

## 4 Modelagem de ensaios triaxiais

### 4.1. Introdução

Na análise do comportamento biaxial foram desenvolvidos ensaios numéricos à compressão. Um arranjo de partículas foi gerado isotropicamente aplicando tensões de confinamento. O confinamento lateral é mantido constante quando a tensão vertical continua sendo aplicada aumentando a uma taxa constante. Um servo-mecanismo é invocado para controlar a tensão confinante, sendo esta monitorada através dos muros laterais e ajustando a velocidade dos muros de carregamento. A figura 4.1 mostra a envoltória de falha para o ensaio à compressão no plano  $\sigma_1 - \sigma_3$ . Esta envoltória de falha é definida por uma regressão linear. O ângulo de atrito interno é determinado baseado no critério de Mohr-Coulomb. Os parâmetros de resistência e elasticidade são obtidos usando as curvas tensão – deformação dos resultados da simulação e comparados finalmente com os valores obtidos para os mesmos parâmetros num ensaio real de laboratório à compressão.

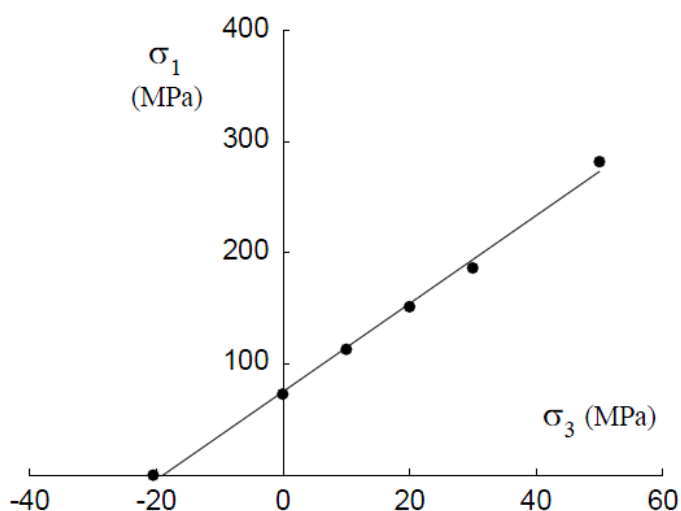


Figura 4.1: Envoltória de ruptura biaxial no plano  $\sigma_1 - \sigma_3$ , (Huang, 1999)

## 4.2. Preparação da Amostra

A chave para o sucesso na simulação é preparar um bom arranjo de partículas. Um algoritmo usado para criar um arranjo de partículas foi gerado por Potyondy *et al.* (1996). Neste estudo, um arranjo irregular de partículas é gerado usando um algoritmo baseado na expansão dos raios. As partículas são criadas aleatoriamente com um raio pequeno e depois expandidas para obter a porosidade  $n$  requerida. O número  $N$  de partículas é dado pela geometria, a porosidade e a distribuição das partículas. A geometria do arranjo de partículas é definida por paredes geradas no PFC2D. As paredes podem ter atrito no contato com as partículas. O movimento dos muros é controlado somente por velocidades. Um estado relativo de equilíbrio das partículas é alcançado depois de certa quantidade de iterações e movimentos entre as partículas com o aplicando um confinamento através de paredes de contorno. Para obter um bom arranjo de partículas são eliminados os chamados “floaters” ou flutuantes que são partículas com poucos contatos. Devido à aleatoriedade da preparação das partículas, as forças de contato entre as partículas são inevitavelmente geradas. Pode-se obter uma média da reação das forças nos muros para determinar o estado de tensões no arranjo de partículas. No estado de equilíbrio relativo, o estado de tensões é isotrópico pelo qual os muros conferem ao arranjo de partículas uma tensão normal mais ou menos similar. A tensão média  $\sigma_0$ , que é uma média da tensão normal atuante em todas as paredes, é uma função das rigidezes do contato e a porosidade dando uma distribuição nos tamanhos das partículas. A Figura 4.2 mostra o comportamento da tensão média  $\sigma_0$  para um arranjo de partículas com porosidade  $n = 1$  (Huang, 1999).

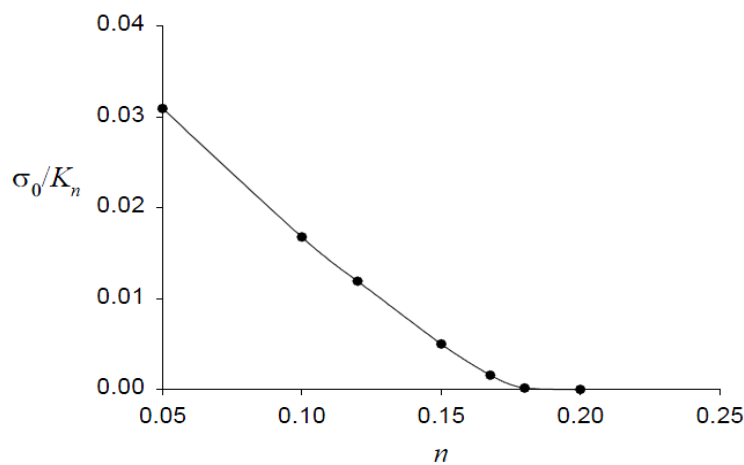


Figura 4.2: Comportamento da tensão normal  $\sigma_0$  para uma porosidade qualquer num arranjo de partículas com  $K_n/K_s = 1$ , (Huang, 1999)

Onde  $K_n$  e  $K_s$  são as rigidezes normal e cisalhante dos contatos entre partículas.

A amostra é criada com uma distribuição uniforme das partículas. A figura 4.2 mostra a porosidade necessária para gerar um bom arranjo de partículas e assim conseguir um arranjo com poucas partículas flutuantes de pequena tensão inicial. Se a amostra permite uma livre deformação (eliminando as paredes de confinamento) depois de atingir o estado de equilíbrio, as forças compressivas de contato nas partículas poderiam diminuir conforme a porosidade aumenta. Se for dada uma resistência aos contatos permitindo o desenvolvimento de uma tensão neles, um sistema de forças em cadeia poderia formar-se dentro do arranjo de partículas. A resposta global destas forças medidas para cada segmento da parede atinge um valor igual a zero, desde que a tensão e compressão local na cadeia de forças se cancelem umas com outras. Se a simulação inicia com um valor elevado de tensão média, os resultados não poderiam ser interpretados como pertencentes a um arranjo inicial em estado livre.

Em resumo, o propósito de gerar um bom arranjo de partículas é preparar uma amostra com um valor de porosidade similar aos 15%. Depois de excluir as partículas flutuantes é iniciado um procedimento para reduzir levemente o raio das partículas de forma uniforme, no entanto é conservado o contato entre as partículas para manter o estado inicial de tensões perto de zero.

### **4.3. Carregamento quase-estático**

O experimento numérico é desenvolvido mantendo um controle cinemático. Para simular um carregamento quase-estático é necessário entender a aplicação de uma pequena velocidade de deformação. Primeiro vamos considerar um problema particular como é o caso do ensaio uniaxial. Somente quando o carregamento atinge um nível considerável, os contatos entre as partículas começam a romper. A magnitude da velocidade do carregamento para este tipo de problemas pode ser considerado desde o ponto de vista de “damping” ou amortecimento.

Já que o procedimento para adicionar o amortecimento está sempre invocado a fim de obter uma solução estática, o processo dinâmico pode ser considerado como quase-estático quando o desbalance das forças atuando nas

partículas seja muito pequeno em comparação com as forças nos contatos. O argumento que compara o desbalance de forças com as forças nos contatos pode também ser expresso em termos de tensões para o ensaio uniaxial. A figura 4.3 mostra uma solução numérica típica de curva tensão – deformação para o ensaio uniaxial, quando a solução numérica oscila perto da solução estática. A amplitude das oscilações varia com o tempo. Eventualmente a solução numérica atinge a solução estática. A amplitude das oscilações também é um indicativo do aumento ou diminuição das tensões (desbalance de forças). Neste caso, o máximo valor da tensão desviadora é mantido para ser menor que a tensão de referência, então a exatidão da solução numérica desde um processo dinâmico poderia estar garantida. Pode ser expresso isto como,

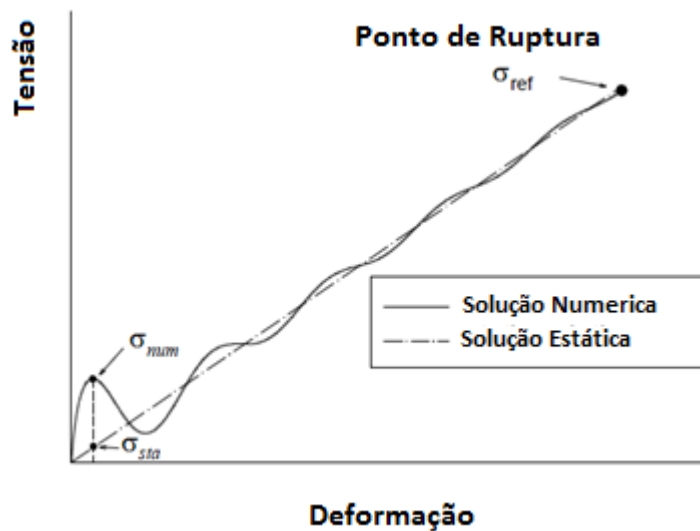


Figura 4.3: Curva esquemática para o ensaio uniaxial. (Huang, 1999)

$$|\sigma_{num} - \sigma_{sat}| \ll \sigma_{ref} \quad (4.1)$$

Onde  $\sigma_{num}$  define a tensão axial quando a máxima amplitude da oscilação é atingida;  $\sigma_{sat}$  é a solução estática correspondente. Se o efeito do amortecimento é desprezado inicialmente, pode-se aproximar  $|\sigma_{num} - \sigma_{sat}|$  por  $\sigma_{num}$ . Para um arranjo de partículas com suficientes graus de liberdade,  $\sigma_{num}$  pode ser assumido como:

$$\sigma_{num} = f \left( \frac{K_s}{K_n} \right) V \sqrt{K_n \rho} \quad (4.2)$$

Onde  $V$  é a velocidade de carregamento e  $\rho$  é a densidade do meio. Poderia se dizer que o efeito da relação de rigidezes  $K_s/K_n$  é observado não só na rigidez global (inclinação da curva tensão – deformação), mas também no passo de tempo  $T$  ou “Step” dado por default (constante durante a simulação) observado na rigidez local. Dada uma rigidez global, a variação da rigidez local também afetará a máxima tensão desviadora  $|\sigma_{num} - \sigma_{sat}|$ . Isto pode ser observado, no entanto, que o efeito da rigidez local na relação  $\sigma_{num}/V\sqrt{K_n\rho}$  é desprezível.

Então se pode expressar a velocidade de carregamento quase-estático para qualquer caso como:

$$V = k \frac{\sigma_{ref}}{\sqrt{K_n\rho}} \quad (4.3)$$

Onde  $k$  é um número pequeno,  $k \ll 1$ . A tensão de referência  $\sigma_{ref}$  pode ser expressa em termos de resistência à tração ou compressão. Para qualquer caso de corte em rocha, o efeito do amortecimento também pode ser aplicado. No entanto, agora a tensão de referência poderia ser escolhida de acordo com as características do problema.

#### 4.4. Efeito da discretização.

Durante a preparação da amostra, a relação  $L/R$  pode ser considerada como uma medida do grau de discretização, onde  $L$  é o comprimento do meio discreto e  $R$  é o raio médio das partículas. Somente quando a relação  $L/R$  é suficientemente grande, o efeito da discretização da resistência a nível macro pode ser ignorada. Huang (1999) criou dez arranjos de partículas para  $L/R = 70$ , 80 e 90 com o mesmo raio médio  $R = 1,25 \text{ mm}$  e a mesma distribuição  $R_{max}/R_{min} = 0,20$  para  $L/R = 60$ . A figura 4.4 mostra os resultados dos ensaios à compressão e à tração para as configurações anteriores junto com um teste estatístico com 30 amostras de  $L/R = 60$  para obter a seção inicial. As barras de erro indicam que  $10th/90th$  estão na distribuição da resistência. Os gráficos mostrados na figura indicam que para determinar a resistência uniaxial média, o efeito da discretização pode ser ignorado.

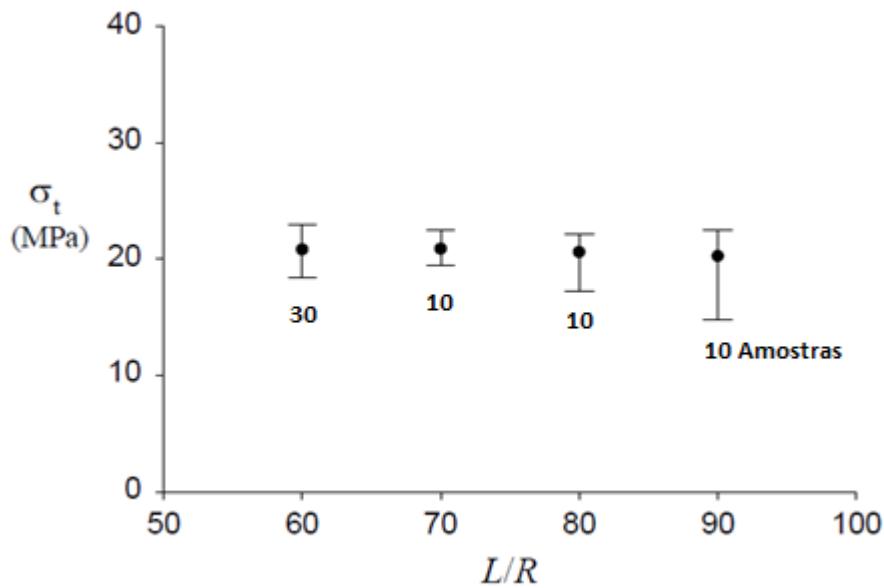


Figura 4.4: Variação da resistência à compressão uniaxial  $\sigma_c$  com a relação  $L/R$ . (Huang, 1999)

#### 4.5. Ensaio Numéricos à Compressão.

Ensaio numéricos à compressão são usados para estudar o comportamento do espécime de rocha.

##### 4.5.1. Gênesis do material

O processo para a gênese do material é resumido nos seguintes quatro passos, ilustrados na figura 4.5.

Criar um Arranjo compactado inicial: o material é gerado por meio de partículas. Os muros confinantes são gerados sem atrito e suas rigidezes normais são um conjunto igual a  $\beta$  vezes a média da rigidez normal da partícula. Para assegurar um arranjo razoavelmente compactado, o número de partículas é determinado tal que a porosidade do espécime seja de 8%. Para garantir que as partículas sejam geradas com sucesso, elas são geradas aleatoriamente tal que não exista superposição entre partículas. A seguir, os raios das partículas são aumentados até seu valor final e o sistema é liberado para atingir o equilíbrio estático com atrito zero. Este procedimento de substituição foi desenvolvido

num sistema compacto para que a porosidade seja mantida constante e o novo sistema possa também atingir o equilíbrio estático.

Isto é de vital importância para que a distribuição das forças ao longo da montagem seja uniforme (que todas as partículas estejam conectadas uma com outra) antes de iniciar o passo seguinte da gênese do material. O número de passos desenvolvidos é determinado baseado no tamanho do modelo, sendo que, para modelos maiores serão necessários passos adicionais.

Instalando tensões isotrópicas específicas: os raios das partículas são trocados uniformemente até conseguir uma tensão isotrópica específica,  $\sigma_0^t$ , definida como a média das três componentes de tensão. A tensão isotrópica específica é tipicamente um conjunto de baixos valores relativos à resistência do material (e.g., a tensão isotrópica específica é um valor menor que 1% do valor da resistência à compressão simples, UCS). Este procedimento é seguido para diminuir a magnitude das chamadas tensões aprisionadas que vão se desenvolver após a subsequente instalação das ligações nos contatos e após os passos de descarregamento do espécime, desde que a magnitude das forças aprisionadas (tanto de compressão como de tração) vão se comparar ao valor da força a compressão no tempo da instalação das ligações dos contatos. A atual tensão isotrópica no arranjo finalmente é instalada.

Diminuindo o número de partículas flutuantes: um arranjo de partículas não uniformes, gerado aleatoriamente e compactado mecanicamente, pode conter um grande número de partículas flutuantes, as quais são partículas com menos de três contatos. Para gerar um bom arranjo de partículas precisa-se de diminuir o número de partículas flutuantes de tal forma que seja gerada uma rede mais densa de contatos para obter subsequentemente instalar o modelo de ligação. Durante qualquer tempo da simulação é possível determinar o número de partículas flutuantes existentes no arranjo.

Espécime final: o modelo de ligação paralela é instalado no arranjo de partículas após a exclusão das partículas flutuantes do sistema. A ligação é instalada nos contatos das partículas. Para todas as partículas é atribuído um valor específico para seu coeficiente de atrito. No final deste passo, o material está pronto para ser testado.

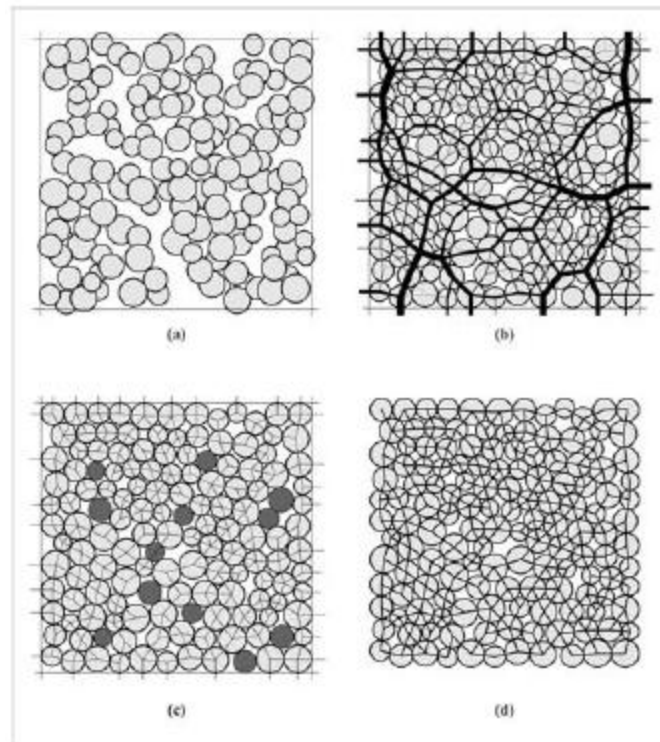


Figura 4.5: Procedimento da gênese do material. (a) arranjo de partículas inicialmente gerado; (b) forças de contato distribuídas depois do segundo passo; (c) partículas flutuantes e contatos depois do passo 2; (d) rede de ligação paralela depois do passo 4.

#### 4.5.2. Procedimento para o refinamento do tamanho da partícula

Este procedimento é explicado substituindo uma partícula (com raio  $R_0$  e uma localização  $x$ ) por duas pequenas partículas (com raios  $R_1$  e  $R_2$ ) que apresentem um volume total igual ao volume da partícula dada. As partículas são localizadas de tal forma que somente estejam conectadas, mas sem apresentar sobreposição, e orientadas aleatoriamente e posicionadas de forma tal que seus pontos de contato coincidam com o centroide da partícula original.

A condição dada para que o volume das novas partículas seja igual ao volume da partícula inicial é expressa como:

$$R_1^\lambda + R_2^\lambda = R_0^\lambda, \quad \lambda = \begin{cases} 2, & 2D \\ 3, & 3D \end{cases} \quad (4.4)$$



É desejado que a relação do raio final ( $R_2/R_1, R_2 \geq R_1$ ) após um passo de refinamento  $l$  não seja maior do que  $\beta$  e maior que a relação tamanho da partícula ( $R_{max}/R_{min}$ ) do material base. Isto é conseguido através de:

$$1 \leq \frac{R_2}{R_1} \leq \beta^{(1/l)} \quad (4.5)$$

Durante cada passo. O valor de  $R_1$  que satisfaz as duas expressões anteriores é:

$$(1 + \beta^{(\lambda/l)})^{-1/\lambda} \leq \frac{R_1}{R_0} \leq 2^{-1/\lambda} \quad (4.6)$$

Durante cada passo, o novo raio da partícula é selecionado como:

$$R_1 = s_1 + \alpha (s_2 - s_1), \quad \alpha \in [0,1] \quad (4.7)$$

$$R_2 = (R_0^\lambda - R_1^\lambda)^{1/\lambda} \quad (4.8)$$

Com:

$$s_1 = R_0 (1 + \beta^{(\lambda/l)})^{-1/\lambda} \quad (4.9)$$

$$s_2 = R_0 2^{-1/\lambda} \quad (4.10)$$

Onde  $\alpha$  é o parâmetro de refinamento que deve estar na faixa entre zero e um. Se  $\alpha = 1$ , então  $R_1 = R_2$  e a relação do tamanho das partículas do novo material será igual ao tamanho das partículas do material base. No entanto, se  $\alpha \neq 1$ , então  $R_1 \neq R_2$  e a relação do tamanho das partículas no novo material vai ser maior do tamanho das partículas do material base. Assim, com este algoritmo, é excluído o arranjo cristalino e é gerado o refinamento das partículas.

### 4.5.3. Definindo a densidade das partículas.

A densidade das partículas ( $\rho_b$ ) pode ser dada (1) especificada diretamente ou (2) especificada pela densidade bulk ( $\rho$ ) para uma região de

volume ( $V$ ). Para a opção (2), a densidade das partículas numa região (após de ajustar o tamanho das partículas) é determinada por:

$$\rho_b = \rho \left( \frac{V}{\sum_{n_p} V^{(p)}} \right) \quad (4.11)$$

Onde  $V^{(p)}$  é o volume da partícula ( $p$ ) para uma região onde existem  $n_p$  partículas.

#### 4.5.4. Ensaio à compressão

Dois esquemas de deformação são avaliados para desenvolver o ensaio à compressão. Os ensaios à compressão são tipicamente desenvolvidos usando o esquema “platen” ou de paredes, que carrega o espécime usando as paredes superior e inferior e as paredes laterais são usadas para confinar a amostra. A deformação axial é aplicada movimentando as paredes superiores e inferiores ao mesmo tempo com uma velocidade que corresponde à taxa de deformação. O esquema de “internal-based” ou de deformação controlada, aplica uma deformação axial num conjunto de estágios. Cada estágio consiste dos seguintes dois passos: (1) um incremento de deformação axial ( $\Delta\varepsilon_a$ ) é aplicado ao sistema definindo uma velocidade axial ( $v_2$ ) para todas as partículas e os muros topo e base com uma velocidade igual a:

$$v_2 = \left( \frac{\Delta\varepsilon_a}{N_s \Delta t^0} \right) x_2 \quad (4.12)$$

Para  $N_s$  iterações, com  $\Delta t^0$  sendo o intervalo do tempo da iteração no início do estágio, e  $x_2$  sendo a  $y$ -posição da partícula ou muro; (2) as paredes topo e base são detidas, a velocidade axial de todas as partículas é definida como zero, os graus de liberdade da velocidade axial são liberados e o sistema é cíclico até atingir o estado de equilíbrio. Durante o processo, o servo controle nas paredes laterais permanece ativo.

#### **4.5.5. Esquemas de medição de tensão e deformação**

A capacidade de medir corretamente as deformações nas paredes é definida no código Fish por default no PFC2D. A correta deformação das paredes retira a sobreposição efetiva desde as medições de comprimento, onde a sobreposição efetiva é igual à relação da força normal total atuando no muro entre a rigidez total de todos os contatos da parede. A sobreposição efetiva é a sobreposição que poderia estar presente se o muro está em contato com uma única superfície e não é igual à média da sobreposição.

Tensões e deformações são medidas usando duas técnicas: (1) o valor médio das três medições circulares; e (2) medindo as forças nas paredes do espécime. As dimensões do espécime são medidas tanto por paredes como por as chamadas “gauge balls” ou partículas de medição. As partículas de medição imitam o deslocamento variável linear dos transdutores (LVDTs) tocando a superfície do espécime. No entanto, a formação do dano na superfície pode afetar a medição usando este método. Assim, as medições usando paredes oferecem uma maior informação média sobre a totalidade do espécime e aproxima aos valores oferecidos pelas partículas de medição. As dimensões do espécime são utilizadas para determinar as tensões e deformações.

As propriedades medidas durante o ensaio à compressão incluem as constantes elásticas (modulo de Young e Coeficiente de Poisson do material isotrópico) e as resistências pico. Estes resultados são extraídos dos três esquemas de medição seguintes: (1) base muro; (2) base espécime; e (3) base medida (usando medições circulares).

#### **4.5.6. Taxa de Carregamento**

As respostas oferecidas por um material DEM e um material real são sensíveis à taxa de carregamento. Na maioria dos casos, escolhe-se uma taxa de carregamento que seja o suficientemente pequena para garantir a solução quase estática. A resposta quase estática é a resposta obtida quando um ensaio é desenvolvido nas condições quasi-estáticas, o que significa que o carregamento tem sido o suficientemente lento para que as partículas se adaptem à redistribuição das forças não lineares que acompanham cada caso.

Esta resposta pode ser obtida desenvolvendo o ensaio sob deformação controlada, donde as velocidades dos muros são definidas como zero após cada evento não linear até atingir um novo estado de equilíbrio. Desta forma, pode-se traçar uma curva tensão-deformação completa. O valor máximo poderia corresponder à resposta quasi-estática. Pode-se garantir que tal resposta tem sido obtida fazendo o ensaio de forma tal que seja controlada a taxa de deformação para uma série de ensaios diferentes com velocidades de deformação diferentes para cada ensaio e mantendo constante tal velocidade durante a execução do ensaio e mostrando que a resposta é a mesma para todas as velocidades abaixo do valor de velocidade crítico.

Quando o modelo DEM é calibrado, pode-se comparar a resposta quasi-estática com a resposta quasi-estática obtida de um ensaio real. Isto permite comparar os resultados do modelo DEM e do modelo real. Se os efeitos dinâmicos estão afetando a resposta do sistema real, então estes efeitos também devem ser incluídos no modelo DEM, o que envolve uma maior complexidade ao processo de calibração, para igualar aos mecanismos de dissipação que ocorrem no material real. Se forem comparadas somente respostas quasi-estáticas, então os mecanismos de dissipação não devem ser incluídos no modelo DEM.

Usualmente os ensaios de compressão são desenvolvidos no regime quasi-estático, onde as velocidades são suficientemente pequenas para que os parâmetros de inércia não afetem os resultados. Assim, a taxa de deformação tem que ser definida com um valor o mais baixo possível. No entanto, para obter uma resposta com um tempo computacional razoável usando o PFC2D é necessário sacrificar este valor de usando uma maior taxa de deformação. Uma forma de identificar se o regime da simulação é quasi-estático é realizar diferentes ensaios como foi dito anteriormente, com diferentes valores de taxa de deformação e descobrir o valor crítico no qual os resultados são idênticos. Quando se aumenta a taxa de deformação, as curvas resposta tensão-deformação apresentam oscilações e efeitos dinâmicos que afetam o comportamento do ensaio.

#### **4.5.7.**

#### **Descrição do ensaio à compressão**

Os ensaios a compressão são desenvolvidos numa célula poliaxial. Os muros superiores e inferiores atuam como paredes de carregamento e as

velocidades dos muros laterais são controladas por um servo-mecanismo para manter a tensão confinante constante. Os muros laterais são totalmente retirados quando é desenvolvido o ensaio à compressão simples. Todas as paredes são geradas sem atrito e as rigidezes normais das paredes de carregamento “platens” e as paredes laterais de confinamento são definidas iguais a  $\beta_p$  e  $\beta_c$  respectivamente, vezes a média das rigidezes normais das partículas do material.

1. O ensaio à compressão começa com uma fase de confinamento. As tensões axiais e confinantes ( $\sigma_a^t, P_c^t$ ) são aplicadas ativando o servomecanismo para todos os muros opostos e baixo um controle cíclico até que as tensões sejam aplicadas satisfatoriamente. O servomecanismo é controlado por uma servo-tolerância nos muros ( $\varepsilon^t$ ), tal que a velocidade correspondente seja zero quando:

$$\left| \frac{P_c^t - P_c}{P_c^t} \right| \leq \varepsilon^t \quad (4.13)$$

Após as tensões axiais e confinantes foram aplicadas no espécime, as dimensões do espécime neste estágio são indicadas como as dimensões iniciais ou de referência para serem usadas na determinação das tensões e deformações durante a fase de carregamento subsequente.

2. O espécime agora está sob uma fase de carregamento usando qualquer esquema de carregamento (platen ou internal-based). O espécime é carregado movimentando os muros superiores e inferiores de forma oposta um com o outro, com uma velocidade final,  $v_p$ , determinada por uma taxa de deformação específica,  $\dot{\varepsilon}_p$ , definida como:

$$v_p = \frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_p L_0 \quad (4.14)$$

Onde  $L_0$  é a altura inicial do espécime. Note que o valor de  $\dot{\varepsilon}_p$  é o suficiente para produzir um carregamento quasi-estático para o espécime com altura inicial  $L_0$ .

3. A fase de carregamento continua até atingir o critério que finaliza o ensaio. A tensão desviadora ( $\sigma_d = \sigma_a - P_c$ ) é monitorada e o máximo valor de  $\sigma_d$  é armazenado. Durante um ensaio típico este valor vai aumentar até atingir o seu máximo e então vai diminuir de acordo à falha do espécime e o ensaio pode terminar quando  $|\sigma_d| < \alpha|\sigma_d|_{max}$ .

Durante o ensaio à compressão, o comportamento do espécime é monitorado usando um mecanismo chamado “history” para a amostra e armazena as quantidades relevantes.

Depois do final do ensaio a compressão, os seguintes resultados são obtidos desde cada “history” e armazenados num arquivo:

- O módulo de Young ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) correspondentes para cada estado plano de deformação, assumindo que têm sido mantidas constantes as tensões confinantes e que tem sido aplicada uma deformação axial  $\Delta\varepsilon_y$  no eixo  $y$  alinhado com a direção do carregamento. Estes valores são determinados como:

$$\nu' = -\frac{\Delta\varepsilon_x}{\Delta\varepsilon_y} \quad (4.15)$$

$$E' = \frac{\Delta\sigma_y}{\Delta\varepsilon_y} \quad (4.16)$$

Então as constantes elásticas correspondentes com o estado plano de deformação são obtidas como:

$$\nu = \frac{\nu'}{1 + \nu'} \quad (4.17)$$

$$E = E'(1 - \nu^2) \quad (4.18)$$

- A resistência pico ( $\sigma_f$ ) como o máximo valor de tensão axial existente na carga pico.

- A tensão de início de trincas ( $\sigma_{ci}$ ) correspondente ao ponto no ensaio onde uma fração específica do número total de trincas têm sido formadas na carga pico.
- O número total e o modo de falha das trincas no espécime na carga pico.

#### 4.6.

#### Obtenção dos Micro-parâmetros usando ensaios à compressão

Desde ensaios triaxiais são obtidas curvas tensão – deformação das quais são extraídas as seguintes propriedades: Módulo de elasticidade, Coeficiente de Poisson e a Resistência à Compressão. A tabela 3.1, tem os valores dos micro – parâmetros que representam melhor o comportamento mecânico do mármore de Cartago.

Tabela 4.1: Parâmetros para a geração do espécime.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Altura da Amostra (mm)	H	140
Espessura da Amostra (mm)	W	70
Raio da partícula mínimo (mm)	$R_{min}$	0,625
Relação dos raios das partículas	$R_{max}/R_{min}$	1,3
Densidade das partículas (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	2650
Módulo elástico das partículas (Gpa)	$E_c$	35,5
Relação de rigidezes das partículas	$K_n/K_s$	2,6
Multiplicador do raio do contato paralelo	$\bar{\lambda}$	1,00
Módulo elástico do contato (Gpa)	$\bar{E}_c$	35,5
Relação de rigidezes dos contatos	$\bar{K}_n/\bar{K}_s$	2,6
Coeficiente de atrito das partículas	$\mu$	0,577
Resistência normal do contato, média (Mpa)	$\bar{\sigma}_{c,mean}$	45,4
Resistência normal do contato, desvio (Mpa)	$\bar{\sigma}_{c,std}$	1,00
Resistência cisalh. do contato, média (Mpa)	$\bar{\tau}_{c,mean}$	105
Resistência cisalh. do contato, desvio (Mpa)	$\bar{\tau}_{c,std}$	1,00

Com estes micro – parâmetros são obtidos os seguintes resultados para a simulação numérica dos seguintes ensaios triaxiais.

### Ensaio Triaxial - Resistência à compressão com 34,4 MPa. – CCS

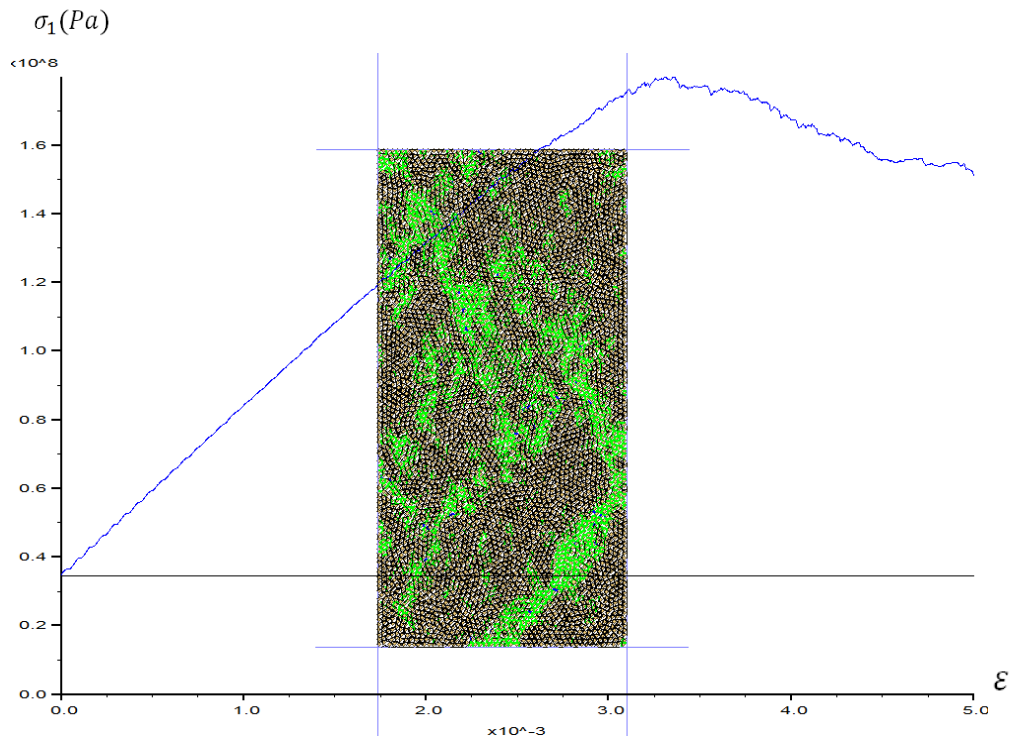


Figura 4.6: Curva Tensão – Deformação do ensaio triaxial numérico para o mármore de Cartago com uma pressão confinante de 34,4 MPa em PFC2D.

Modulo de Elasticidade, E (GPa):

$$E = \frac{\sigma_{desv}}{\epsilon_{axial}} = \frac{(1,8 * 10^8 - 0,344 * 10^8)Pa}{3,35 * 10^{-3}} = 43,8GPa \quad (4.19)$$

Resistência à Compressão Confinada, CCS (MPa):

$$CCS = 1,8 * 10^8 Pa = 180 MPa \quad (4.20)$$



### Ensaio Triaxial – Resistência à compressão com 3,44 MPa

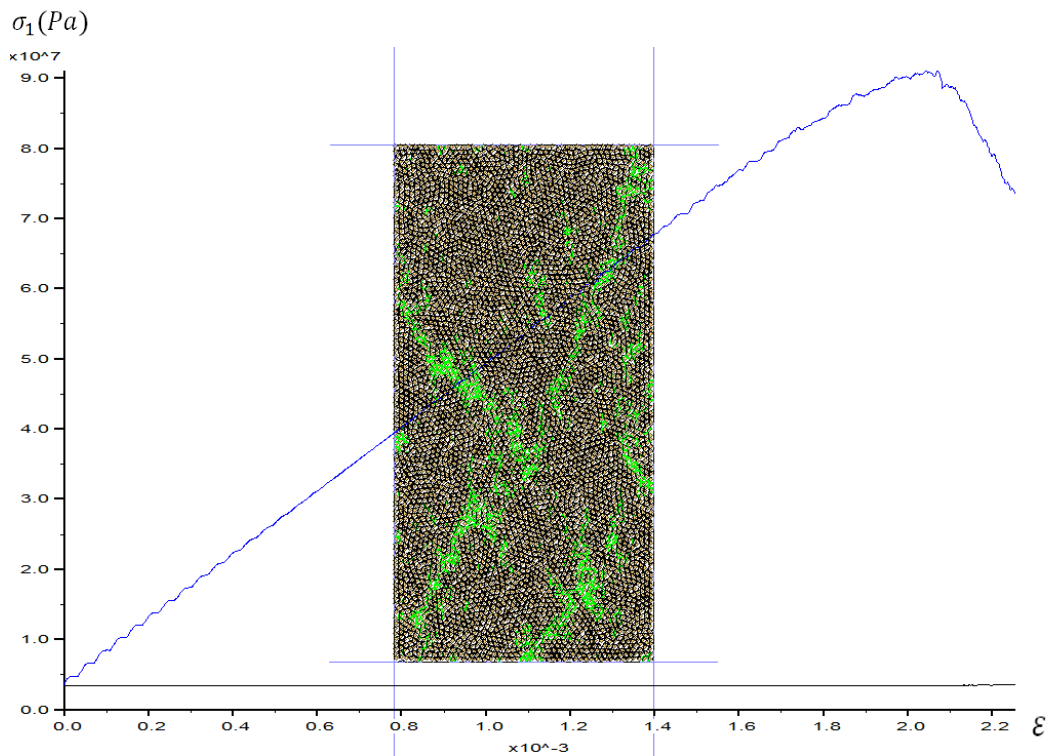


Figura 4.7: Curva Tensão – Deformação do ensaio triaxial numérico para o mármore de Cartago com uma pressão confinante de 3,44 MPa em PFC2d.

Módulo de Elasticidade, E (GPa):

$$E = \frac{\sigma_{desv}}{\epsilon_{axial}} = \frac{(9,2 * 10^7 - 0,344 * 10^7) Pa}{2,02 * 10^{-3}} = 43,9 GPa \quad (4.21)$$

Resistência à Compressão Confinada, CCS (MPa):

$$CCS = 9,2 * 10^7 Pa = 92 MPa \quad (4.22)$$

Comparação dos resultados

Na tabela 4.2, é feita a comparação dos resultados.

Tabela 4.2: Comparação de resultados entre as propriedades reais mármore de Cartago e a simulação do ensaio a compressão.

<b>Resultados da Simulação dos Ensaio a Compressão</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>Mármore de Cartago</b>	<b>PFC Espécime</b>
Modulo de Elasticidade de Young, $E$ (GPa)	44,8	43,8
Coeficiente de Poisson, $\nu$	0,24	0,25
Resistência à Compressão a 3,44 MPa, (MPa)	103	92
Resistência à Compressão a 34,4 MPa, (MPa)	186	180