação de Plataformas Ferroviárias - Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Cooperação FEUP-LNEC, (2005)

[9] Gonçalves, S., *Vibrações Induzidas em Edifícios Devidas ao Tráfego Ferroviário de Alta Velocidade*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, (2008).

[10] Bahrekazemi, M., *Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction*. Dissertação de Doutoramento, Royal Institute of Technology Stockholm, (2004).

[11] Johnston, D.H., *Attenuation of Seismic Waves in Dry and Saturated Rocks*. Massachusets Institute of Technology, (1979), Massachusets.

[12] Konya, C.J., Walter, E. J., *Surface Blast Design*. Prentice-Hall Inc., (1990). New Jersey, USA.

[13] http://www.iag.usp.br/~eder/ensinarcompesquisa/Sismologia_f.pdf. Consultado em Maio de 2012

[14] http://www.obsis.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=66&lang. Consultado em Maio de 2012

[15] Jing, L., *A Review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modelling for Rock Mechanics and Rock Engineering*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40, (2003), pp. 283-353, Division of Engineering Geology, Royal Institute of Technology, Technikenringen, Stockholm, Sweden.

[16] Jing, L. and O. Stephansson, *Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering Theory and Applications*. Developments in Geotechnical Engineering, 85, (2006), Elsevier Ltd.

[17] LNEC, *O Projecto Estrutural em Obras Subterrâneas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, (1987).

[18] Lourenço, P., Rots, J., *Multisurface Interface Model for Analysis of Mansonry Strutures*. Journal of Engineering Mechanics, 123 (7), (1997).

[19] Lemos, J. V., *O Método dos Elementos Discretos no Estudo de Maciços Rochosos*. Tese apresentada para acesso à categoria de investigador auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, (1989).

[20] Cundall, P., *A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rocky Systems*. Proceedings of the Symposium of the Internacional Society of Rock Mechanics, (1971).

[21] Jing L., *Formulation of Discontinuous Deformation Analysis (DDA) - An Implicit Discrete Element Model for Block Systems*. Eng. Geology Vol 49, (1998). pp. 371-381, Sweden.

[22] Min, K., *Stress - Dependent Permeability of Fractured Rock Masses: A Numerical Study*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41, (2004 b), pp. 1191-1210.

[23] Min, K.B., Jing, L., *Stress - Dependent Mechanical Properties and Bounds of Poisson's Ratio for Fractured Rock Masses Investigated by a DFN-DEM Technique*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41(3), (2004), pp. 431-432.

[24] Potyondy, D.O., Cundall, P. A., *A Bonded - Particle Model for Rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41, (2004), pp. 1329-1364.

[25] Cundall, P.A., *BALL - A Program to Model Granular Media using the Distinct Element Method*. Technical Note, (1978). Advanced Technology Group, Dames & Moore, London.

[26] Holt, R.M., Kjlaas, J., *Comparison between Controlled Laboratory Experiments and Discrete Particle Simulations of the Mechanical behaviour of Rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42, (2005), pp. 985-995, Elsevier Ltd, Trondheim, Norway.

[27] Resende, R., Lamas L.N., *Micromechanical Modelling of Stress Waves in Rock and Rock Fractures.* Rock Mechanics and Rock Engineering 43, (2010), pp. 741-761.

[28] Jing, L., Hudson J. A., *Numerical Methods in Rock Mechanics*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39(4), (2002), pp. 409-427.

[29] Cundall, P. A., Strack, O. L., *A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies.* Geotechnique 29(1), (1979), pp. 45-65.

[30] Itasca, *Particle Flow Code in 2 Dimensions*, Versão 3.1. Manual de Utilização, (2006). Itasca Consulting Group, Mineapolis, USA.

[31] Hazzard, J. F., Young, R. P, *Numerical Investigation of Induced Cracking and Seismic Velocity changes in Brittle Rock*. Geophysical Research Letters 31, (2004), University of Toronto, Canada.

[32] Sena, M., Silveira, S., *Uma Implementação do Método dos Elementos Discretos em um Ambiente de Ccomputação Paralela*. (2007). CMNE/CILAMCE, Porto.

[33] Martin, C. D., *The Strength of Massive Lac du Bonnet Granite around Underground Openings*. Canadian Geotechnical Journal, (1993), pp. 698-725, Canada.

[34] Yoon, J., *Application of Experimental Design and Optimization to PFC Model Calibration in Uniaxial Compression Simulation*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44(6), (2007), pp. 871-889, Potsdam, Germany.

[35] Fakhimi, A., Villegas, T., *Application of Dimensional Analysis in Calibration of a Discrete Element Model for Rock Deformation and Fracture*. Rock Mechanics and Rock Engineering 40(2), (2007), pp. 193-211, Vienna, Austria.

[36] Hoover, W.G., Ashurst W.T., *Two - Dimensional Computer Studies of Crystal Stability and Fluid Viscosity*. The Journal of Chemical Physics 60(10), (1974), pp. 4043-4047.

[37] Tai, Q., *A Discrete Element Study of the Relationship of Fabric to Wave Propagational Behaviours in Granular Materials*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 21(5), (1997), pp. 295-311.

[38] Neves, C., *Comportamento dos Materiais Granulares usando o Método dos Elementos Discretos*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, (2009).

[39] Belytschko, T., *An Overview of Semidiscretization and Time Integration Procedures, in Computational Methods for Transient Analysis*, North-Holland, Amsterdam, Netherlands, (1983).

ANEXOS

ANEXO A

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM PLANE STRESS (MEAS BASED)

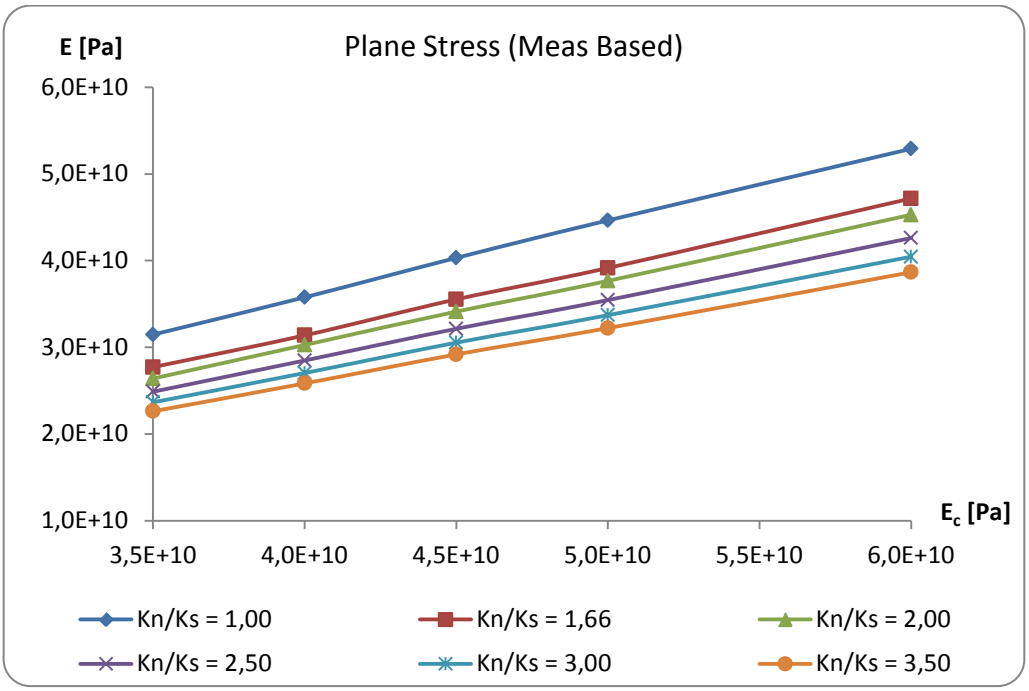


Fig. A.1 – Variação do módulo de deformabilidade (*E*) com o módulo de contacto das partículas (E_c), para os vários valores de K_n/K_s usados em *Plane Stress* (*Meas Based*).

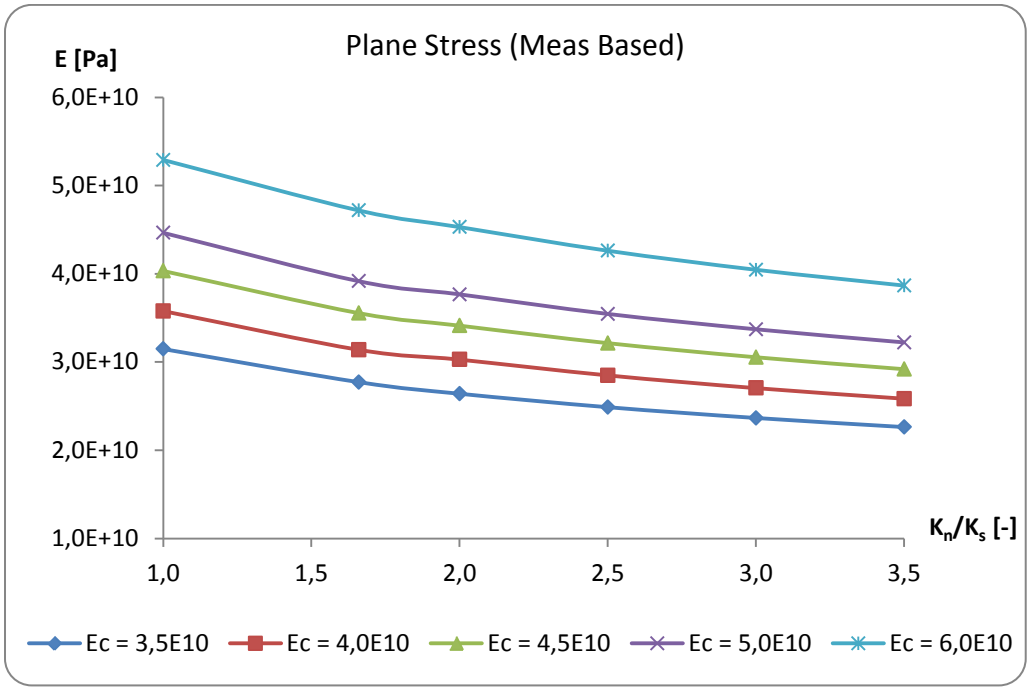


Fig. A.2 – Variação do módulo de deformabilidade (*E*) com a razão da rigidez normal e de corte das partículas (K_n/K_s), para os vários valores de E_c usados em *Plane Stress* (*Meas Based*).

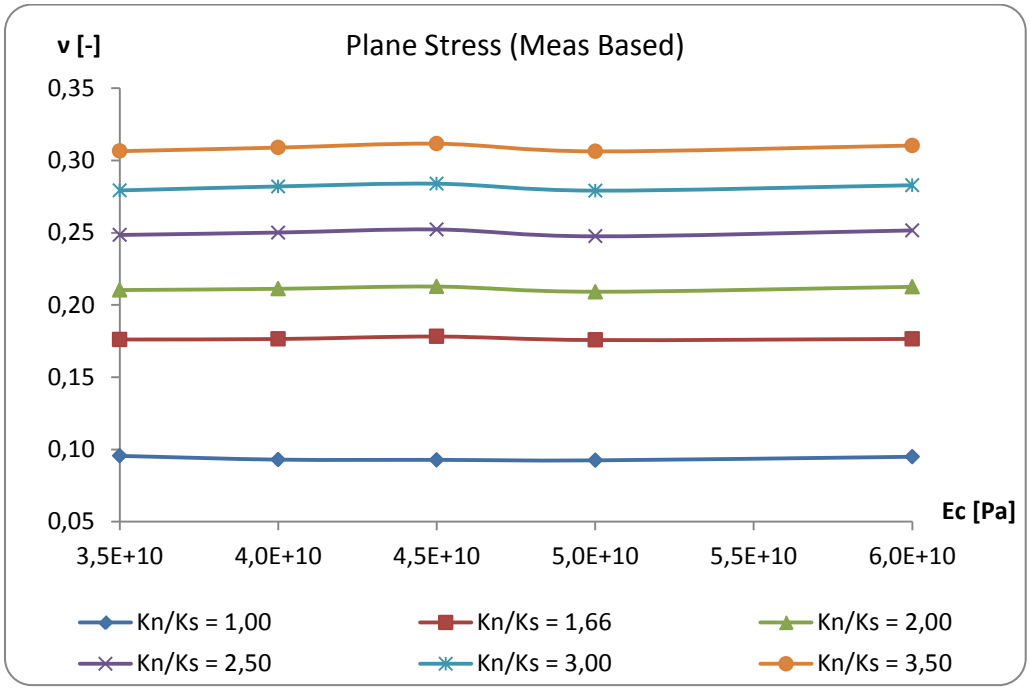


Fig. A.3 – Variação do coeficiente de Poisson (*v*) com o módulo de contacto das partículas (E_c), para os vários valores de K_n/K_s usados em *Plane Stress* (*Meas Based*).

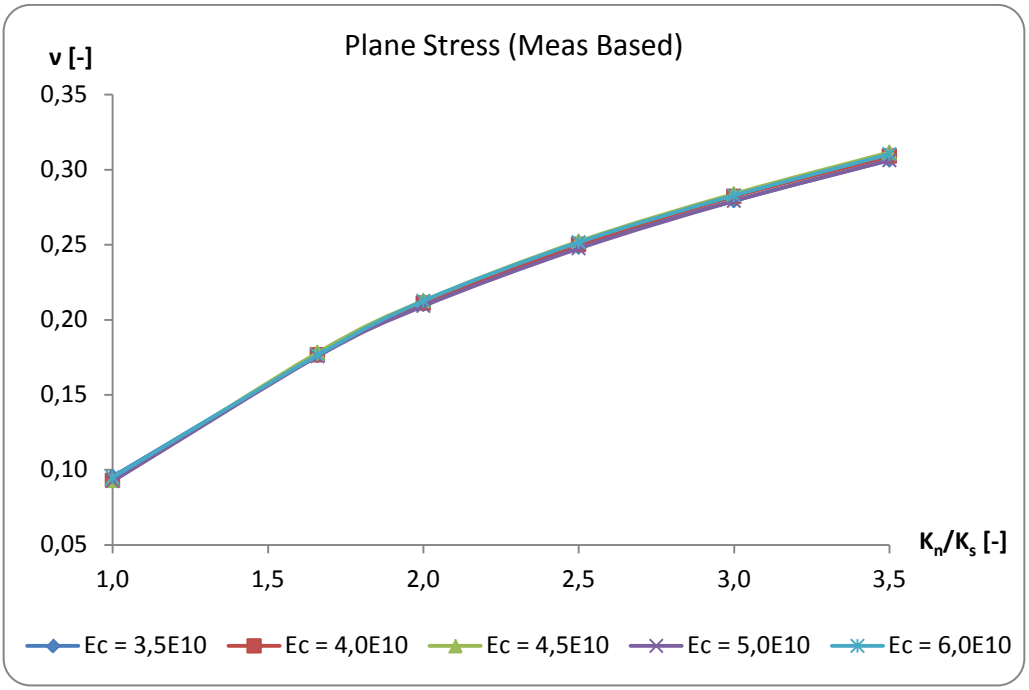


Fig. A.4 – Variação do coeficiente de Poisson (ν) com a razão da rigidez das partículas (K_n/K_s), para os vários valores de E_c usados, em *Plane Stress* (*Meas Based*).

ANEXO B

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM PLANE STRAIN (WALL BASED)

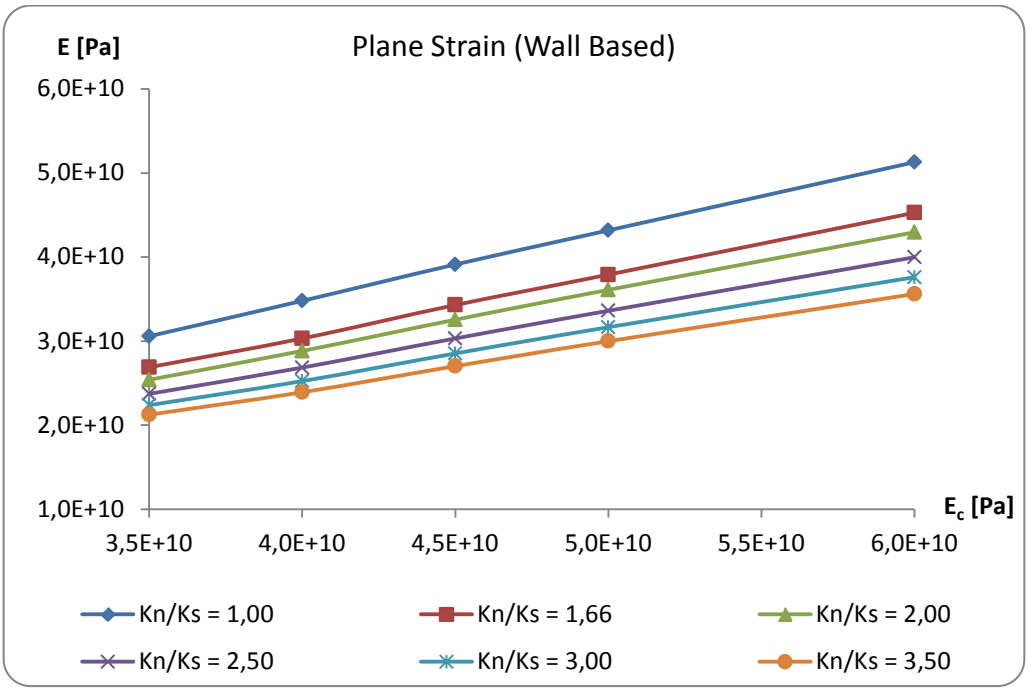


Fig. B.1 – Variação do módulo de deformabilidade (*E*) com o módulo de contacto das partículas (E_c), para os vários valores de K_n/K_s usados em *Plane Strain* (*Wall Based*).

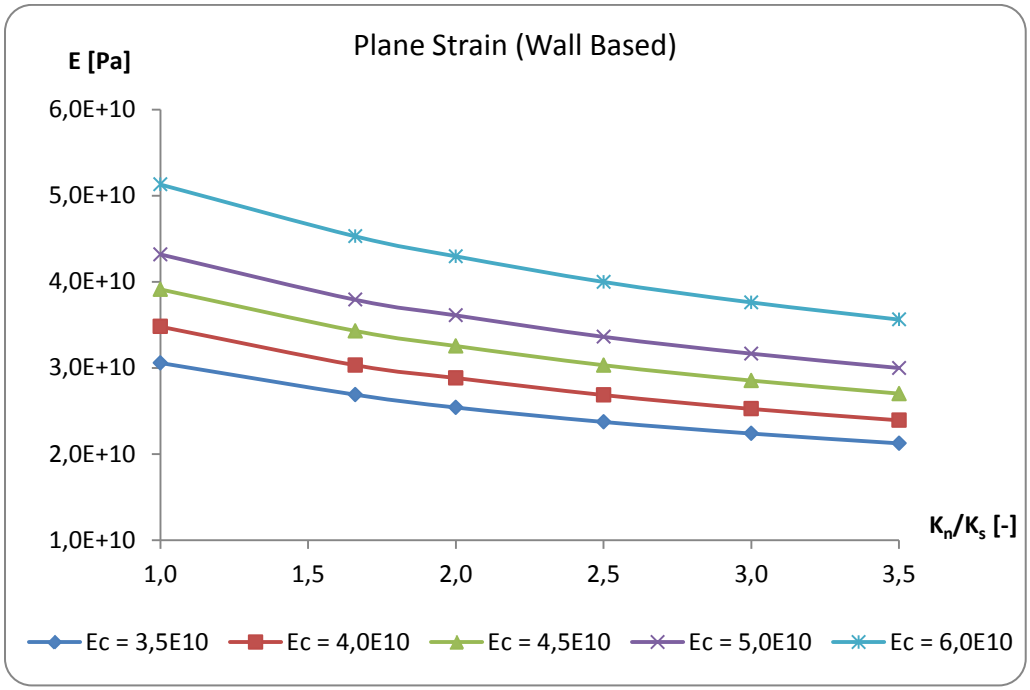


Fig. B.2 – Variação do módulo de deformabilidade (*E*) com a razão da rigidez das partículas (K_n/K_s), para os vários valores de E_c usados em *Plane Strain* (*Wall Based*).

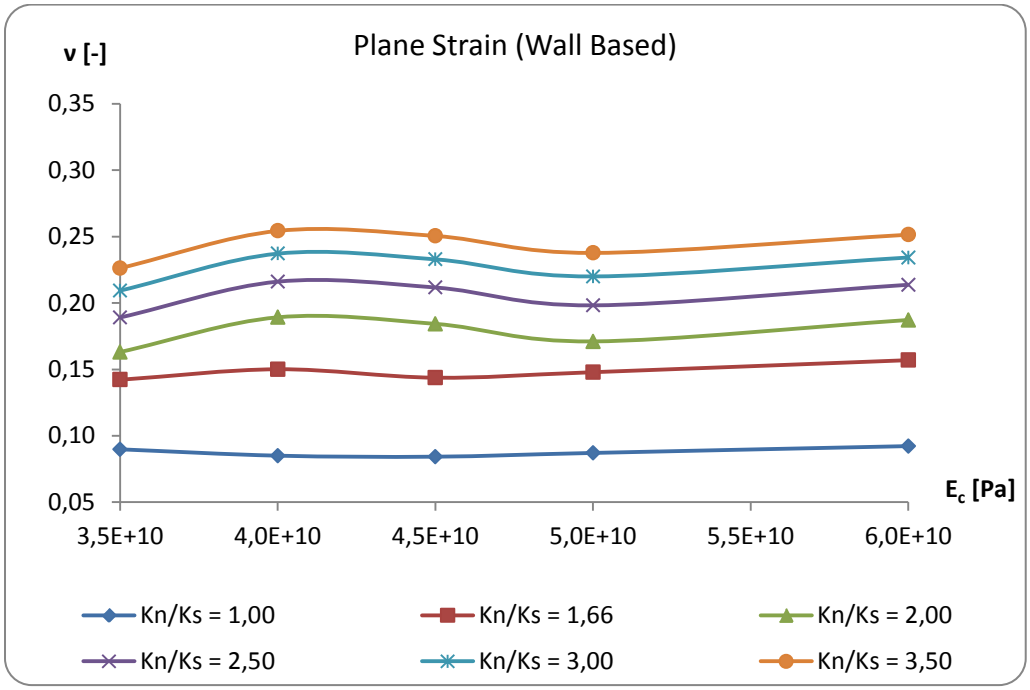


Fig. B.3 – Variação do coeficiente de Poisson (*v*) com o módulo de contacto das partículas (E_c), para os vários valores de K_n/K_s usados em *Plane Strain* (*Wall Based*).

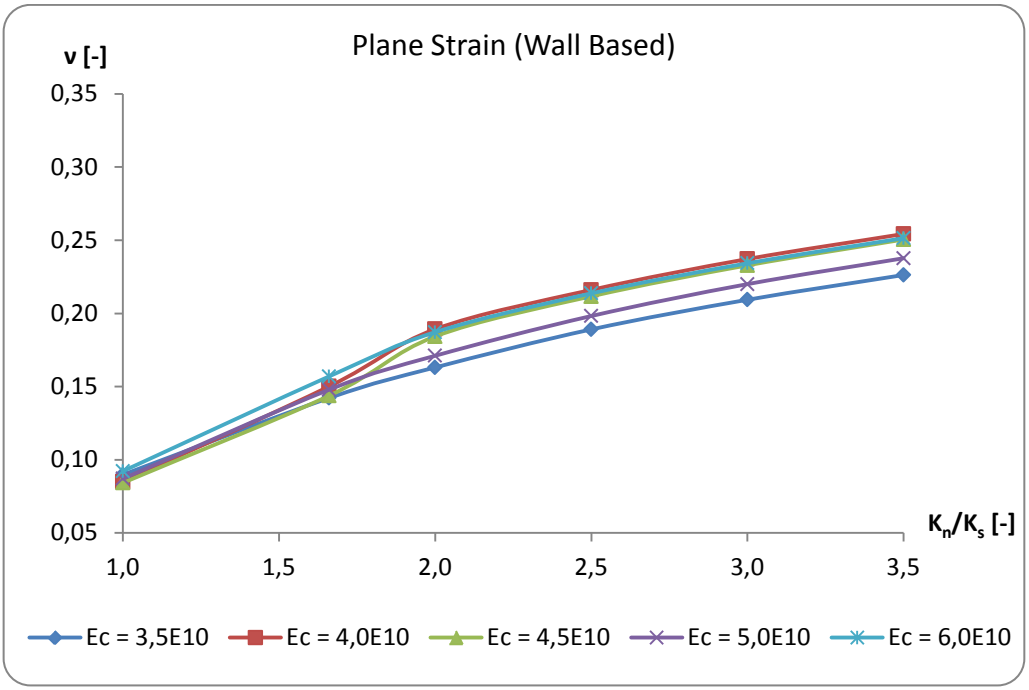


Fig. B.4 – Variação do coeficiente de Poisson (ν) com a razão da rigidez das partículas (K_n/K_s), para os vários valores de E_c usados, em *Plane Strain* (*Wall Based*).

ANEXO C

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM PLANE STRAIN (MEAS BASED)

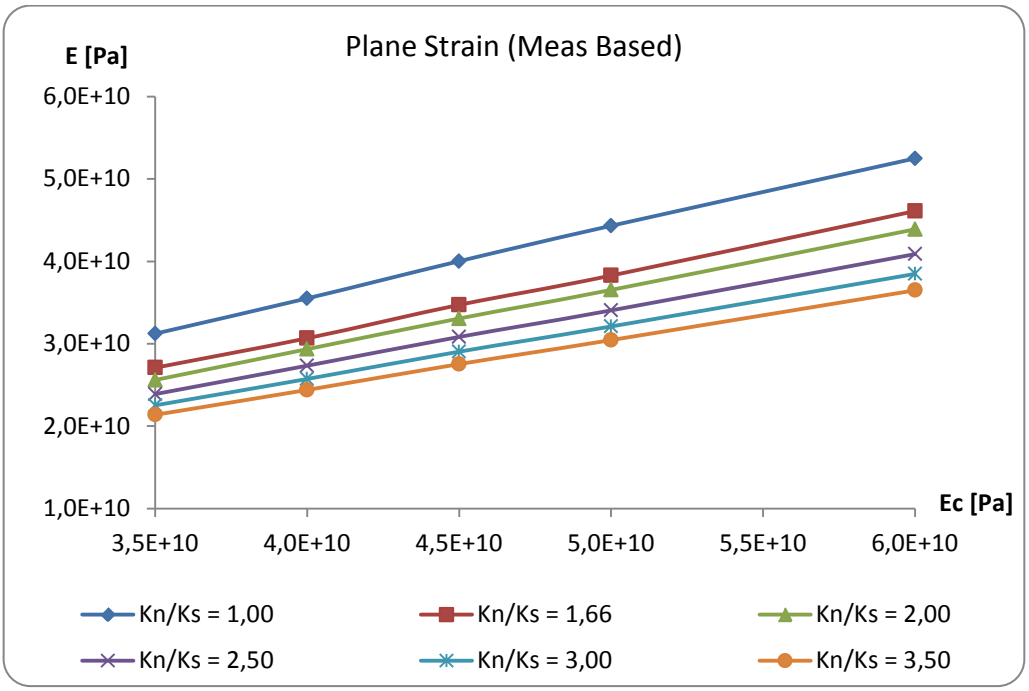


Fig. C.1 – Variação do módulo de deformabilidade (E) com o módulo de contacto das partículas (E_c), para os vários valores de K_n/K_s usados em *Plane Strain* (*Meas Based*).

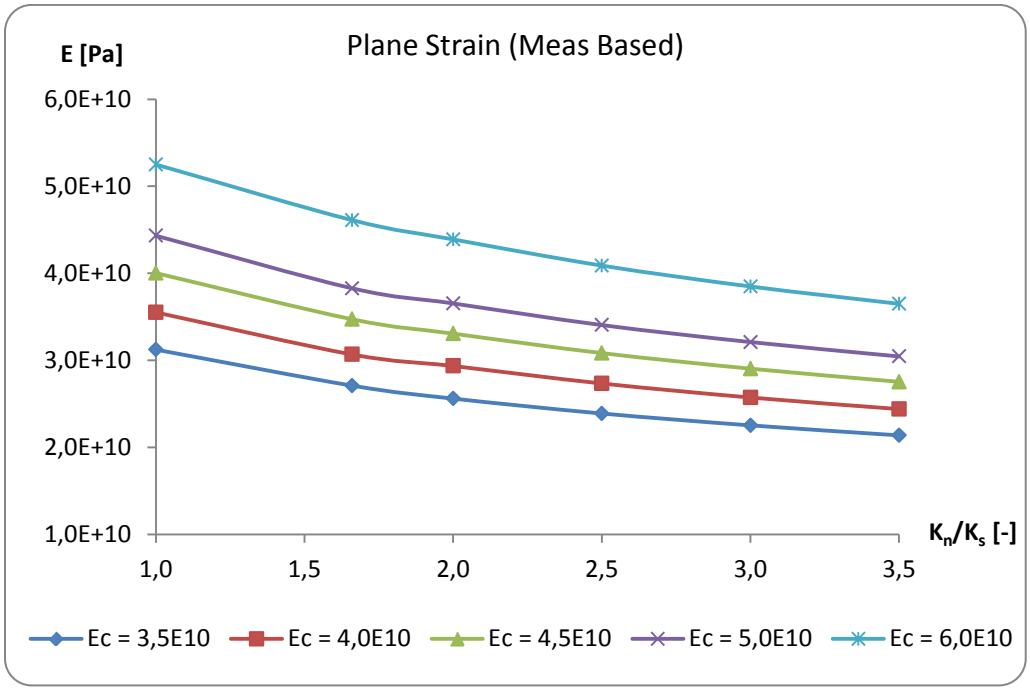


Fig. C.2 – Variação do módulo de deformabilidade (*E*) com a razão da rigidez das partículas (K_n/K_s), para os vários valores de E_c usados em *Plane Strain* (*Meas Based*).

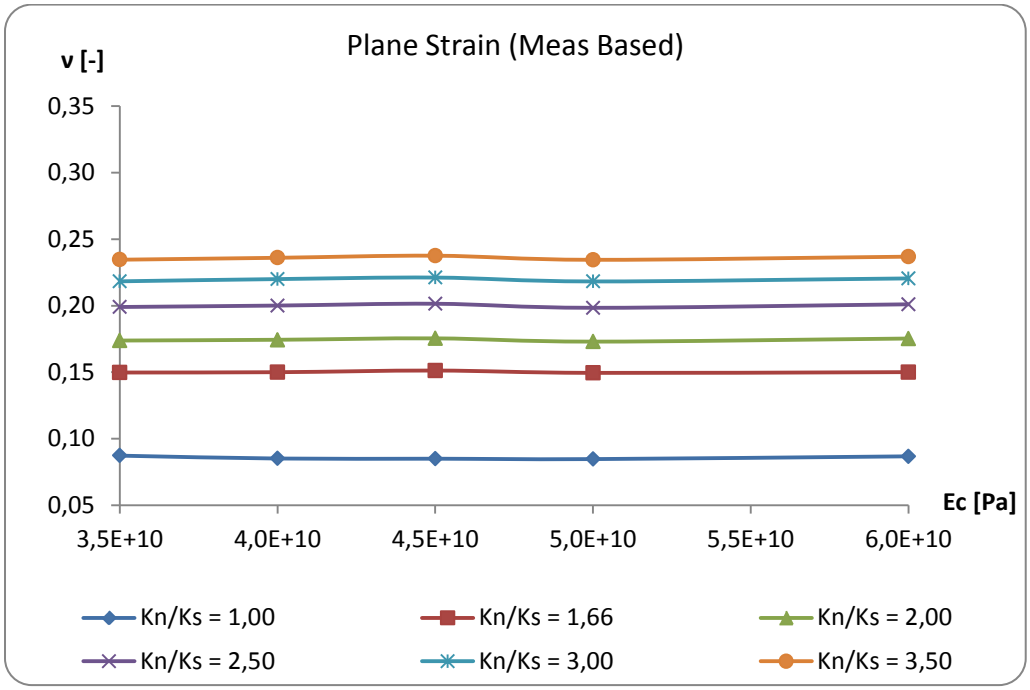


Fig. C.3 – Variação do coeficiente de Poisson (*ν*) com o módulo de contacto das partículas (E_c), para os vários valores de K_n/K_s usados em *Plane Strain* (*Meas Based*).

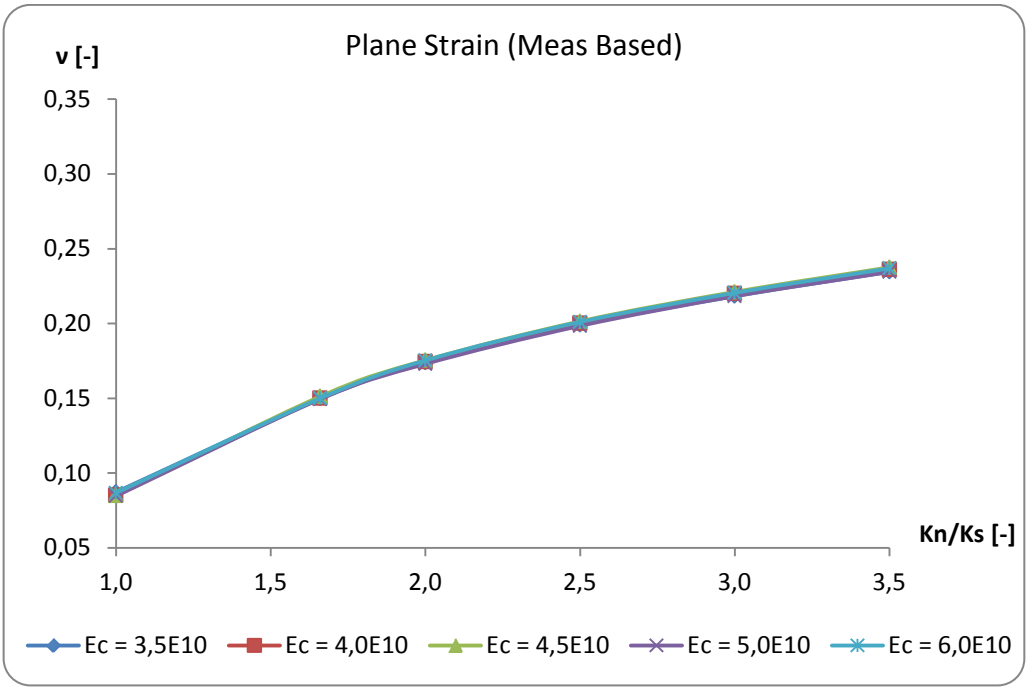


Fig. C.4 – Variação do coeficiente de Poisson (v) com a razão da rigidez das partículas (K_n/K_s), para os vários valores de E_c usados, em *Plane Strain* (*Meas Based*).