

4 Apresentação dos resultados

4.1 Introdução

O presente capítulo tem como finalidade apresentar e discutir os resultados das simulações numéricas realizadas com o auxílio da versão 4.0 do programa PFC para duas dimensões, PFC2D (Itasca 2008).

Os resultados obtidos foram divididos em 5 itens: *Calibração do modelo*, no qual são apresentados os procedimentos e resultados para as diferentes tentativas de calibração das propriedades mecânicas do modelo numérico com resultados de ensaios experimentais; *Geração do modelo*, onde são discutidas e avaliadas as diferentes formas de geração dos modelos considerados para a simulação da instalação da estaca e subsequentes ensaios de prova de carga; *Instalação da estaca*, no qual são avaliadas as influências de diferentes condições de instalação da estaca; e *Prova de carga estática*, onde são verificadas algumas influências nas curvas de carga e recalque e os possíveis mecanismos de ruptura envolvidos, além de considerar a diferença entre uma estaca rígida e uma flexível nas simulações.

O efeito da quebra de grãos não foi considerado nas análises do presente trabalho, apesar deste ser amplamente reconhecido por afetar o comportamento de solos granulares (e.g. Bolton, 1986, Huang e Ma, 1994, Lambe e Whitman, 1979 e Mitchell, 2005) e de ter sido verificado por Lobo-Guerrero e Vallejo (2007) que o formato de ponta utilizado no presente trabalho tem uma maior contribuição para esse processo. Esta decisão foi tomada de forma a evitar o acréscimo de tempo das análises e também pelo fato de não ter sido observado o aumento da quantidade de finos após os ensaios no modelo experimental de referência (Bernardes, 1989).

4.2

Calibração do modelo e parâmetros de contato

A calibração foi realizada através de ensaios biaxiais, como descrito por Itasca (2008), e utilizado por diversos autores (e.g. Arroyo et al., 2011; Salot, Gotteland e Villard, 2009; Suzuki e Kuhn, 2014; Zhou et al., 2012, entre outros). As simulações deste ensaio foram realizadas com o objetivo de tentar reproduzir o comportamento tensão, deformação axial e deformação volumétrica da areia Hokksund densa ($D_r = 82\%$) obtida experimentalmente através de ensaios triaxiais (Tadesse, 2000).

Diversos autores como Rowe, (1962), Houlsby (1991) e Bolton, (1986), discutem a grande relevância de fatores como densidade relativa e dilatância no comportamento dos materiais granulares. Segundo Houlsby (1991) esses fatores são importantes, principalmente em condições nas quais as restrições são maiores, como o caso da instalação de estacas. Portanto, mesmo considerando as limitações do modelo discreto em duas dimensões, como discutido no item 2.2.6, foi realizado um esforço para a calibração das amostras numéricas de elementos discretos.

As tentativas de contornar a deficiência do método de simular a resistência real de solos granulares devido à forma idealizada das partículas, como discutido no item 2.2.5, foram realizadas através da inibição do rolamento das partículas circulares e pela utilização de aglomerados de partículas, como apresentado nos subitens a seguir.

4.2.1

Distribuição granulométrica

Os elementos do modelo foram criados a partir da geração aleatória descrita no item 2.2.4.1 onde as partículas são geradas aleatoriamente no domínio, com tamanho variando entre raios máximos e mínimos selecionados. Essa forma de geração foi realizada para diferentes intervalos de diâmetros de partículas, cada qual com uma quantidade de partículas determinada de forma a corresponder a uma porcentagem de volume.

Esta abordagem não é ideal, pois assume que a distribuição de partículas para cada intervalo é linear, mas constitui uma forma simples de se obter a distribuição granulométrica desejada nas simulações de DEM.

A porcentagem de volume de cada intervalo foi definida de acordo com a distribuição granulométrica da Areia Hokksund (Bernardes, 1989), onde a distribuição das partículas numéricas do modelo foi realizada pela discretização da curva experimental em 10 intervalos. As partículas foram geradas iniciando pelos intervalos com maior diâmetro, para ser possível a inserção de todas as partículas no modelo.

As partículas que representam os 5% em volume mais finos da distribuição granulométrica foram eliminadas, pois o volume de uma partícula de raio r é proporcional a r^3 , portanto uma grande quantidade de partículas pode existir em volumes pequenos. A presença dessa fração aumentaria o tempo de simulação pela quantidade superior de partículas, e conseqüentemente de contatos, e pelo fato de que partículas menores diminuiriam o tempo crítico escolhido, conforme apresentado no item 2.2.3. Segundo O'Sullivan (2011) e Potyondy e Cundall (2004) essas partículas apresentam, em geral, poucos contatos, contribuindo pouco para a distribuição de forças no modelo e conseqüentemente para o comportamento do material.

A fração mais grossa (5%) do material foi também desconsiderada, por questão de simplicidade. Pois esta apresentaria poucas partículas (~10 a 20) no total de partículas de cada modelo. Tal abordagem foi também realizada por Butlanska et al. (2009).

Conforme discutido no item 2.2.4, é quase sempre necessário o aumento de escala (*upscaling*) entre as partículas utilizadas no modelo no DEM e os solos granulares. Portanto a porcentagem dos volumes foi obtida pela distribuição granulométrica da areia Hokksund multiplicado por um fator de escala de aproximadamente 25 para a obtenção de um número razoável de partículas, para as dimensões dos modelos das simulações de prova de carga nas estacas.

A distribuição numérica de partículas utilizada nos modelos de elementos discretos do presente trabalho está apresentada na Figura 4.1, juntamente com a distribuição experimental da areia Hokksund.

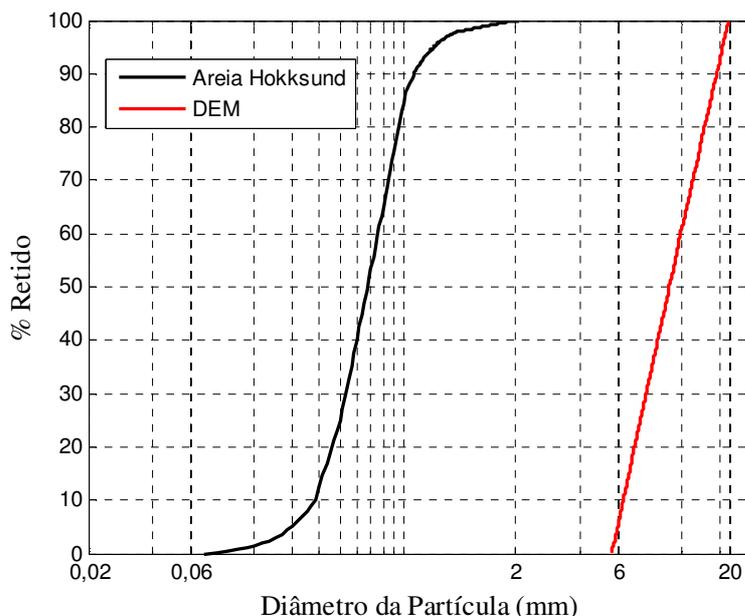


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do modelo discreto

A distribuição apresentada na Figura 4.1 foi também considerada para os aglomerados, pois estes são gerados no PFC2D substituindo uma partícula circular por um aglomerado de mesmo volume, conforme descrito no próximo subitem.

A Tabela 4.1 abaixo apresenta a comparação do Coeficiente de Uniformidade (C_u) entre a Areia de Hokksund e o modelo considerado.

Tabela 4.1 - Comparação entre os Coeficientes de uniformidade

Amostras	$C_u = d_{60}/d_{10}$
Areia de Hokksund	2,04
Modelo DEM	1,86

4.2.2 Geração das amostras

A metodologia de criação das amostras utilizadas para calibração se baseou no método REFD descrito no Subitem 2.2.4. Considerando as limitações do modelo em duas dimensões, já mencionadas, o método foi utilizado preferencialmente para o controle da porosidade da amostra, juntamente com a calibração dos micro-parâmetros de contato, para auxiliar na obtenção da curva tensão-deformação desejada.

As partículas foram geradas, conforme o item 4.2.1, dentro das dimensões do modelo, sem contato e sem a aplicação de gravidade. Após a geração aleatória, os parâmetros iniciais de atrito e rigidez de contato foram atribuídos às partículas e aplicou-se a equação (2.55), até se obter monotonicamente a tensão média de 10kPa nas paredes do modelo, para isso foi obtido os valores de $\beta = 0,15$ e $\gamma = 1,1$.

Após esse processo, o atrito das partículas foi diminuído em etapas com intervalos iguais. Para cada etapa, após o atrito ser reduzido, foi aplicada a expansão radial pela equação (2.56) até que a tensão média nas paredes fosse novamente de 10kPa. Para que isso ocorresse de forma monotônica e com uma diferença menor do que 1% entre as tensões medidas em cada parede, o parâmetro α da equação (2.56) foi dividido por um fator de 3, obtido por tentativa e erro. Para cada expansão foram aplicados ciclos de cálculo até que a amostra alcançasse o equilíbrio. O critério para o equilíbrio utilizado foi a respeito às forças máximas (equação (2.59)), com $S \leq 10^{-5}$.

Os modelos das amostras foram construídos com as dimensões de 35 cm de diâmetro e 70 cm de altura. Como estas análises não consideram a ação da gravidade, as dimensões da amostra não devem interferir nos resultados obtidos (O'Sullivan, 2011), portanto estas foram escolhidas de forma a se obter um número razoável de partículas, utilizando a mesma distribuição apresentada no item 4.2.1, e mantendo a proporcionalidade de 1:2 (H:V) do ensaio biaxial.

De forma a tentar calibrar as curvas dos ensaios biaxiais com os resultados dos ensaios experimentais, foram consideradas cinco formas distintas de partículas, conforme apresentado na Figura 4.2. As partículas estão apresentadas de acordo com a sua angulosidade (equação (2.58)), sendo as partículas circulares calibradas inibindo a rotação e as demais formas de partículas como aglomerados com 2 ou 3 partículas circulares e rotação livre

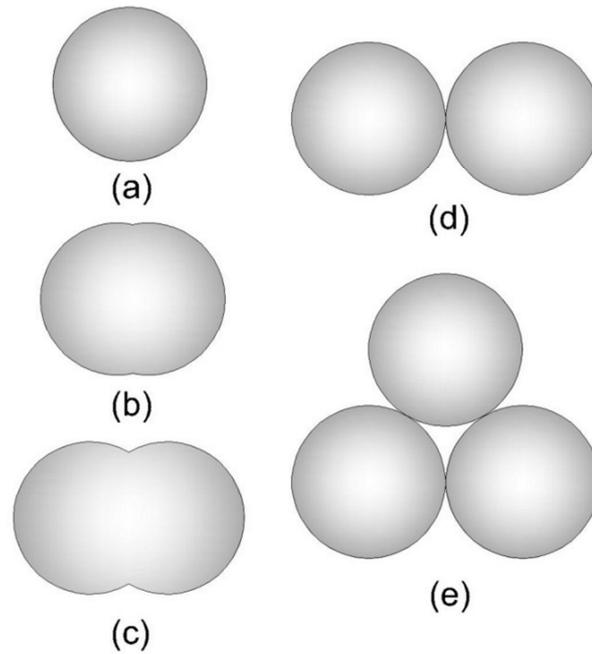


Figura 4.2 – Diferentes aglomerados utilizados (a) angulosidade 0 - partícula circular (b) angulosidade 0.2 – 2 partículas (c) angulosidade 0.5 – 2 partículas (d) angulosidade 1.0 – 2 partículas (e) angulosidade 1.0 – 3 partículas

A porosidade dos modelos foi verificada utilizando 3 grandes círculos de medição na amostra conforme Figura 4.3, com o objetivo de obter este parâmetro internamente na amostra, sem considerar as possíveis heterogeneidades próximas às paredes.

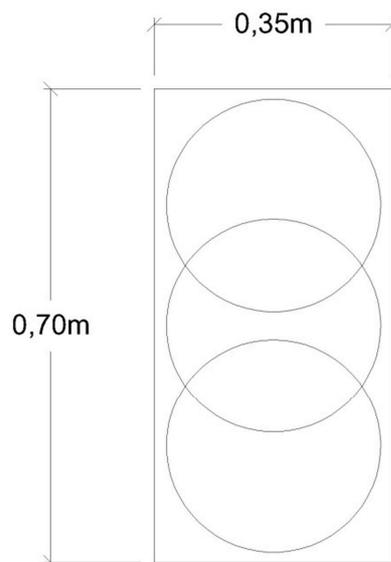


Figura 4.3 - Disposição dos círculos de medição na amostra do ensaio biaxial

De forma a testar a influência do número de partículas nos resultados da calibração, foi considerado também uma amostra maior de partículas circulares. A Tabela 4.2 apresenta o resumo das características de cada modelo considerado na calibração, incluindo o tempo de simulação gasto para sua geração.

Tabela 4.2 - Características de geração das amostras do ensaio biaxial

Modelo	Altura (m)	Largura (m)	Quantidade de partículas	Tempo de simulação (h)
Aglomerado 2 partículas ang. 0,2	0.70	0.35	3128	46.4
Aglomerado 2 partículas ang. 0,5	0.70	0.35	3042	53.1
Aglomerado 2 partículas ang. 1,0	0.70	0.35	2992	57.9
Aglomerado 3 partículas ang. 1,0	0.70	0.35	2975	73.6
Partículas circulares 1	0.70	0.35	3002	10.8
Partículas circulares 2	1.40	0.70	6132	70.4

As variações de porosidade obtidas pelas variações do coeficiente de atrito utilizadas na geração pelo método REFD dos diferentes formatos de partícula encontram-se apresentadas na Figura 4.4, a seguir.

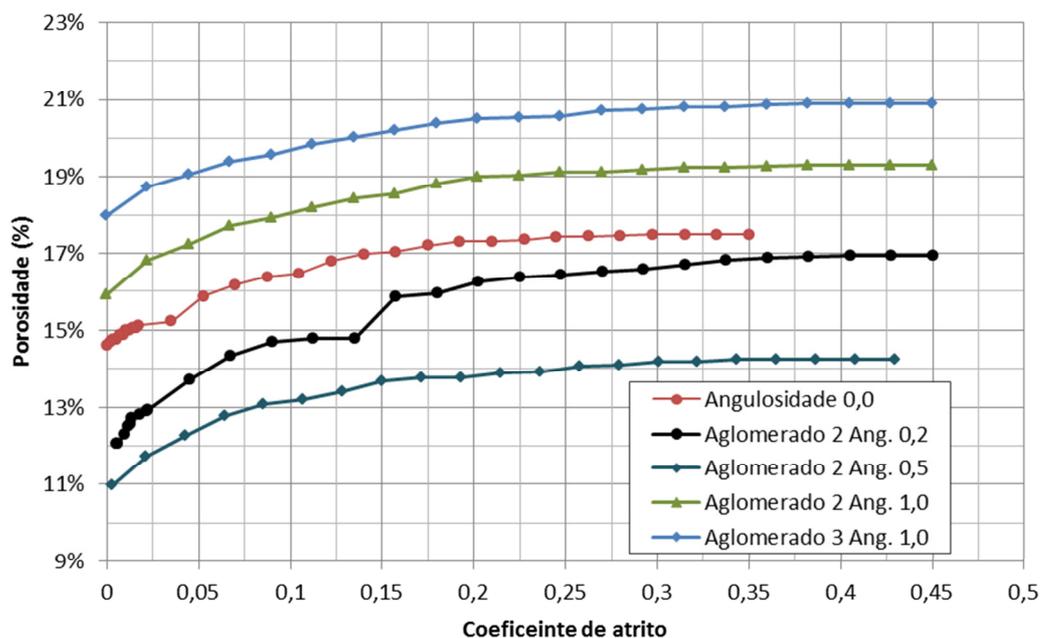


Figura 4.4 - Variação de porosidade com o coeficiente de atrito

Observando a Figura 4.4 pode-se perceber que a porosidade da amostra apresenta um decréscimo mais acentuado quando o coeficiente de atrito se aproxima de zero.

Os valores de porosidade máxima e mínima obtidos por esse método variam de acordo com o formato de partícula utilizado, o que está de acordo com resultados experimentais utilizando amostras de solos arenosos com partículas redondas e angulares, como discutido por Mitchell (2005), onde ele afirma que a forma da partícula define os índices de vazios máximos e mínimos.

A Figura 4.5 apresenta a variação de porosidade com o coeficiente de atrito no método REFD para as duas amostras de partículas circulares. Como pode-se perceber a variação entre as duas curvas é pequeno, indicando que para a distribuição de partículas utilizada e para o mesmo formato de partícula a relação entre a porosidade e o coeficiente de atrito independe da quantidade de partículas da amostra.

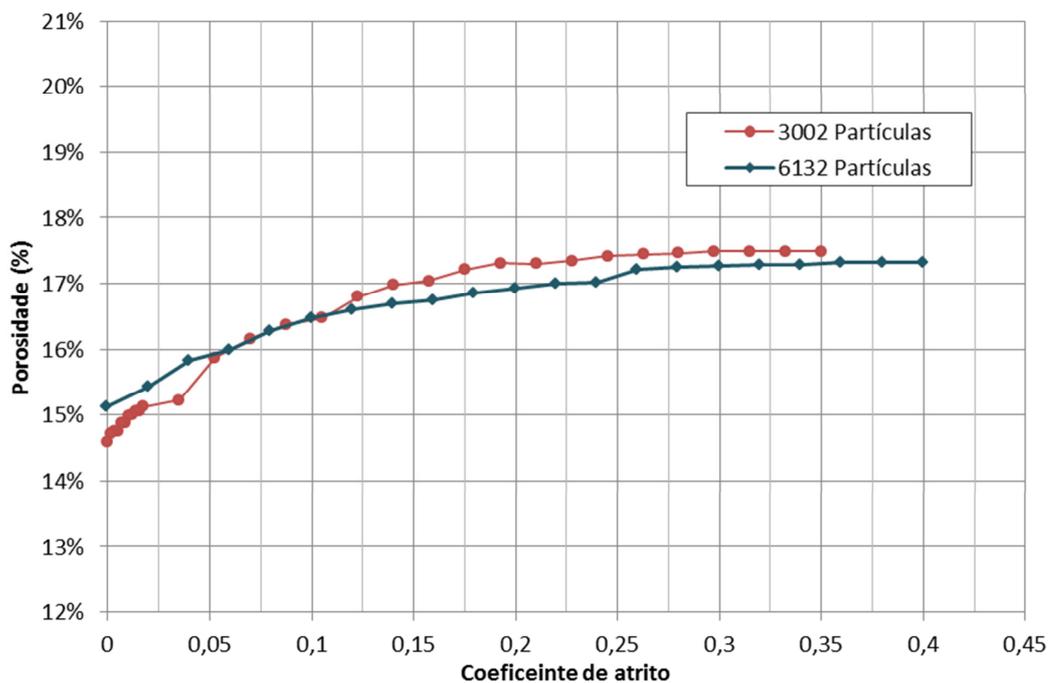


Figura 4.5 - Variação da porosidade com o coeficiente de atrito para os modelos de 3002 e 6132 partículas circulares

Como apresentado por O'Sullivan, (2011), uma das formas de se avaliar o arranjo de partículas gerado pelo DEM é verificando a distribuição da orientação dos contatos entre partículas, onde qualquer tendência de maior número de contatos para alguma direção indicaria a anisotropia do arranjo e consequentemente a anisotropia das propriedades do modelo. A Figura 4.6 apresenta, em forma de gráfico polar, a distribuição dos contatos das amostras consideradas para as simulações de calibração. Nenhuma delas apresenta tendência de direção de orientação, indicando a isotropia das amostras geradas.

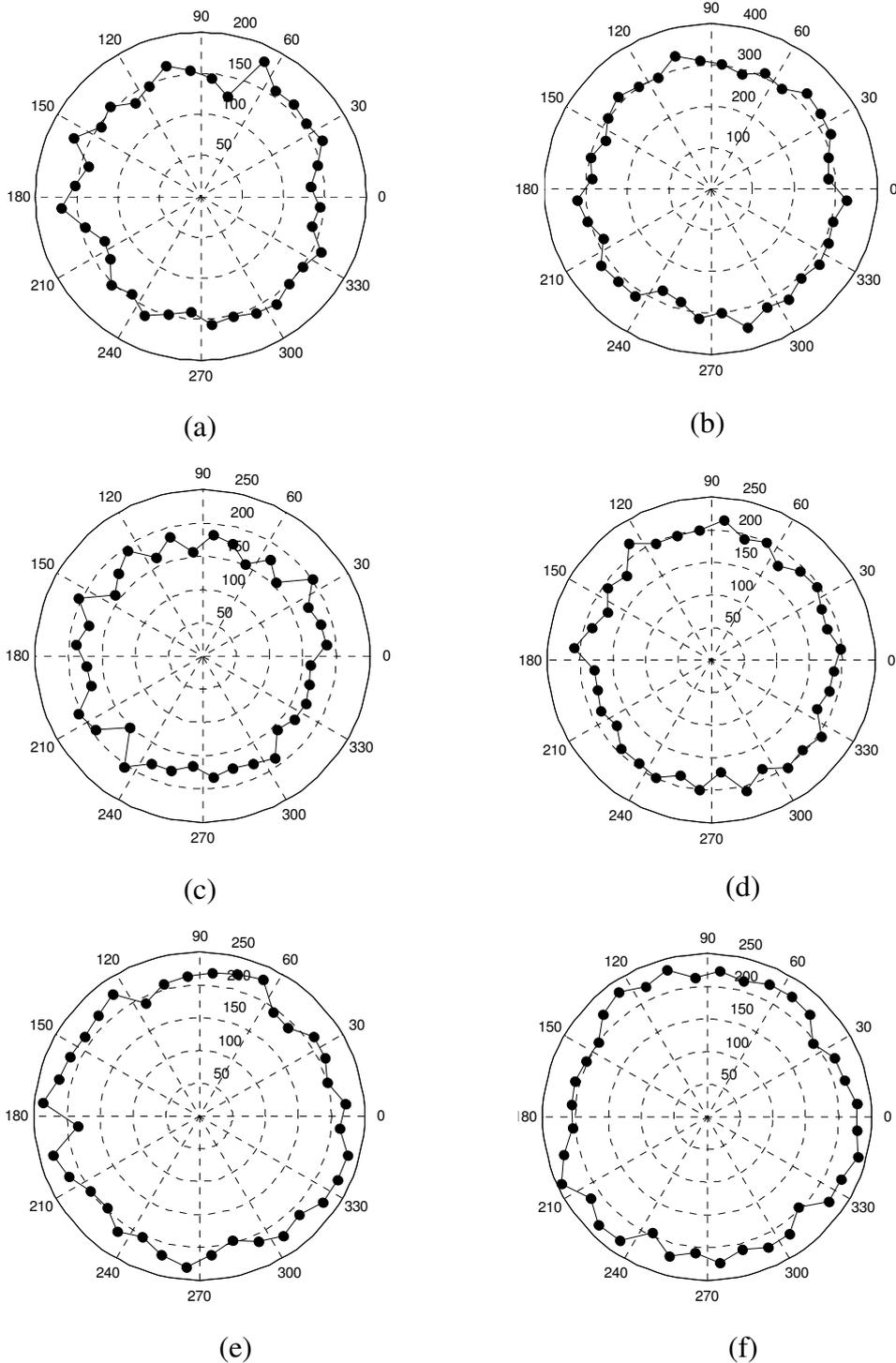


Figura 4.6 – Orientação dos contatos (a) partículas circulares (3002) (b) partículas circulares (6132) (c) aglomerados - 2 partículas ang. 0,2 (d) aglomerados - 2 partículas ang. 0,5 (e) aglomerados - 2 partículas ang. 1,0 (f) aglomerados - 3 partículas ang. 1,0

Ao se observar as distribuições das orientações de contato das amostras utilizadas nas simulações do processo de calibração, apresentadas na figura anterior, pode-se perceber que nenhuma das amostras apresenta uma direção com uma diferença expressiva de número de contatos, indicando a isotropia das propriedades mecânicas das mesmas.

4.2.3 Simulação do Ensaio biaxial

O ensaio biaxial foi simulado a partir dos modelos indicados no subitem anterior, para os diferentes formatos de partícula considerados. Este ensaio numérico é uma representação do ensaio triaxial convencional, se utilizando somente de duas dimensões com o programa PFC2D, sendo denominado tipicamente como ensaio biaxial por usuários do DEM e demais pesquisadores.

A curva experimental utilizada para calibrar os modelos, foi obtida a partir dos ensaios triaxiais realizados por Tadesse (2000) para a tensão confinante de 125kPa e a compacidade relativa de 82%.

Para realizar a simulação dos ensaios biaxiais, foi aplicada a tensão de 125kPa nas 4 paredes do modelo a partir de um algoritmo de servocontrole, acionado a cada ciclo de cálculo e em cada parede, se utilizando da equação a seguir.

$$V_w = G(\sigma - \sigma_{cf})$$

$$G = \frac{\alpha A}{k_n N_C \Delta t} \quad (4.1)$$

Onde V_w é a velocidade imposta na parede, σ é a tensão na parede, σ_{cf} é a tensão confinante final, A é a área transversal da parede, k_n é a rigidez de contato normal média dos contatos da parede, N_C é o número de contatos e Δt é intervalo de tempo dos ciclos de cálculo. α é o fator de relaxação e foi escolhido igual a 0,002, para que a tensão confinante fosse alcançada de forma monotônica.

Após esse processo, foi aplicada uma taxa de deformação de 0,2%, nas paredes horizontais, superior e inferior, a partir de velocidades verticais descendente e ascendente, respectivamente, enquanto a tensão confinante de 125kPa foi mantida nas paredes laterais, com o objetivo de cisalhar a amostra por compressão axial. Esta taxa foi obtida por tentativa e erro para que a taxa de deformação não tivesse efeito nos resultados das simulações.

Como discutido por Kuhn (2006), Ng (2006), O'Sullivan (2011) entre outros, não existem métodos racionais para se calibrar um aglomerado de partículas sem ligação, portanto o processo de calibração se resume em um procedimento de tentativa e erro.

Portanto, foram variados a porosidade e os 3 parâmetros de contato, de todas as amostras, para se obter a melhor relação possível entre as curvas de tensão e deformação numérica e experimental.

A Figura 4.7 apresenta as curvas determinadas a partir das simulações de ensaios biaxiais, nas diferentes amostras com os formatos de partículas considerados, com a melhor calibração obtida, considerando tanto a curva de tensão e deformação axial, quanto à deformação volumétrica do modelo experimental.

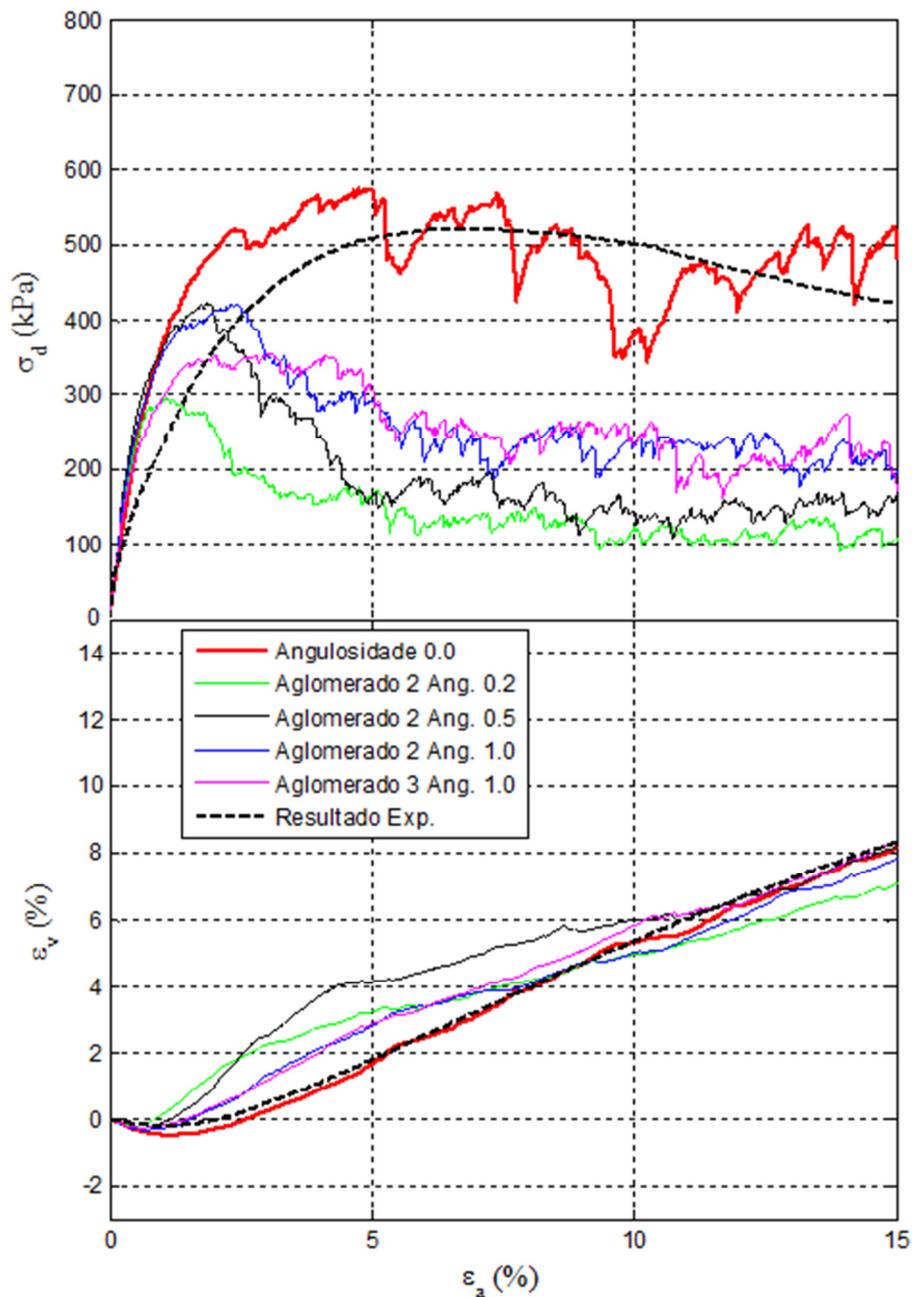


Figura 4.7 - Resultados de tensão e deformação dos ensaios biaxiais

Para os aglomerados, a figura anterior apresenta um comportamento de aumento da tensão desviadora última com a angularidade da partícula, o que condiz com os resultados apresentados por Salot, Gotteland e Villard (2009). Estes autores também perceberam que a tensão desviadora última também independe do coeficiente de atrito utilizado, portanto, a utilização de um coeficiente de atrito superior, nas amostras acima, iria aumentar a tensão desviadora de pico, mas manteria a tensão desviadora última com o mesmo valor.

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros de contato e a porosidade utilizados para os resultados apresentados na Figura 4.7 e os valores de ângulo de atrito (ϕ) de pico e último obtidos.

Tabela 4.3 - Parâmetros de contato utilizados no processo de calibração e parâmetros de resistência das amostras

Formato da Partícula	Coefficiente de Atrito, μ	Rigidez Normal de Contato, k_n , (kN)	Rigidez Tangencial de Contato, k_s , (kN)	Porosidade (%)	ϕ pico (°)	ϕ último (°)
Aglomerado 2 partículas ang. 0,2	0,7	9×10^5	$3,6 \times 10^5$	14,5	33,1	16,6
Aglomerado 2 partículas ang. 0,5	0,7	9×10^5	$3,6 \times 10^5$	13,2	38,4	22,0
Aglomerado 2 partículas ang. 1,0	0,7	9×10^5	$3,6 \times 10^5$	17,0	38,4	27,2
Aglomerado 3 partículas ang. 1,0	0,7	9×10^5	$3,6 \times 10^5$	18,9	35,7	27,2
Partículas circulares	0,4	8×10^5	$2,0 \times 10^5$	16,1	42,8	40,8

O resultado das curvas de tensão e deformação das partículas circulares, com rotação inibida, apresentaram uma boa concordância com as curvas obtidas dos ensaios experimentais com os parâmetros de resistência obtidos (ϕ de pico e último) mais próximos ao ensaio triaxial utilizado como referência, conforme pode ser observado na Tabela anterior.

Para se certificar que o número de partículas utilizado (~3000) foi suficiente para representar o comportamento da amostra, foi simulado também o ensaio biaxial com o modelo maior de partículas circulares, apresentado no subitem anterior, com aproximadamente 6000 partículas. A Figura 4.8 apresenta os resultados obtidos para esta comparação.

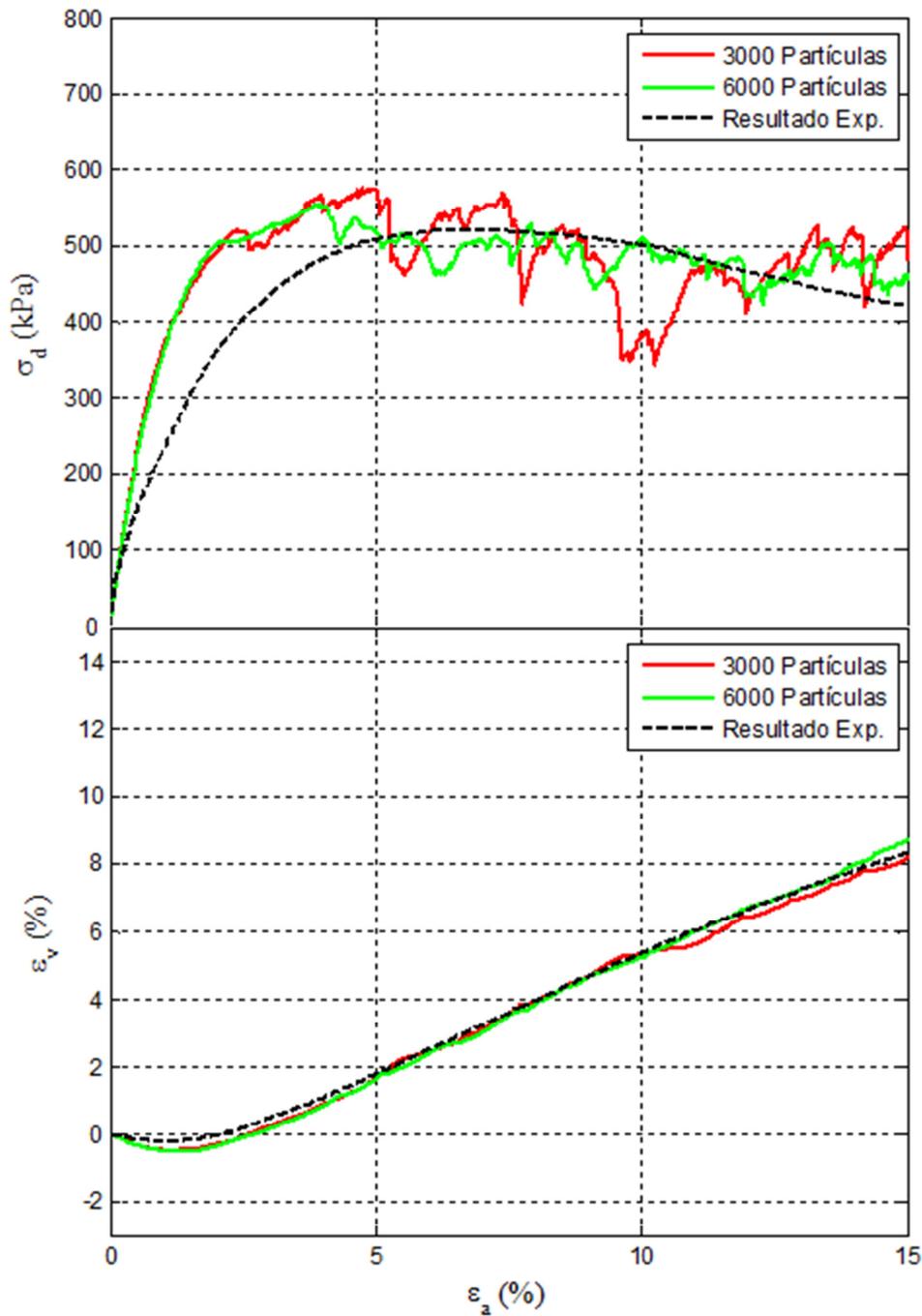


Figura 4.8 - Curvas de tensão e deformação das amostras de partículas circulares

A amostra maior apresentou o mesmo comportamento da amostra de 3000 partículas, apresentando apenas um ruído com picos menores de tensão no trecho pós pico da curva de tensão desviadora por deformação axial.

A tentativa de avaliar a superfície de ruptura, das amostras no ensaio biaxial, foi através do módulo do vetor de deslocamento das partículas (como realizado por Jiang, Yu e Harris, 2006; Li e Li, 2014, entre outros) e da rotação acumulada (defendida por Oda e Iwashita, 1999; O'Sullivan e Bray, 2003, entre outros). Esta última avaliação foi realizada apenas para os aglomerados, pois as partículas circulares foram simuladas inibindo a rotação, conforme apresentado anteriormente.

Os deslocamentos e rotações acumuladas das amostras a 5% de deformação axial estão apresentadas na Figura 4.9 à Figura 4.13, a seguir. Os deslocamentos estão apresentados em metros e a rotação acumulada em radianos.

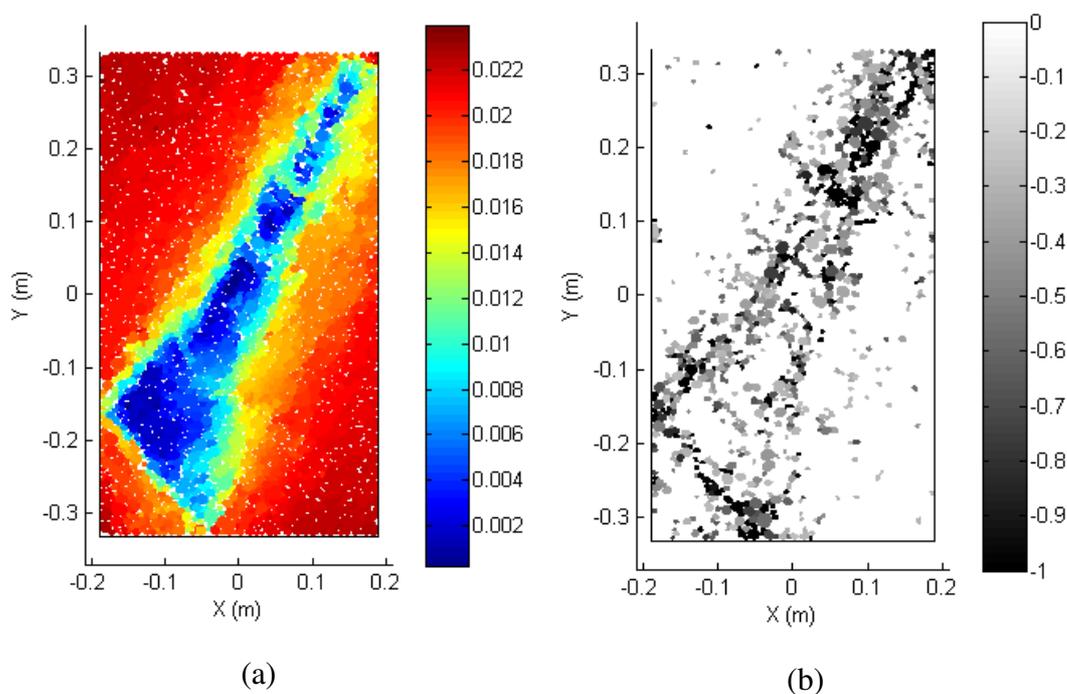


Figura 4.9 – Avaliação de (a) módulo do deslocamento e (b) rotação acumulada, do aglomerado de 2 partículas e angulosidade de 0,2

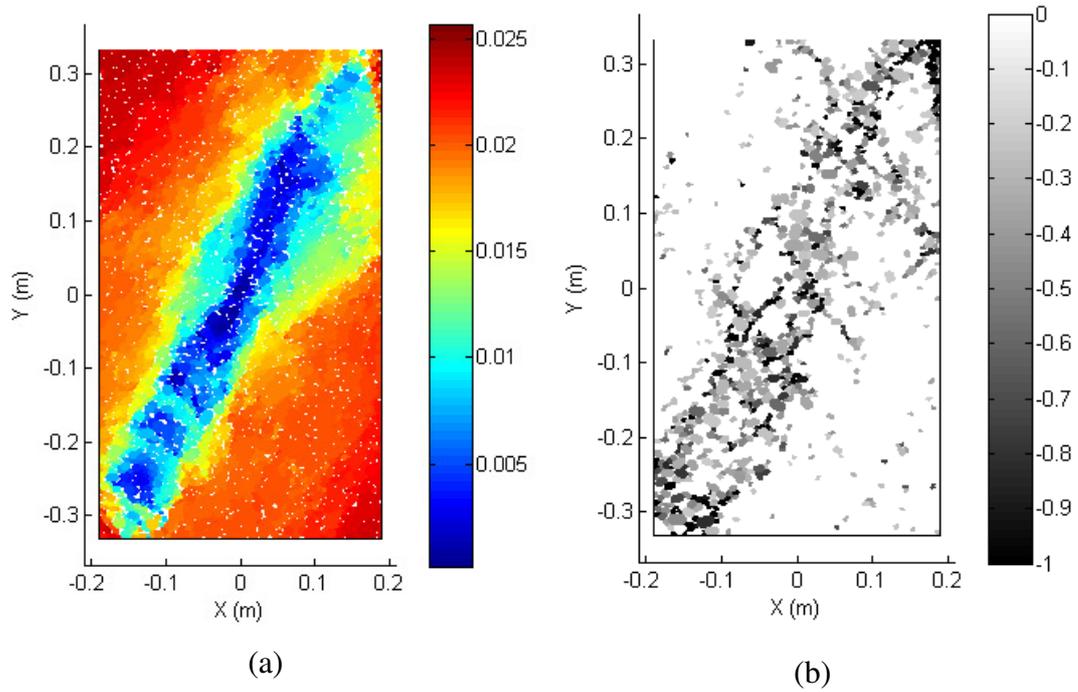


Figura 4.10 – Avaliação de (a) módulo do deslocamento e (b) rotação acumulada, do aglomerado de 2 partículas e angulosidade de 0,5

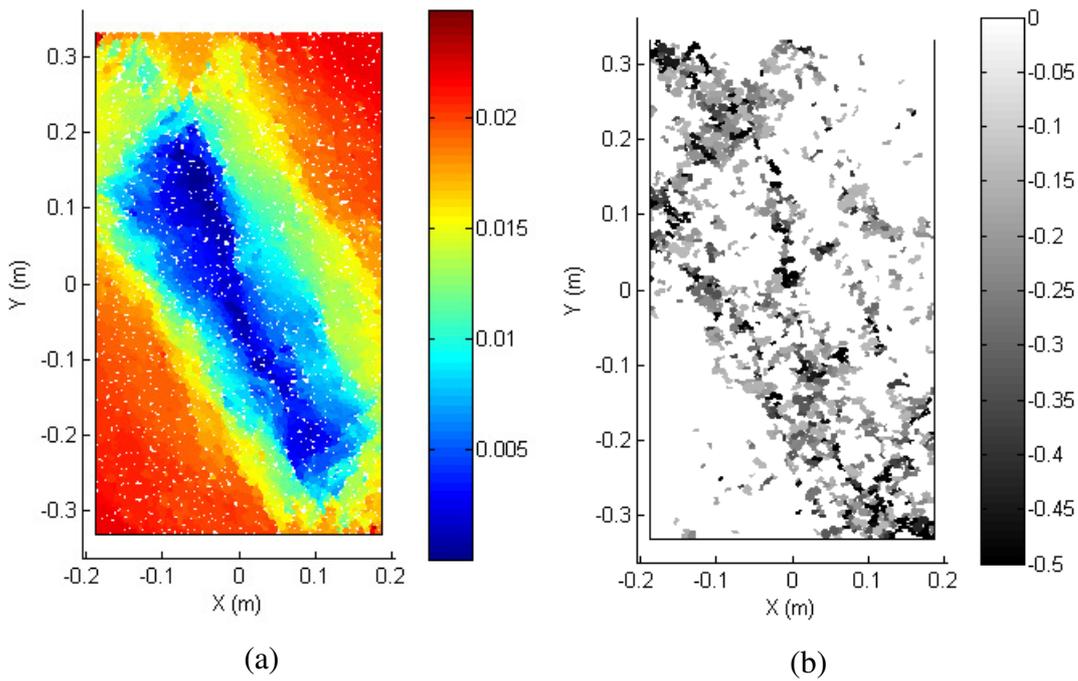


Figura 4.11 – Avaliação de (a) módulo do deslocamento e (b) rotação acumulada, do aglomerado de 2 partículas e angulosidade de 1,0

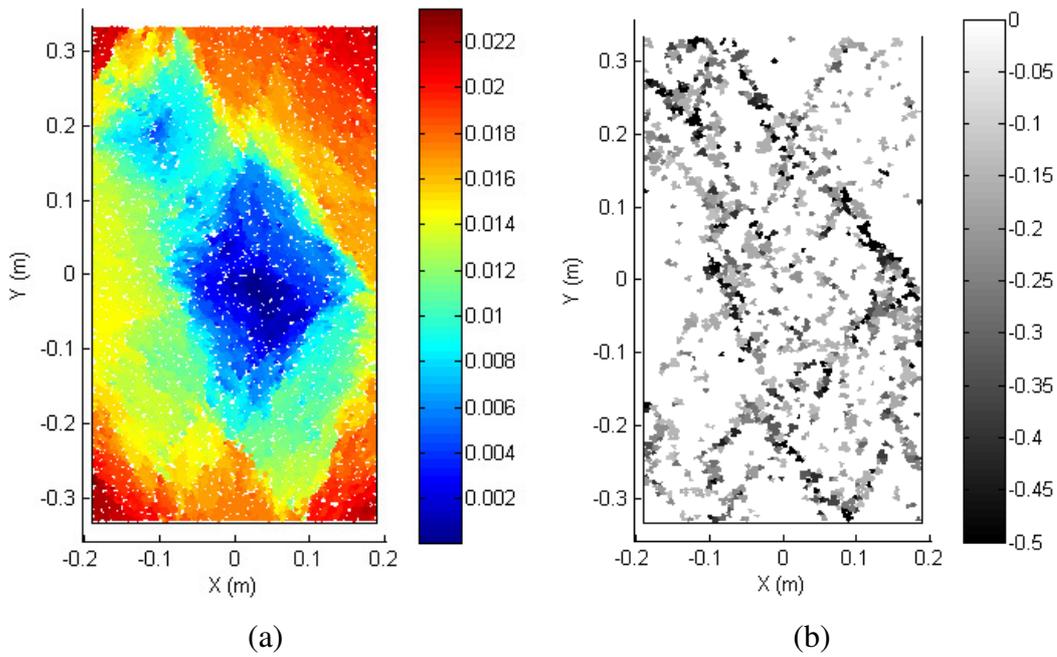


Figura 4.12 – Avaliação de (a) módulo do deslocamento e (b) rotação acumulada, do aglomerado de 3 partículas e angulosidade de 1,0

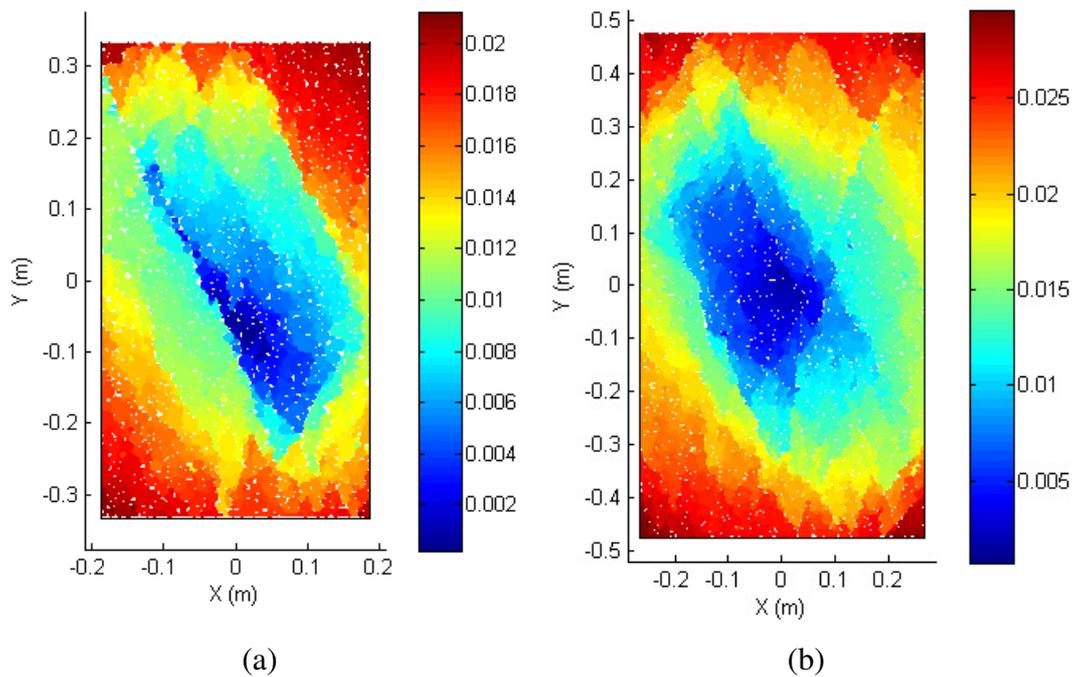


Figura 4.13 – Avaliação do módulo do deslocamento das amostras de partículas circulares (a) ~3000 Partículas (b) ~6000 Partículas

As amostras com aglomerados e rotação permitida apresentam em sua maioria uma banda de ruptura razoavelmente definida e com uma boa concordância entre a zona de menor deslocamento e as faixas com rotações

acumuladas maiores, a não ser pelo aglomerado de 3 partículas e angulosidade de 1,0.

Para esta amostra, apesar do comportamento da curva de tensão desviadora por deformação axial já estar na zona de pós pico e teoricamente já ter sofrido o processo de ruptura, tanto o deslocamento quanto as rotações apresentam comportamentos não muito definidos, sem uma boa concordância entre os 2. Já as amostras com partículas circulares e rotação inibida apresentaram deslocamentos com faixas um pouco menos definidas do que os outros aglomerados.

4.2.4 Considerações Gerais

O processo realizado para a calibração da amostra (i.e., a calibração dos parâmetros de contato e da porosidade, com o objetivo de obter o comportamento mecânico mais próximo do ensaio triaxial de referência) consistiu na simulação de dezenas de ensaios biaxiais no programa PFC2D, variando cada um desses parâmetros. Foram consideradas duas formas para superar a limitação de resistência da amostra, imposta pelo formato idealizado de partícula, impedir a rotação das partículas e utilizar aglomerados de partículas circulares. Para esta última forma, foram consideradas 4 formatos distintos, variando a angulosidade e o número de partículas circulares.

Como foi possível perceber, a partir dos resultados apresentados neste item, a única amostra capaz de reproduzir razoavelmente as curvas de tensão e deformação do ensaio triaxial de uma amostra de areia Hokksund densa foi a amostra utilizando partículas circulares com rotação inibida, mesmo assim apresentando uma rigidez um pouco superior ao ensaio experimental. As demais amostras utilizadas, com formas diferentes de aglomerados, não foram capazes de atingir a resistência do ensaio experimental, em especial a resistência última. Segundo Salot, Gotteland e Villard (2009), a solução para este problema seria aumentar a angulosidade das partículas e/ou aumentar o número de partículas por aglomerado, mas esse processo apresenta duas complicações para o presente trabalho:

- Primeiro, com a distribuição de partículas considerada, a utilização de um aglomerado com angulosidade superior a 1,0 os aglomerados poderiam "se cruzar", onde as partículas menores poderiam ficar presas no espaço entre duas partículas grandes do mesmo aglomerado;

- Segundo, a utilização de aglomerados com mais de 3 partículas aumentaria consideravelmente o tempo computacional das simulações, inviabilizando muitas das análises realizadas. Outro possível motivo para a incapacidade apresentada de calibrar os aglomerados seria devido a utilização do DEM em 2D, conforme apresentado no subitem 2.2.6, Kuhn (2006) discute que a resistência de amostras em 3D é superior ao obtido em amostras 2D, portanto em 3D talvez fosse possível a calibração da amostra com algum dos formatos considerados.

Por conta dessa incapacidade de calibração das amostras com aglomerados, somente a partícula circular foi considerada nas análises subsequentes. A Tabela 4.4, a seguir apresenta os parâmetros de contato e porosidade final calibrada para a amostra com partículas circulares e rotação inibida.

Tabela 4.4 - Parâmetros de contato finais da amostra de partículas circulares

Formato da Partícula	Coefficiente de Atrito, μ	Rigidez Normal de Contato, k_n, (kN)	Rigidez Tangencial de Contato, k_s, (kN)	Porosidade (%)
Partícula circular	0,4	8×10^5	$2,0 \times 10^5$	16,1

A avaliação das superfícies de ruptura das amostras dos ensaios biaxiais, realizadas tanto pelo módulo do deslocamento das partículas, quanto pela rotação acumulada, apresenta faixas de ruptura bem definidas e coerentes entre o deslocamento e a rotação, para os aglomerados de 2 partículas, concordando com as conclusões obtidas por Oda e Iwashita (1999), em partículas com resistência à rotação implementada no modelo de contato, e discutido em O'Sullivan (2011). A amostra com aglomerados contendo 3 partículas e angulosidade de 1,0 não apresenta uma faixa clara de ruptura nem nos deslocamentos e nem na rotação, com comportamentos distintos entre os dois. As duas amostras de partículas circulares com rotação inibida (com aproximadamente 3000 e 6000 partículas), analisadas somente pelo módulo do deslocamento, também não apresentaram uma faixa clara indicando a ruptura do material.

O fato destas 3 amostras distintas não apresentarem faixas ou superfícies de ruptura bem definidas pelo deslocamento e rotação das partículas, pode ser explicado por um ou mais desses 3 motivos: Primeiro, nos ensaios simulados por Oda e Iwashita (1999), foram utilizadas paredes flexíveis nas laterais, enquanto que nas simulações de ensaios biaxiais do presente trabalho, as paredes laterais foram constituídas de paredes rígidas e essa restrição de movimento pode ter impedido o desenvolvimento de superfícies claras de ruptura, mesmo após a amostra não suportar mais as tensões aplicadas e ter apresentado um comportamento de ruptura nas curvas de tensão por deformação axial. Segundo, os métodos utilizados para determinação da faixa de ruptura, por deslocamento das partículas e rotação acumulada, não serem adequados para representar esse processo nessas duas condições. E terceiro, seria o fato de simplesmente as amostras de partículas circulares com rotação inibida e aglomerados com 3 partículas e angulosidade 1,0 não desenvolverem superfícies definidas no método de elementos discretos em 2D.

Segundo McDowell, Falagush e Yu, (2012) a cinemática produzida por partículas com rotação inibida é diferente que a produzida por aglomerados, enquanto Zhou et al. (2013) apresenta resultados mostrando comportamentos diferentes entre partículas circulares com alguma forma de redução de rotação e partículas não-convexas, indicando que seria possível um comportamento diferente desta condição utilizada.

4.3

Geração do modelo

A geração dos modelos a serem utilizados nas simulações de instalação da estaca e prova de carga foi realizada de acordo com as premissas discutidas no Item 2.2.4. Foram consideradas apenas partículas circulares com a rotação inibida, pois, conforme apresentado no item 4.2, não foi possível a calibração das amostras compostas por aglomerados. Os parâmetros de contato das partículas utilizadas para esses modelos foram determinados pela calibração com ensaios biaxiais, conforme apresentado na Tabela 4.4.

Foi utilizado o coeficiente de atrito igual a 0 nas paredes e fundo dos modelos, de forma a diminuir a influência dos limites do modelo nos resultados obtidos. As rigidezes de contato, normal e cisalhante, foram consideradas com um fator de 1,1 dos mesmos parâmetros utilizados nos contatos entre as partículas. A Tabela 4.5 a seguir apresenta os parâmetros de contato utilizados para as paredes do modelo.

Tabela 4.5 - Parâmetros de contato utilizados nas paredes dos modelos

Rigidez normal parede, k_n, (kN)	$8,8 \times 10^5$
Rigidez cisalhante parede, k_s, (kN)	$2,2 \times 10^5$
Coeficiente de atrito parede	0,0

As dimensões do modelo e da estaca, utilizadas nas simulações, foram escolhidas com base no trabalho descrito no Capítulo 3.

A utilização das dimensões totais deste modelo (i.e. 5m de largura e 3m de profundidade) acarretaria em um número excessivo de partículas, considerando a distribuição granulométrica indicada na Figura 4.1, (aproximadamente 180.000) e consequentemente, em um elevado tempo de simulação. Em contrapartida, foi decidido no presente trabalho a utilização de um modelo reduzido para referência, com o objetivo de avaliar um universo maior de parâmetros e condições que possam influenciar o problema considerado.

Para a escolha da dimensão destes modelos foi utilizada a distância de borda de 10 vezes o diâmetro da estaca (10D), tanto para as laterais quanto para o fundo do modelo, baseado em resultados experimentais (e.g. Bolton *et al.*, 1999; Bolton e Gui, 1993 e Phillips e Valsangkar, 1987) e premissas de outros trabalhos de penetração com DEM (e.g. Jiang, Yu e Harris, 2006 e Huang e Ma, 1994).

De forma a evitar as heterogeneidades e anomalias verificadas por Butlanska *et al.* (2009) na utilização de metade ou um quarto do domínio (para o processo de cravação em 3 dimensões) foi considerado o domínio inteiro para as simulações do presente trabalho.

A Tabela 4.6 apresenta as dimensões utilizadas para o modelo de referência, considerando a profundidade final de instalação de 700 mm.

Tabela 4.6 – Dimensões do modelo

Parâmetros	Dimensões (m)
Altura (H)	1,45
Largura (D)	1,575
Profundidade de cravação	0,7
Diâmetro da Estaca (d_c)	0,075

A Figura 4.14, a seguir, apresenta esquematicamente as dimensões do modelo de referência, apresentadas na Tabela 4.6.

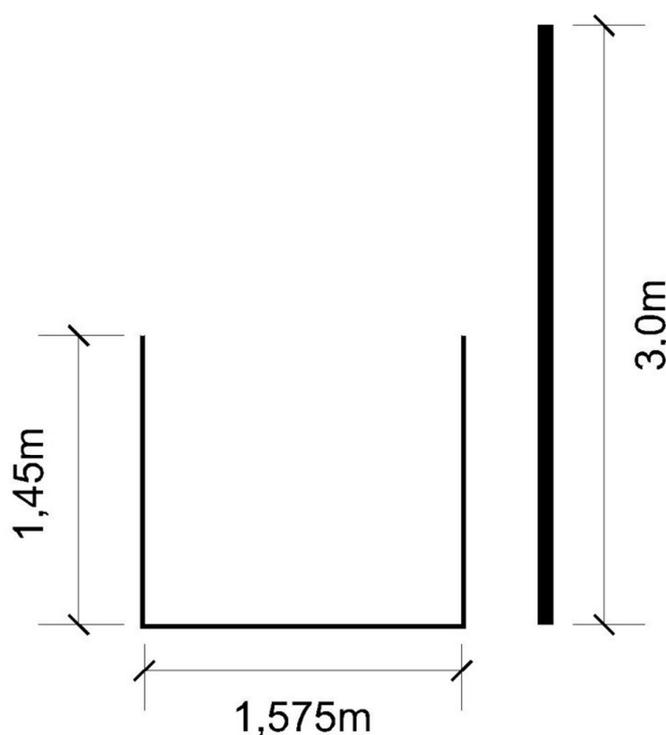


Figura 4.14 – Dimensões do modelo de referência e estaca utilizados

Também foram consideradas larguras de 3,075m e 4,575m (20D e 30D, respectivamente) e uma profundidade de 2,85m, adicionalmente às dimensões do modelo de referência para a avaliação do efeito de borda e fundo nas análises subsequentes.

Com objetivo de verificar as influências do método de geração do modelo, discutidas no Item 2.2.4, foram utilizadas três formas distintas de geração de amostra:

- O REFD, mesmo método utilizado nas amostras dos ensaios biaxiais apresentado nos Itens 2.2.4.5 e 4.2.2- *Modelo 01*;
- Geração aleatória das partículas com a subsequente compactação da amostra e variação do atrito, mantendo a tensão confinante de 10kPa, até se obter a porosidade calibrada - *Modelo 02*;
- E a geração de um modelo a partir das amostras utilizadas nos ensaios biaxiais - *Modelo 03*.

Este último modelo foi desenvolvido no presente trabalho e consiste na reprodução das amostras menores, geradas para os ensaios de calibração, de forma a preencher o modelo utilizado para as simulações com estaca. Os parâmetros de localização e raio de cada partícula da amostra utilizada na calibração foram armazenados e as partículas foram recriadas, uma a uma, dentro do domínio do novo modelo. Cada bloco de partícula, representado por uma amostra do ensaio biaxial, foi reproduzida com uma pequena superposição com os outros blocos, de forma a reduzir os espaços vazios nos contatos com as bordas das amostras, manter as partículas em contato e gerar um estado de tensão no modelo. Para as partículas pertencentes a esta faixa de superposição foi atribuído um coeficiente de atrito nulo e foram aplicados ciclos de cálculo até que a tensão nas paredes fosse igual à utilizada na geração das amostras para calibração (10 kPa). Após se atingir essa tensão, o coeficiente de atrito calibrado foi restituído para todas as partículas e o modelo foi levado ao equilíbrio. Tanto a dimensão da superposição quanto a largura da faixa de partículas com atrito nulo foram determinadas por tentativa e erro para que fosse gerado um modelo com menores heterogeneidades de porosidade e tensão.

Para cada uma das três formas de geração de modelos consideradas foi aplicada uma tensão média isotrópica no meio de 10kPa, a partir da expansão radial (Modelo 01), movimento das paredes (Modelo 02) e da própria geração das partículas (Modelo 03). Essa tensão foi escolhida baixa o suficiente, para não influenciar no modelo final, pois como demonstrado por Huang e Ma (1994), o histórico de tensões tem uma grande influência nos resultados do processo de penetração no DEM. Após esse processo, foi aplicada uma força de corpo vertical descendente nas partículas do modelo, para simular a gravidade, a fim de obter tensões verticais e horizontais similares ao modelo físico considerado e o modelo foi novamente levado ao equilíbrio.

A Tabela 4.7, a seguir, apresenta o tempo de simulação obtido para cada uma das 3 formas de geração de modelo apresentadas, considerando a distribuição de partículas apresentadas no Item 4.2.1 e as dimensões da Tabela 4.6.

Tabela 4.7 - Tempo de geração dos modelos considerados

Modelo	Tempo
Modelo 01	5,6 Dias
Modelo 02	3,8 Dias
Modelo 03	3 horas

Devido ao tempo de geração consideravelmente inferior aos outros modelos, o método de geração do Modelo 03 foi utilizado para a geração dos demais modelos, utilizando diferentes dimensões e modificando o tamanho das partículas.

Para avaliar o efeito do tamanho de partícula foi criado um modelo utilizando uma distribuição granulométrica de forma similar à obtida no Item 4.2.1, mas considerando metade do raio de cada partícula. A Figura 4.15 mostra as distribuições determinadas para os dois tamanhos de partícula considerados.

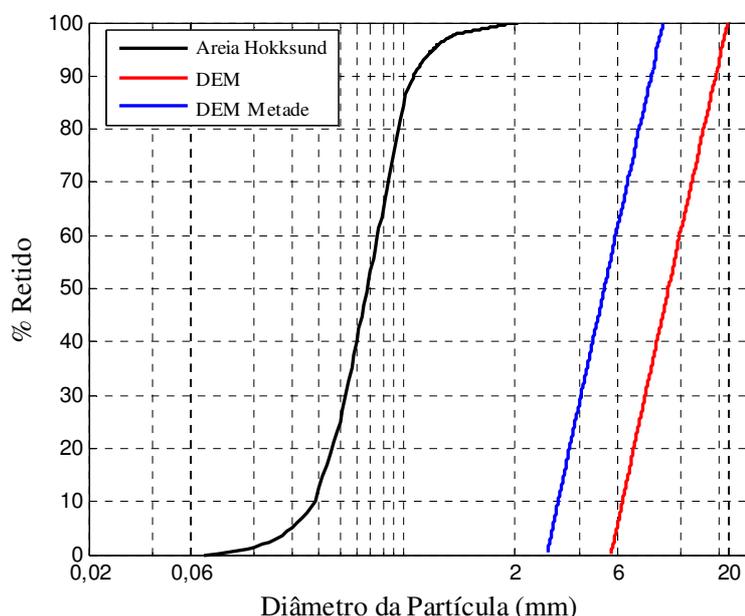


Figura 4.15 – Curvas granulométricas para a areia Hokksund experimental e nos modelos discretos

Para este modelo, foram armazenadas a localização e raio das partículas do Modelo 03 e reduzidas, multiplicando os raios e localização por 0,5 e posteriormente transladando as partículas para compor o modelo de dimensões apresentadas na Tabela 4.6.

A Tabela 4.8 apresenta o resumo das características de cada modelo considerado nas simulações com estaca e do tempo computacional gasto em sua geração.

Tabela 4.8 – Resumo das características dos diferentes modelos considerados

Modelo	Altura (m)	Largura (m)	Quantidade de partículas	Tempo de geração (h)
Modelo 1	1,45	1,575	28.595	135
Modelo 2	1,45	1,575	29.049	92
Modelo 3	1,45	1,575	28.509	3
Modelo 3 – Borda 20D	1,45	3,075	55.677	5
Modelo 3 – Borda 30D	1,45	4,575	82.845	7
Modelo 3 – Altura 2,85m	2,85	1,575	56.879	5
Modelo 3 – Metade do Raio	1,45	1,575	114.036	10

4.3.1

Seleção do Volume Elementar Representativo

Conforme apresentado no item 2.2.3.5 os parâmetros de tensão, deformação e porosidade de dentro do modelo foram obtidos através da utilização de volumes elementares representativos do contínuo. No PFC2D esse processo ocorre pela utilização de *Círculos de Medição*, através dos quais são feitos os cálculos e obtenção destes parâmetros.

A partir da seleção destes círculos, outros parâmetros como quantidade de partículas, raio médio das partículas e número de coordenação também podem ser avaliados. Sendo número de coordenação definido pela quantidade de contatos por partícula obtido dentro do volume (3D) ou área (2D) de interesse.

Como discutido por Butlanska et al. (2009) e Butlanska et al.(2014) o tamanho do Círculo de Medição (CM) deve ser escolhido de forma a captar a variabilidade dos parâmetros de interesse, mas também deve ser uma representação adequada do contínuo, como discutido no item 2.2.3.5.

Para a escolha do tamanho apropriado, o raio do círculo foi então variado de 10 mm a 140 mm, conforme apresentado na Figura 4.16, e foi verificada a variabilidade de algumas características dos modelos.

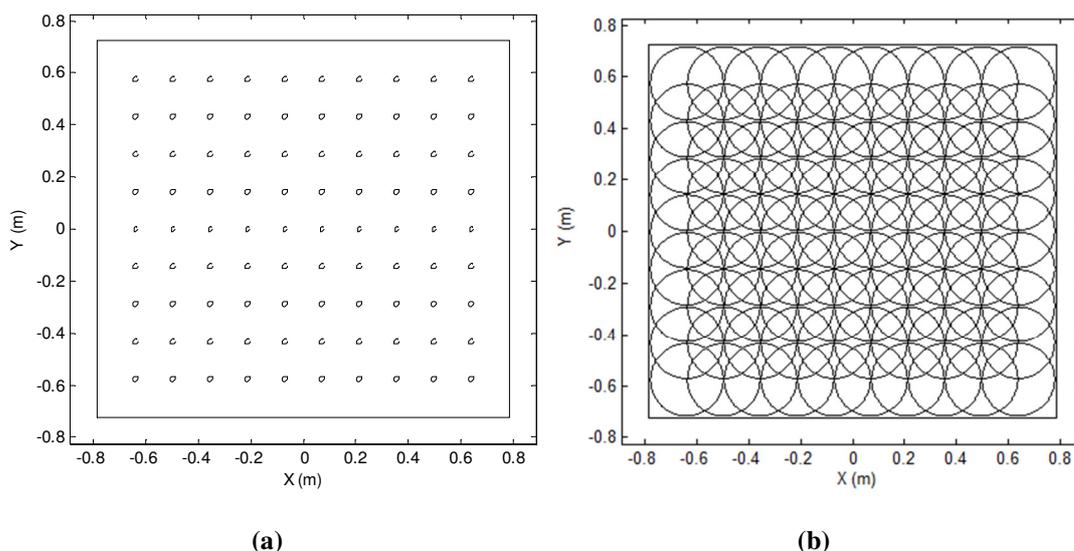


Figura 4.16 – Distribuição dos Círculos de Medição para a escolha do tamanho apropriado (a) – 10mm de raio e (b) 140mm de raio

Os valores de porosidade, número de partículas, número de coordenação e raio médio de partículas para cada CM foram considerados para a escolha do tamanho do volume representativo.

Os valores normalizados e o coeficiente de variação de cada um desses parâmetros foram avaliados em todos os modelos utilizados para cada raio do círculo de medição, obtidos a partir das equações (4.2) e (4.3), respectivamente.

$$V_N = M_{CM}/M_M \quad (4.2)$$

$$C_V = \sigma(V_{CM})/M_{CM} \quad (4.3)$$

Onde:

V_N – Valor normalizado do parâmetro

M_{CM} – Parâmetro médio dos valores dos CM

M_M – Parâmetro médio do Modelo

C_V – Coeficiente de Variação do parâmetro

$\sigma(V_{CM})$ – Desvio padrão do parâmetro considerado

Para esta análise foram considerados apenas as 3 formas de geração de amostra apresentadas anteriormente, *Modelo 01*, *Modelo 02* e *Modelo 03*. os demais modelos considerados, foram gerados com a mesma metodologia utilizada para o Modelo 03 e portanto apresentam as mesmas variações dos parâmetros selecionados.

A Figura 4.17 à Figura 4.22 a seguir, apresentam o valor normalizado pela média e o coeficiente de variação de cada parâmetro levado em consideração para a verificação da homogeneização dos modelos.

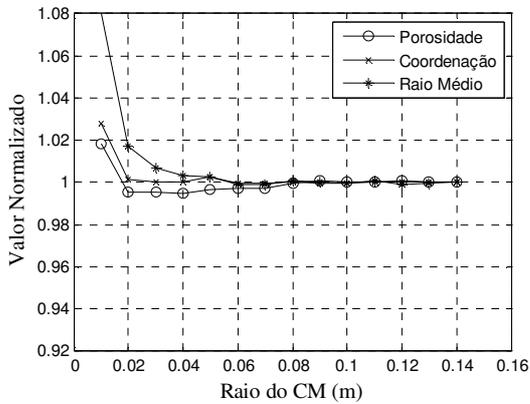


Figura 4.17 - Valores normalizados dos parâmetros do Modelo 01

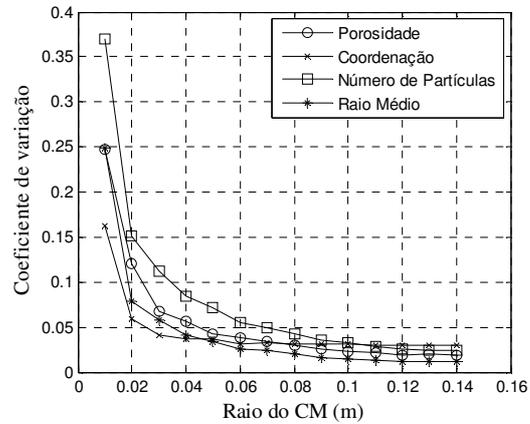


Figura 4.18 - Coeficiente de variação dos parâmetros do Modelo 01

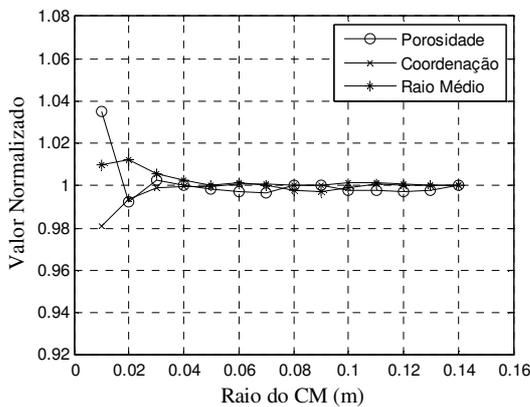


Figura 4.19 - Valores normalizados dos parâmetros do Modelo 02

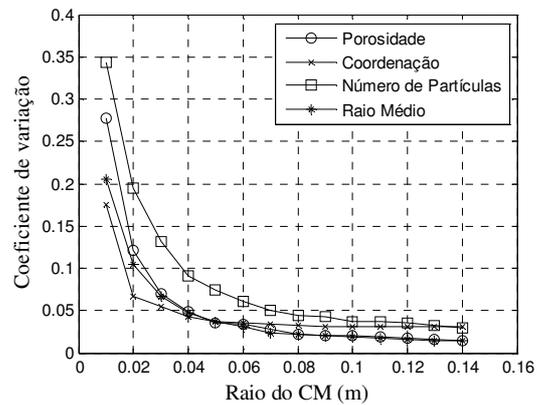


Figura 4.20 - Coeficiente de variação dos parâmetros do Modelo 02

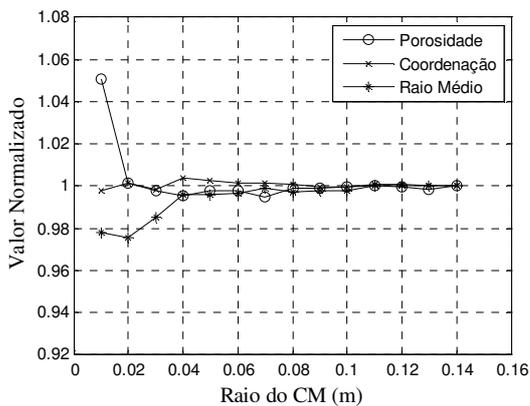


Figura 4.21 - Valores normalizados dos parâmetros do Modelo 03

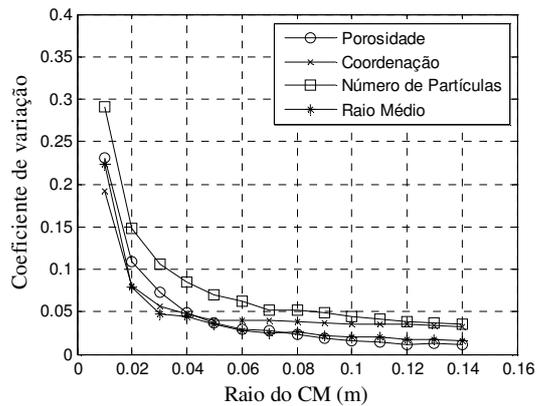


Figura 4.22 - Coeficiente de variação dos parâmetros do Modelo 03

Com base nos resultados apresentados foi escolhido o raio de 60 mm para os círculos de medição. Este tamanho foi julgado adequado por apresentar o valor médio normalizado com uma variação menor de 1% para as 3 formas de geração de modelo e o coeficiente de variação médio entre o valor de cada Círculo e o média dos valores próximo ou menor do que 5%. Os critérios adotados foram similares ao critério proposto por Butlanska et al. (2009) para avaliação de homogeneidade da amostra.

4.3.2 Avaliação dos diferentes modelos

Os diferentes modelos utilizados nas simulações com estacas foram avaliados de duas formas distintas, onde primeiramente foram avaliadas as condições de homogeneidade e depois o estado de tensão inicial de cada modelo. Para ambas as análises foi considerado o raio de 60 mm para os Círculos de Medição determinado no subitem anterior.

A Figura 4.23, a seguir, mostra a distribuição dos CM de 60mm de raio, no modelo de referência, com largura de 1,575m e profundidade de 1,45m. Para se obter esta distribuição foi determinada com uma superposição de 60mm (1 raio) entre um círculo de medição e seu vizinho, de forma a cobrir toda a amostra e ter uma malha de pontos densa o suficiente para verificar a variação dos parâmetros medidos.

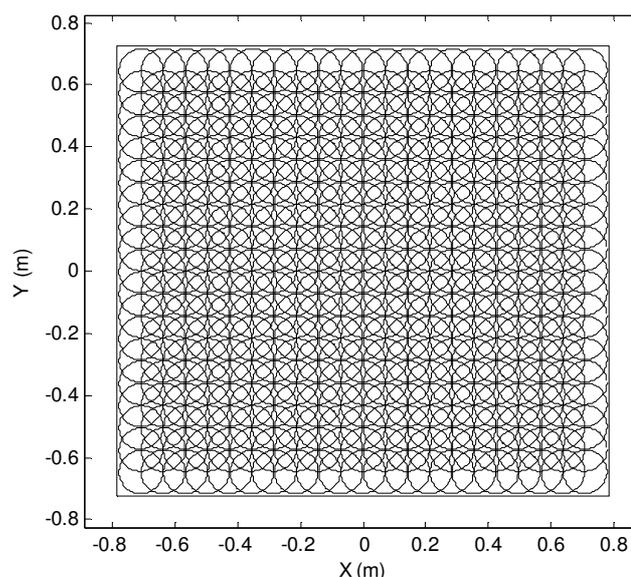


Figura 4.23 – Distribuição dos Círculos de medição para avaliação dos modelos

As condições de homogeneidade foram avaliadas somente para as três formas de geração apresentadas, baseado no fato de que os demais modelos considerados se utilizaram da mesma forma de geração do Modelo 03 e, portanto apresenta a mesma condição de homogeneidade.

As variações dos valores normalizados de porosidade, raio médio e número de coordenação, e seus respectivos coeficientes de variação, apresentados no subitem 4.3.1, já demonstram uma condição de homogeneidade dos modelos, mas para complementar o estudo, foi avaliada também a distribuição da porosidade normalizada nos modelos, assim como o gráfico polar de orientação de contatos.

A Figura 4.24 à Figura 4.26 mostram os valores e distribuição da porosidade normalizada pela porosidade média, assim como a orientação de contato, para cada geração de modelo considerada.

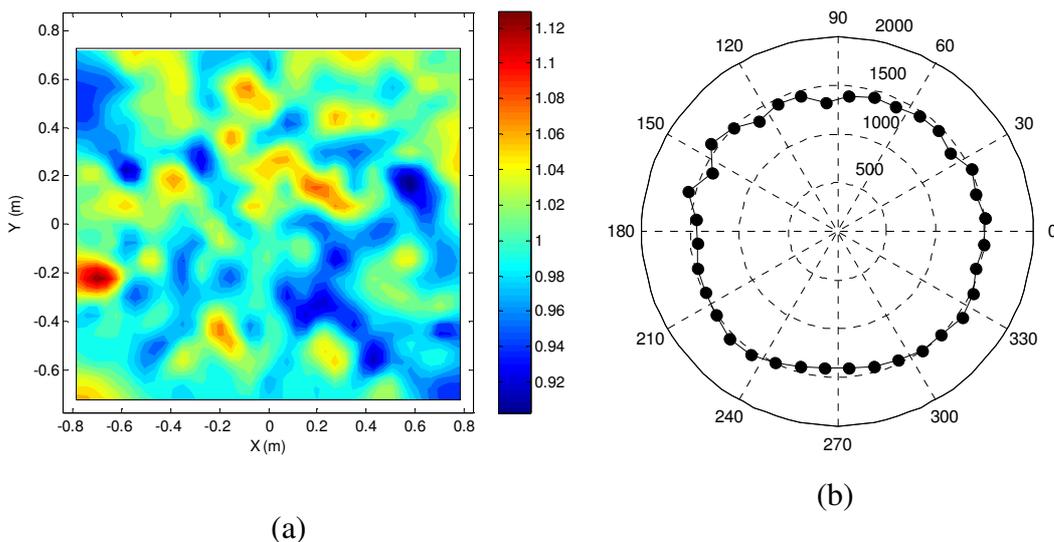


Figura 4.24 – (a) Distribuição da porosidade normalizada e (b) orientação de contatos do Modelo 01

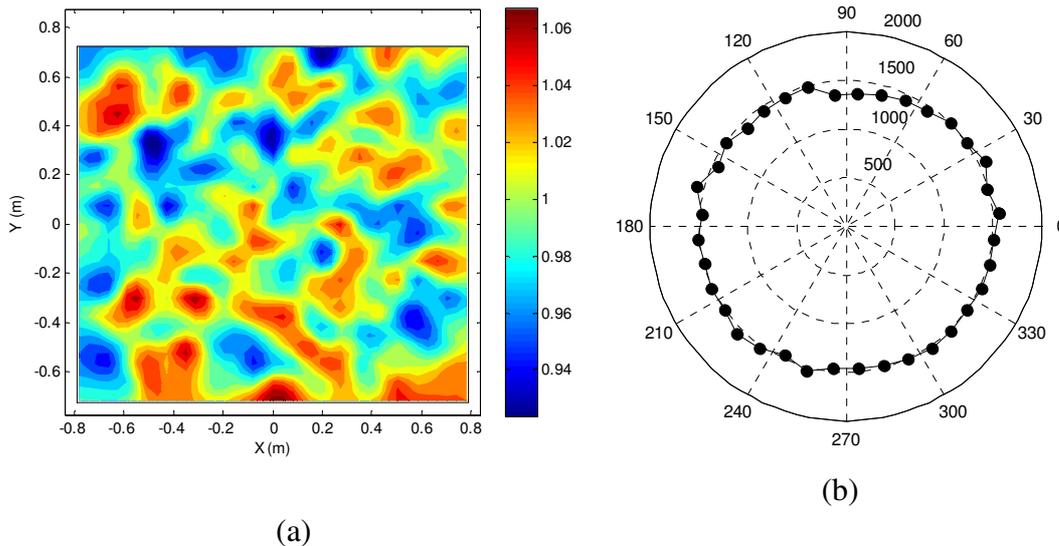


Figura 4.25 – (a) Distribuição da porosidade normalizada e (b) orientação de contatos do Modelo 02

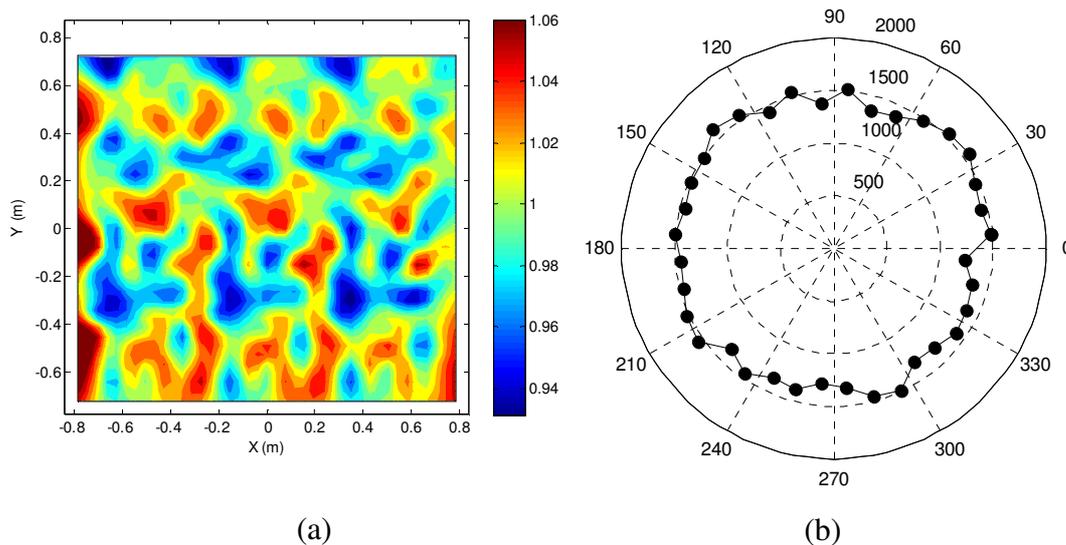


Figura 4.26 – (a) Distribuição da porosidade normalizada e (b) orientação de contatos do Modelo 03

Apesar dos modelos terem sido criados para corresponder à porosidade calibrada, houve uma pequena variação deste parâmetro entre eles, devido ao próprio processo de geração. A Tabela 4.9 abaixo apresenta a porosidade média de cada forma de geração de modelo utilizado no presente trabalho, sendo que a porosidade média final foi determinada pela média entre todos os círculos de medição do modelo.

Tabela 4.9 - Porosidade média de cada modelo

Modelo	Porosidade (%)
Modelo 01	16,07
Modelo 02	16,15
Modelo 03	16,01

O Modelo 03 apresentou o valor de porosidade média um pouco inferior aos outros dois e também à porosidade calibrada, esse modelo diminuiu as heterogeneidades próximas as paredes nas amostras utilizadas na calibração a partir da superposição entre 2 amostras, imposta na geração do modelo, obtendo uma porosidade média final levemente inferior a porosidade calibrada. Nos outros modelos que se utilizaram da mesma forma de geração do Modelo 03, foi verificada a mesma porosidade média.

Diferentemente das condições de homogeneidade o estado de tensões foi avaliado, também, para os demais modelos utilizados. Para esta análise foram considerados os perfis de tensão vertical e horizontal e coeficiente de empuxo no repouso (K_0), sendo estes parâmetros determinados por dois fatores, o arranjo e porosidade e pela densidade de cada partícula.

A densidade das partículas do modelo foi determinada de forma a se aproximar da densidade do solo obtida no trabalho experimental ($\rho = 1.631,0 \text{ kg/m}^3$). Para tal foi utilizada a porosidade média dos modelos, apresentadas na Tabela 4.9, de acordo com a equação abaixo.

$$\rho_p = \rho / (1 - n)$$

Onde:

n – Porosidade média do modelo

ρ_p – Densidade das partículas

ρ – Densidade do solo

A Figura 4.27 apresenta as tensões verticais, horizontais e K_0 , após a aplicação da gravidade, em todos os modelos considerados nas simulações de instalação da estaca.

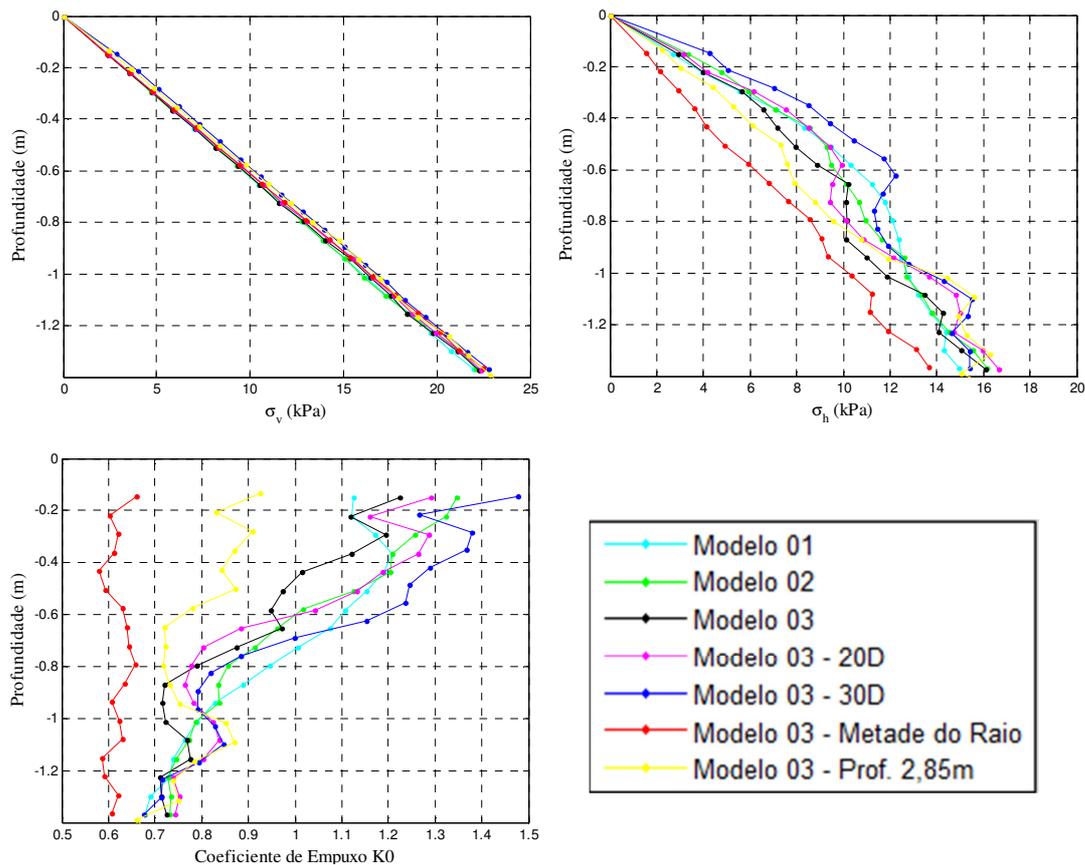


Figura 4.27 - Variações de Tensões e Coeficiente de Empuxo nos modelos

Note que as curvas apresentadas na Figura 4.27 foram obtidas a partir da média das tensões horizontais e verticais dos círculos de medição ao longo do eixo horizontal, para cada profundidade medida, da mesma forma que foi apresentado por Jiang; Yu e Harris (2006).

Observando o resultado da análise das tensões iniciais, pode-se perceber que o perfil da tensão vertical foi a mesma para todos os modelos, enquanto que a tensão horizontal, e conseqüentemente o K_0 , apresentou uma maior variação, em especial para o modelo com partículas menores. Para os outros modelos o perfil de tensão horizontal apresentou variações bem menores, mas ainda sim, maiores do que a variação da tensão vertical.

A primeira suspeita dessa diferença foi pelo tamanho do círculo de medição escolhido. Por este ter sido o mesmo em todos os modelos, o modelo com raio menor apresentou mais partículas em cada círculo e, portanto uma confiabilidade maior nos parâmetros medidos. Para verificar essa possibilidade, foi realizada a mesma análise, mas somente entre o Modelo 03 e o modelo com partículas menores, variando o tamanho do círculo, conforme apresentado na Figura 4.28.

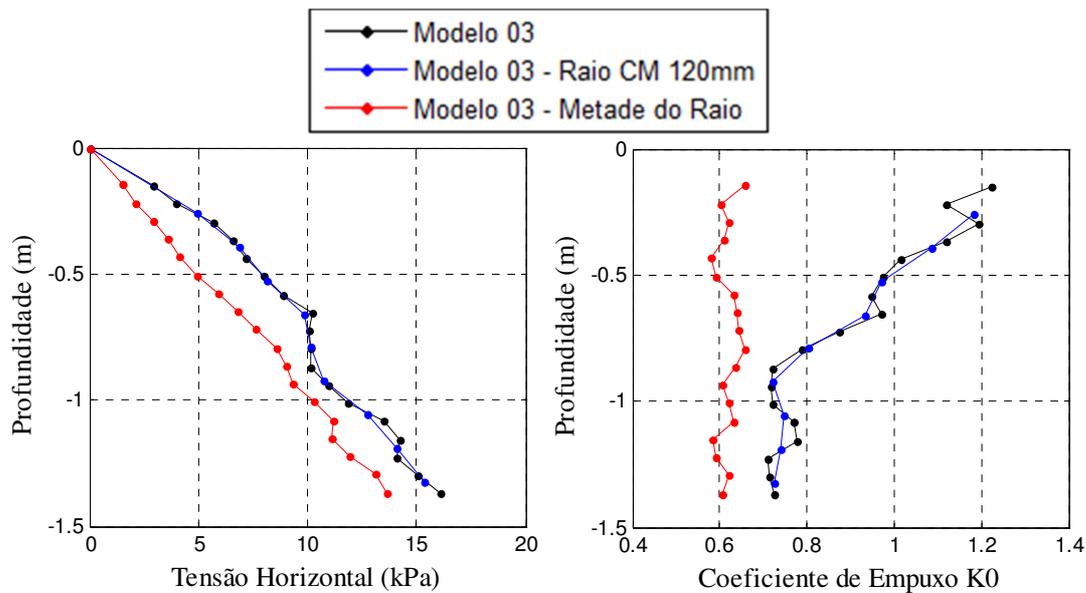


Figura 4.28 – Verificação do tamanho do CM nas tensões e coeficiente de empuxo dos modelos

Como pode-se observar na Figura acima, a variação observada não estava relacionada com o tamanho escolhido para os círculos de medição, o que corroborou com a escolha do raio realizada no subitem 4.3.1 .

Uma análise realizada *a posteriori* verificou que houve uma falha na metodologia de geração deste modelo. Como a geração do modelo com partículas menores foi realizada um pouco diferente dos outros, i.e. ao invés de se considerar a amostra utilizada para a calibração como referência, foi utilizado o próprio Modelo 03 reduzido e transladado, não foi obtido um estado de tensões de 10 kPa, antes da aplicação da gravidade. Isto ocorreu, pois a superposição entre as amostras "copiadas" do Modelo 03 não foi suficiente para gerar este estado de tensões quando foi gerado o modelo final. A tensão resultante nessa etapa, verificada posteriormente, foi igual a zero, o que significa que as partículas não estavam em contato quando foi aplicada a gravidade, apesar de bastante próximas. Este fato pode ter sido responsável pela diferença observada na tensão horizontal, e também por uma pequena diferença na orientação dos contatos, como pode ser observado na Figura 4.29, a seguir.

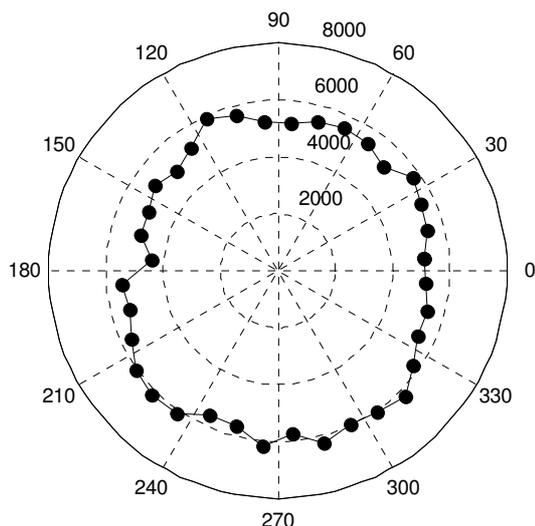


Figura 4.29 - Orientação dos contatos do Modelo 03 com partículas menores

4.3.3 Considerações gerais

O processo de geração dos modelos utilizados nas simulações com estaca, discutido neste Item, apresenta as 3 formas de geração de amostra estudadas neste trabalho, assim como outros modelos que foram considerados, variando as dimensões e tamanho das partículas. As informações de porosidade e tensões dos modelos foram obtidos a partir dos Círculos de Medição, dos quais foi estudado o tamanho mínimo necessário para reproduzir um volume ou área elementar representativa, ou o *Tamanho Ótimo* como define Butlanska et al. (2009), chegando ao valor de 60mm de raio, (confirmado também pelo resultado da Figura 4.28) e à distribuição dos CM nos modelos conforme Figura 4.23.

O estudo de homogeneidade dos modelos foi realizado pela variação dos valores de porosidade, número de coordenação e raio médio das partículas, da distribuição da porosidade normalizada dentro dos modelos e da orientação dos contatos. Os resultados mostraram que os três métodos de geração utilizados apresentaram condições de homogeneidade bastante razoáveis com variações pequenas dos parâmetros analisados e uma orientação isotrópica dos contatos entre as partículas.

O estado de tensões foi avaliado através dos perfis das tensões verticais, horizontais e do coeficiente de empuxo no repouso, K_0 em cada um dos modelos gerados pelos três métodos considerados.

As análises mostraram que o valor determinado para a densidade das partículas foi bastante adequado para o presente trabalho, apresentando uma variação negligenciável do perfil de tensão vertical entre os modelos. As pequenas variações observadas no arranjo dos modelos, no entanto, resultaram em maiores variações do perfil de tensão horizontal e conseqüentemente do perfil de K_0 , mas ainda assim, com comportamentos parecidos. Desta forma se demonstrou que o método utilizado em quase todos os modelos, no qual foi aplicada uma tensão inicial isotrópica de 10kPa, antes da aplicação da gravidade, produz arranjos razoavelmente similares de partículas.

O modelo com partículas de raios reduzidos apresentou um perfil de tensão horizontal bastante diferente dos demais modelos, o que foi constatado através de uma análise *a posteriori* que, antes da aplicação da gravidade, as partículas estavam virtualmente em contato, mas sem uma superposição capaz de gerar um estado de tensão no modelo. Desta forma foi obtido um perfil de K_0 quase constante com a profundidade e uma pequena tendência de orientação de contatos, como pode se observar na Figura 4.27 e Figura 4.29, respectivamente.

4.4

Análise da instalação da estaca

As análises realizadas neste item têm como objetivo apresentar os resultados obtidos com o processo de instalação de estaca, assim como os efeitos que este apresentou nos diferentes modelos considerados.

Para a simulação do ensaio de prova de carga na profundidade de 700mm é necessária a instalação da estaca nesta profundidade. Este processo foi contemplado no presente trabalho de duas formas distintas:

- A cravação da estaca com velocidade constante, de forma a representar, de modo simplificado, o processo de cravação do modelo físico de referência, e;
- A criação da estaca diretamente na profundidade do ensaio, com o objetivo de simular o comportamento de uma estaca escavada, retirando as partículas que ocupariam o mesmo volume da estaca.

A estaca considerada para as simulações deste Item foi modelada a partir de 4 paredes no PFC2D, constituindo uma estaca completamente rígida. A rigidez normal e cisalhante de contato e o coeficiente de atrito foram definidos a partir da razão entre estes parâmetros e os parâmetros de contato determinados para as partículas. As dimensões e parâmetros da estaca encontram-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Resumo das propriedades da estaca rígida

Altura	3,5 m
Diâmetro	75 mm
Razão de rigidez normal	1,1
Razão de rigidez cisalhante	1,1
Razão de atrito	1 e 0

A distribuição dos círculos de medição foi modificada na simulação dos processos de instalação para que não houvesse a interseção da área dos círculos com a estaca. Esta área seria considerada como espaço vazio para os cálculos dos parâmetros obtidos a partir dos CM, pois não possui partículas, resultando em erros de medição, como por exemplo, o aumento do valor de porosidade medido.

A Figura 4.30 apresenta as distribuições dos círculos de medição para o início e final da instalação da estaca nas dimensões do modelo de referência.

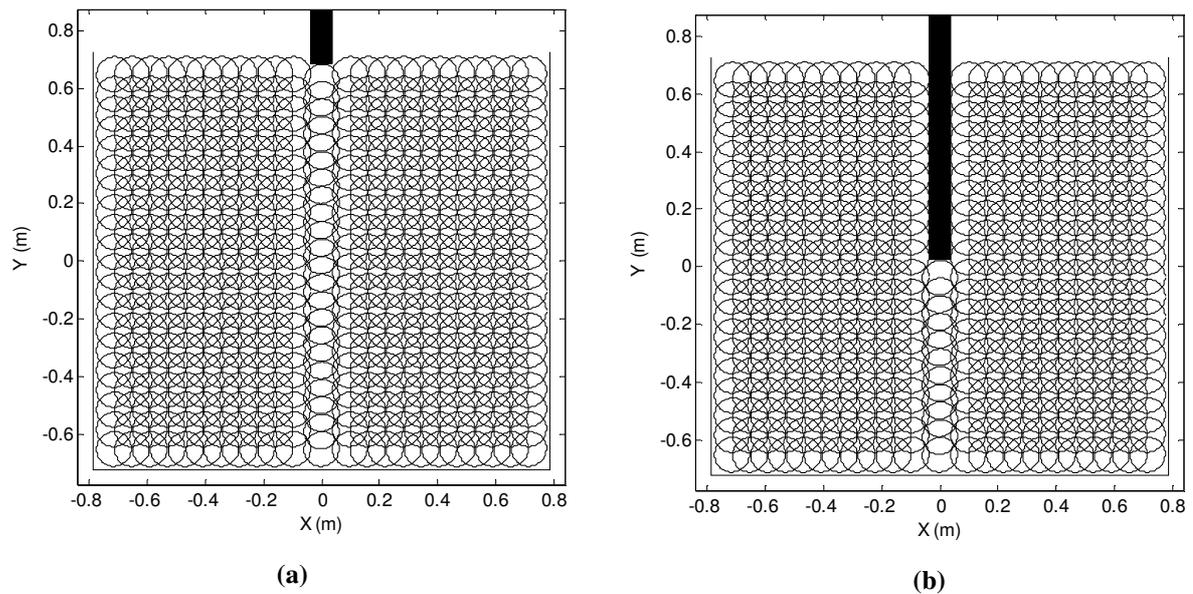


Figura 4.30 – Distribuição dos Círculos de Medição para (a) início da instalação da estaca e (b) profundidade de 700 mm

A Figura 4.30(a) é válida apenas para as estacas cravadas. As estacas escavadas, por já serem geradas na profundidade de realização dos ensaios de prova de carga, só apresentam a distribuição indicada na Figura 4.30(b).

De forma a capturar o comportamento do modelo a diferentes distância da estaca, o domínio foi subdividido em 5 zonas para análise dos resultados dos círculos de medição. Esta divisão foi realizada considerando a homogeneidade dos modelos, conforme apresentado no Item 4.3, existindo, para uma mesma zona, valores medidos nos lados esquerdo e direito, como apresentado na Figura 4.31.

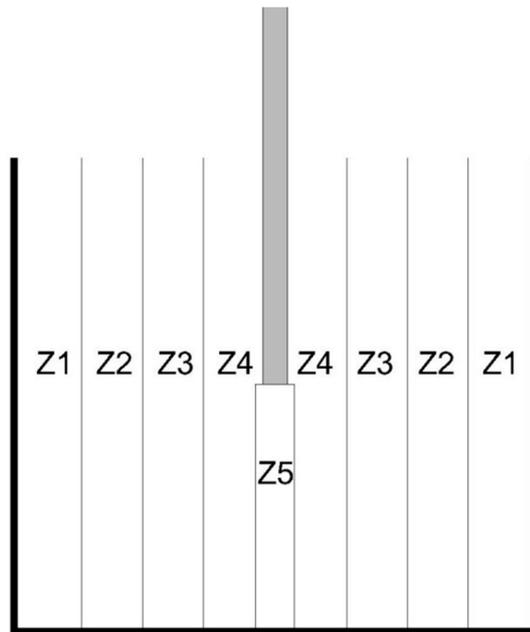


Figura 4.31 - Divisão do domínio para análise

Após o processo de instalação e o equilíbrio estático do modelo, as paredes da estaca permaneceram no mesmo local com velocidade zero, não ocorrendo necessariamente um equilíbrio de forças entre o peso da estaca e a reação do solo, composta pela ponta e pelo atrito lateral. Esse fator ocasionou, em geral, forças de reação do solo maiores do que o peso para a instalação a partir da cravação da estaca e menores para a instalação simulando o processo da estaca escavada.

Para que as simulações de prova de carga se iniciem em condições mais próximas da realidade, foi realizado um procedimento para simular o equilíbrio de forças entre o peso da estaca e a reação do solo após a instalação. Este processo implicou em uma forma de descarregamento para as estacas cravadas, aplicando-se uma velocidade vertical ascendente nas mesmas, até que o equilíbrio fosse atingido, e para as estacas escavadas, na maioria das vezes, resultou na aplicação de uma velocidade vertical descendente.

4.4.1 Análise dos resultados da cravação

O processo de cravação com velocidade constante se deu pela aplicação de uma velocidade vertical descendente a todas as paredes da estaca. A estaca foi criada pouco acima do modelo e o deslocamento vertical (recalque) começou a ser medido a partir do primeiro contato da ponta da estaca com as partículas.

Com o objetivo de investigar a resposta do modelo e sua influência nos resultados da simulação de prova de carga, foram considerados 7 diferentes fatores no processo de cravação:

- 1) Rotação das partículas
- 2) Velocidade de cravação
- 3) Distância entre as paredes da estaca e a borda do modelo
- 4) Métodos de geração da amostra
- 5) Número de partículas
- 6) Atrito entre a estaca e as partículas
- 7) Distância entre o fundo da estaca e o fundo do modelo

Para avaliação do fator de atrito entre estaca e partícula foram consideradas apenas duas condições, *Perfeitamente Lisa* e *Perfeitamente Rugosa*. A condição perfeitamente lisa foi considerada para um coeficiente de atrito nulo, enquanto na condição perfeitamente rugosa foi utilizado o mesmo coeficiente de atrito considerado entre as partículas.

A Tabela 4.11 resume as condições dos ensaios de instalação realizados para a estaca com velocidade constante. Com o objetivo de comparar os comportamentos dos diferentes fatores, isoladamente, foi definido um ensaio de referência, destacado na tabela a seguir. As condições de velocidade, atrito, método de geração, dimensões e quantidade de partículas deste ensaio serão utilizadas como referência nas análises que se seguem.

Tabela 4.11 – Resumo das condições de instalação com velocidade constante analisadas

Modelo	Velocidade (cm/s)	Razão de atrito	B/d₅₀
Modelo 1	10	1,0	7,2
Modelo 2	10	1,0	7,2
Modelo 3 (*)	10	1,0	7,2
Modelo 3	5	1,0	7,2
Modelo 3	2	1,0	7,2
Modelo 3	10	0,0	7,2
Modelo 3 – Borda 20D	10	1,0	7,2
Modelo 3 – Borda 30D	10	1,0	7,2
Modelo 3 – Altura 2,85m	10	1,0	7,2
Modelo 3 – Metade do Raio	10	1,0	14,4

(*) *Condição de ensaio considerada como referência*

Resultados experimentais importantes (Bolton et al., 1999; Gui e Bolton, 1998; Phillips e Valsangkar, 1987) apresentam acréscimos de resistência de ponta com a diminuição da razão entre a largura do penetrômetro (B) e o diâmetro, d_{50} , dos grãos, indicando que para valores menores do que 20 existiriam diferenças de resistência consideráveis. Bolton et al. (1999) também obteve resultados indicando que para areias grossas essa razão poderia reduzir pelo menos até 10, sem apresentar variabilidade dos resultados. A influência da variação desta razão nos resultados será avaliada no presente trabalho pela utilização de um modelo com partículas menores, conforme apresentado na Tabela anterior. Apesar dos valores 7,2 e 14,4 serem ainda abaixo do valor de 20, recomendado, se compararmos com as razões apresentadas na Tabela 2.1, pode-se perceber que estes valores estão razoavelmente de acordo com trabalhos anteriores de cravação em elementos discretos.

Como será demonstrado nos próximos itens a condição de inibição da rotação das partículas gera grandes influências no modelo e, portanto, apesar da calibração da amostra ter sido realizada para esta condição, o ensaio de referência e os demais fatores analisados foram simulados permitindo a rotação das partículas.

Conforme apontado no item 2.1, as curvas de resistência à penetração, obtidas pela cravação de um penetrômetro com velocidade constante, são usualmente utilizadas para relacionar com a capacidade de carga estática de uma estaca. Considerando este fato, foram também avaliadas as curvas de resistência de ponta e atrito lateral, obtidas na simulação da instalação da estaca.

4.4.1.1

Resultados do ensaio de referência

Conforme explicado anteriormente, foi escolhido um ensaio de referência para que fosse possível a comparação das diferentes condições analisadas. Este ensaio consiste no processo de instalação da estaca com velocidade constante de 10 cm/s, utilizando a forma de geração do Modelo 03, apresentada no Item 4.3 com a rotação das partículas permitida. As dimensões do ensaio são 1,45m de altura e 1,575m de largura.

Este Subitem busca, portanto apresentar os resultados do comportamento do modelo neste ensaio para posterior comparação com as outras condições analisadas.

A instalação da estaca do ensaio de referência foi primeiramente avaliada em 4 diferentes cenários, que são: curvas de resistência a penetração de ponta e de fuste; variações de tensão nas bordas e fundo do modelo; variação de porosidade dentro do modelo e deslocamentos verticais e horizontais das partículas.

A Figura 4.32, a seguir, apresenta a curva de resistência de ponta obtida pela instalação da estaca neste ensaio

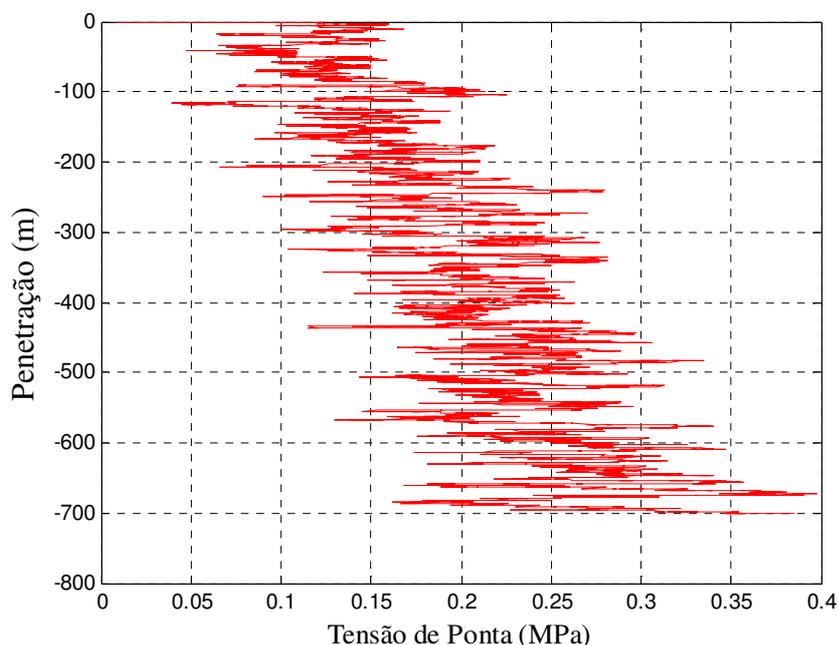


Figura 4.32 - Curva de resistência de ponta do ensaio de referência

. O formato da curva apresentada está de acordo com ensaios experimentais de penetração de CPT, mostrando o aumento da resistência de ponta com a profundidade e oscilações da resposta (e.g. Bolton et al., 1999; Bolton e Gui, 1993; Jamiolkowski, Lo Presti e Manassero, 2003 entre outros), assim como com as simulações com elementos discretos, apresentados por Arroyo et al., 2011, Huang e Ma, 1994, Jiang, Harris e Zhu, 2006, Mcdowell, Falagush e Yu, 2012.

A Figura 4.33 a seguir apresenta a resistência de fuste com a profundidade de cravação. Considerando o tamanho de partículas utilizado no presente trabalho, não foi possível obter valores confiáveis de atrito lateral em um ponto, ou uma faixa pequena, logo decidiu-se utilizar a resistência total do fuste em contato com as partículas do modelo.

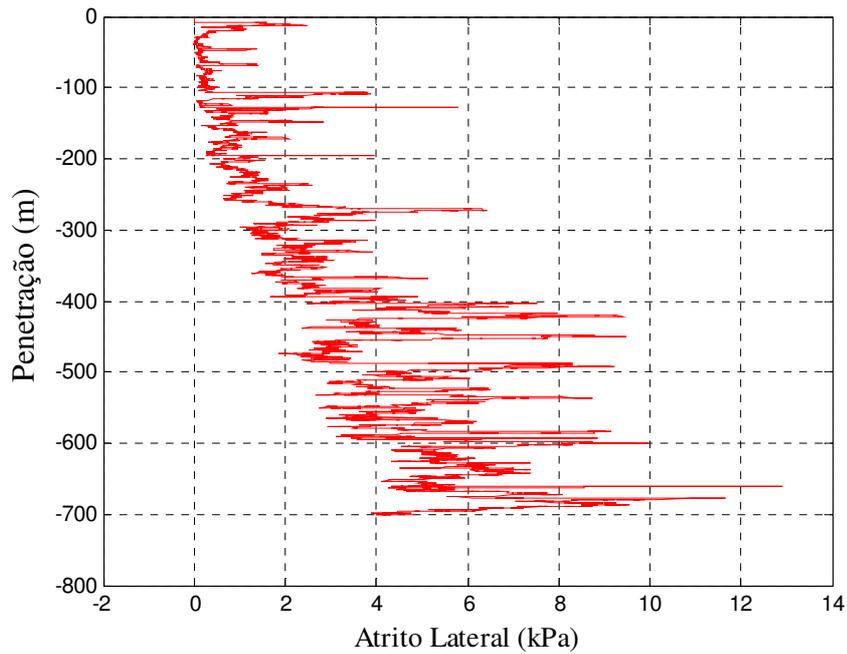


Figura 4.33 - Curva de resistência de fuste do ensaio de referência

A Figura 4.34 apresenta a variação de tensão horizontal encontrada nas bordas do modelo de referência, após a instalação. Foi considerada a homogeneidade dos modelos e a simetria do processo de cravação para a apresentação desses resultados (similar à divisão do modelo em zonas). Sendo o perfil de tensão horizontal na borda, determinado a partir da média dos valores de tensão nas paredes esquerda e direita.

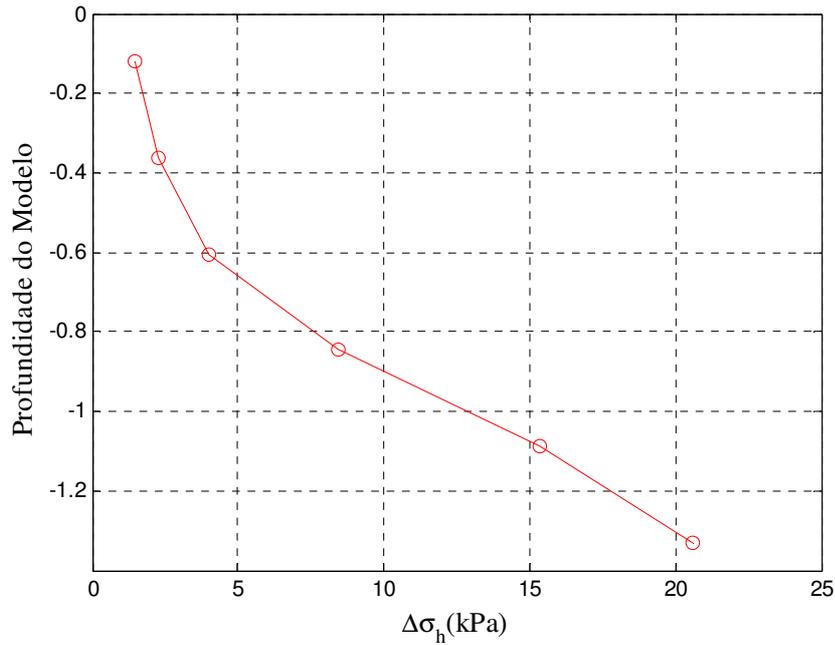


Figura 4.34 - Variação da tensão horizontal nas bordas do ensaio de referência

A Figura 4.34 acima apresenta um aumento considerável na tensão horizontal nas paredes do modelo, após a instalação, indicando a influência das bordas no processo de cravação.

A Figura 4.35, a seguir, apresenta a variação da tensão vertical no fundo do modelo, obtida após o fim da instalação.

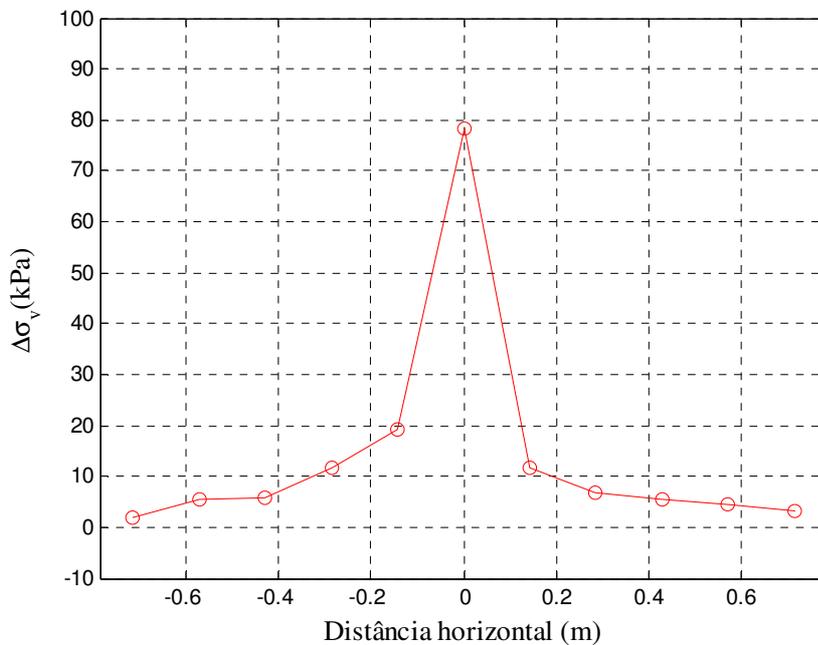


Figura 4.35 - Variação da tensão vertical no fundo do modelo do ensaio de referência

A porosidade no modelo após a instalação da estaca foi avaliada em duas instâncias, apresentadas nas figuras a seguir. A

Figura 4.36 apresenta a distribuição da diferença entre a porosidade inicial do modelo e os valores obtidos após a instalação, pela interpolação dos dados de porosidade obtidos pelos Círculos de Medição, para o modelo inteiro, enquanto a Figura 4.37 apresenta a porosidade normalizada pela porosidade inicial do modelo da zona 4 (apresentada na Figura 4.31), de forma a avaliar a influência da cravação nesse parâmetro, próximo da estaca.

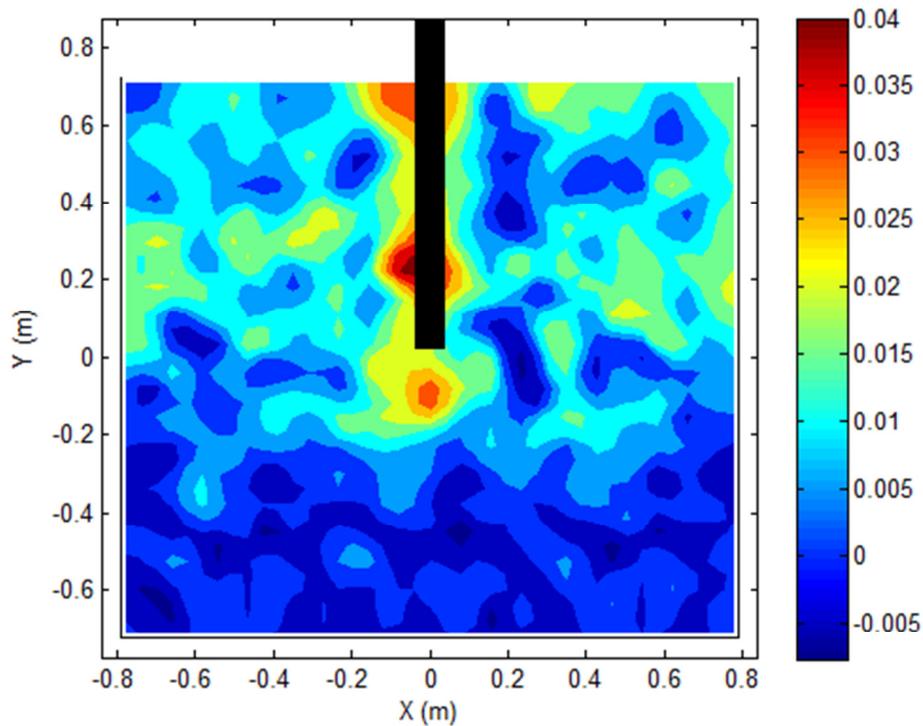


Figura 4.36 – Distribuição de porosidade no modelo após a instalação

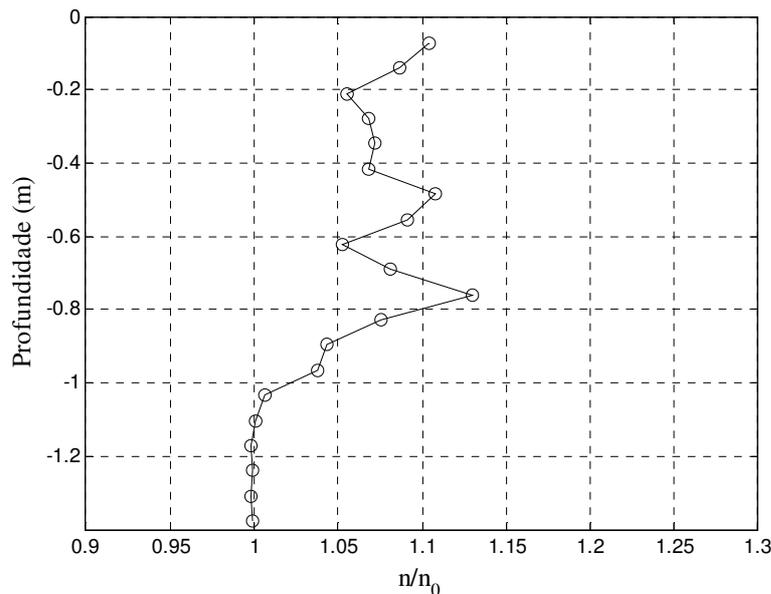


Figura 4.37 - Razão da porosidade na zona 4 do modelo de referência

As Figuras anteriores mostram que o modelo experimentou, quase em sua totalidade, o aumento da porosidade e conseqüentemente a expansão do material. Diversos pesquisadores citam a influência da cravação em areia como processo de compactação do solo nos entornos da estaca (e.g. Bernardes, 1989; Velloso e Lopes, 2010; Décourt, 1998), em especial para areias fofas a medianamente compactas. Com o deslocamento das partículas, ocasionado pela inserção do penetrômetro, ocorre o cisalhamento da amostra, que pode ocasionar aumento de volume em amostras compactas, conforme discutido por Salgado, Mitchell e Jamiolkowski (1997). Quanto maior é a compacidade relativa do material e menor o estado de tensão inicial maior será o efeito da dilatância. Esse processo pode ter sido intensificado pelas restrições de movimento advindas do aspecto 2D do modelo. Simulações do processo de penetração no DEM apontam tanto a compactação do material nos arredores da estaca (Li e Li, 2014; Zhou et al., 2012) quanto à dilatância do mesmo (Schmitt e Karzenbach, 2006; Tran, Chevalier e Breul, 2013), mas sem menção sobre a compacidade inicial das amostras, antes da cravação.

O deslocamento das partículas do modelo está apresentado na Figura 4.38 (deslocamento horizontal) e na Figura 4.39 (deslocamento vertical) a seguir. A escala de cor de cada uma das figuras apresenta os valores de deslocamento em metros.

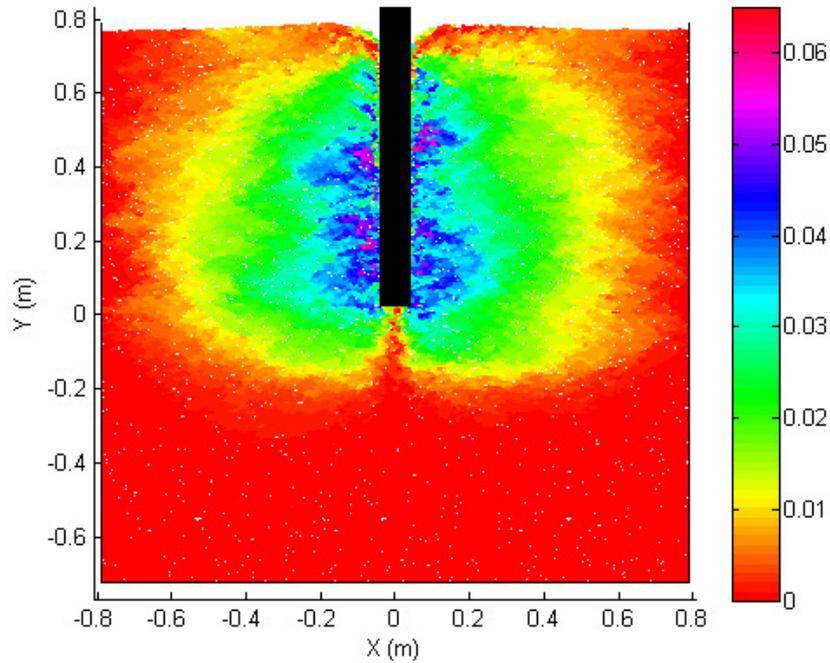


Figura 4.38 - Deslocamento horizontal das partículas no ensaio de referência

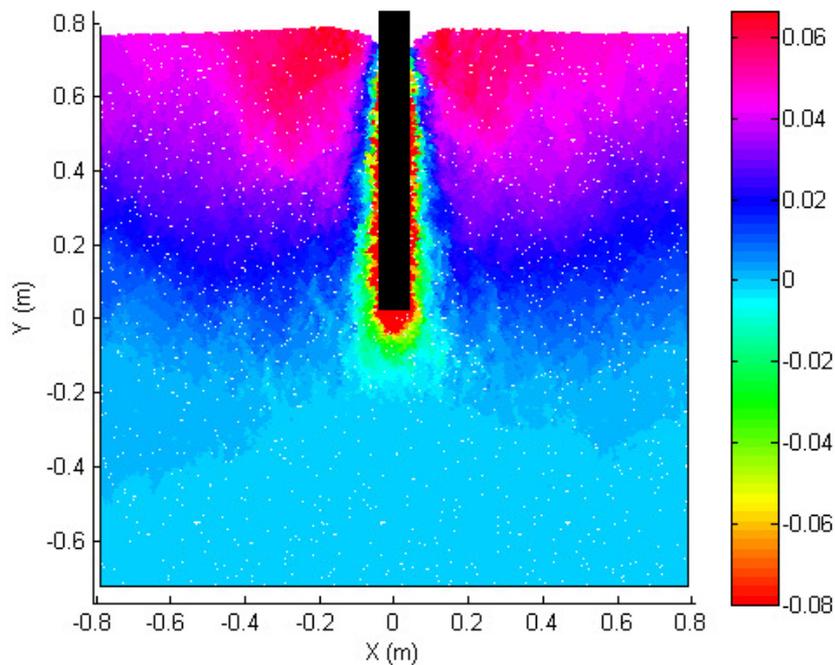


Figura 4.39 - Deslocamento vertical das partículas no ensaio de referência

Pelo que pode ser observado a partir dos deslocamentos das partículas apresentados nas figuras acima, o processo de cravação neste modelo foi marcado por um deslocamento horizontal para fora da estaca e deslocamentos verticais descendentes próximos e abaixo da estaca enquanto áreas um pouco mais distantes sofriam deslocamentos verticais ascendentes.

Para investigar o efeito do levantamento das partículas no modelo, foi escolhido um critério binário de cor, apresentado na Figura 4.40, no qual as partículas preenchidas de preto apresentam deslocamentos verticais ascendentes e as partículas pintadas de branco apresentam deslocamentos verticais descendentes.

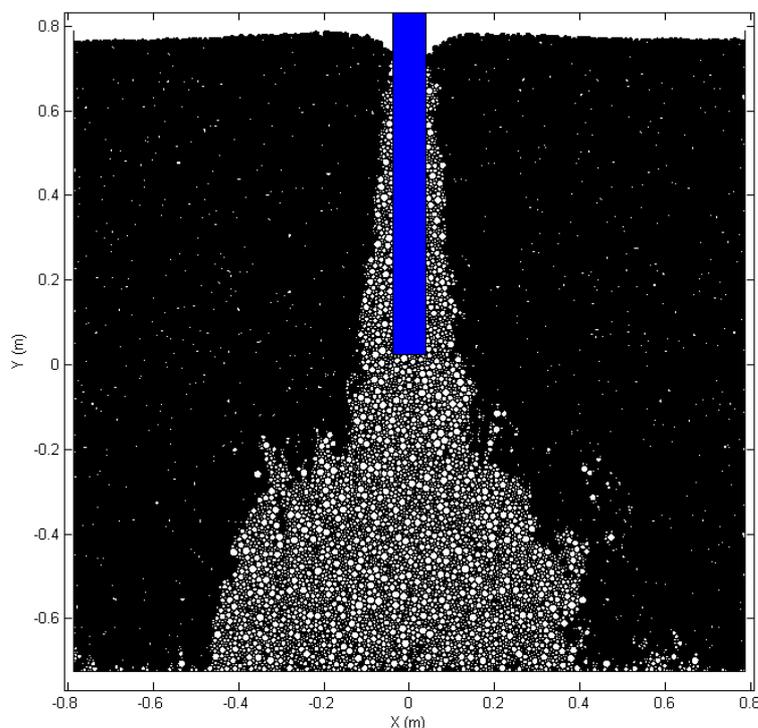


Figura 4.40 - Deslocamento vertical binário das partículas no ensaio de referência

A Figura 4.40 apresenta um comportamento similar ao obtido por Butlanska et al. (2014) para a simulação de cravação com paredes rígidas. A extensão do levantamento de partículas e dos movimentos horizontais e verticais pode ser explicada de maneira similar à variação de porosidade apresentada anteriormente, o qual foi devido, possivelmente, à elevada dilatância da amostra e as restrições de movimento impostas pela condição 2D.

4.4.1.2

Comparação dos diferentes fatores analisados

A avaliação realizada neste subitem foi para comparar os resultados obtidos nas diferentes condições de instalação de estaca com velocidade constante. Devido à grande quantidade de dados obtidos, serão apresentados somente os resultados nos quais foram verificadas diferenças claras em comparação com o ensaio de referência e resultados que contradizem publicações anteriores.

Primeiramente, o efeito da rotação foi avaliado de forma similar ao realizado por outros autores (e.g. Butlanska et al., 2014; McDowell, Falagush e Yu, 2012), na qual foram utilizados os mesmos parâmetros do modelo de contato calibrado inibindo a rotação das partículas. Como explicado no item 2.2.5, é de se esperar que a restrição à rotação aumente a resistência do material, especialmente para o mesmo arranjo de partículas e mesmos parâmetros de contato. A Figura 4.41 apresenta as curvas de resistência de ponta obtidas para estas duas condições.

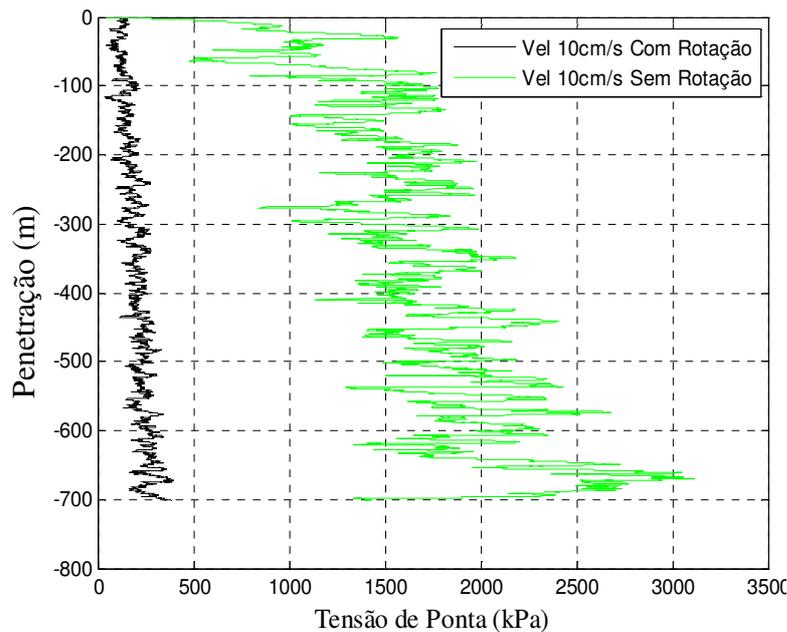


Figura 4.41 - Comparação da resistência de ponta na cravação - Rotação das partículas

A partir da figura acima é possível observar que a inibição da rotação das partículas resultou em um aumento da resistência de ponta por um fator de aproximadamente 10, resultado análogo ao obtido por Butlanska et al. (2014).

Comportamentos parecidos foram obtidos para a resistência de ponta numericamente por McDowell, Falagush e Yu (2012) e experimentalmente por Lehane e Liu (2012), variando a esfericidade dos grãos de areia utilizados.

O comportamento obtido pelas simulações para a resistência total de fuste, no entanto, apresenta valores de resistência parecidos, conforme exibido na Figura 4.42.

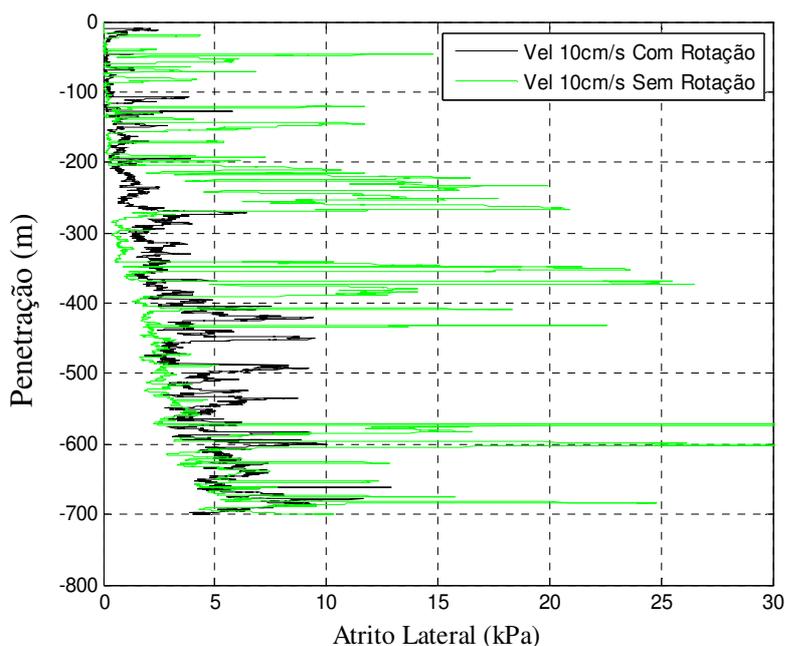


Figura 4.42 - Comparação do atrito lateral na cravação - Rotação das partículas

Conforme pode ser observado, o atrito lateral total das estacas apresenta valores bem parecidos, apesar do aumento da resistência de ponta à penetração verificado.

Os resultados obtidos fornecem indícios de que, embora a condição de inibir a rotação permita a calibração de um modelo de partículas circulares idealizadas, esta condição não tem uma influência direta na resistência do modelo sob algumas solicitações, como o caso do atrito lateral. Conforme exposto por McDowell, Falagush e Yu (2012) inibir a rotação das partículas não gera as mesmas condições cinemáticas do que a utilização de formas não idealizadas, corroborando com os resultados de Zhou et al. (2013), avaliados para os campos de deformações.

Fora a resistência à cravação, a rotação das partículas apresentou influências também no nível de tensões do modelo e na porosidade, como pode ser observado na Figura 4.43 e Figura 4.44, respectivamente.

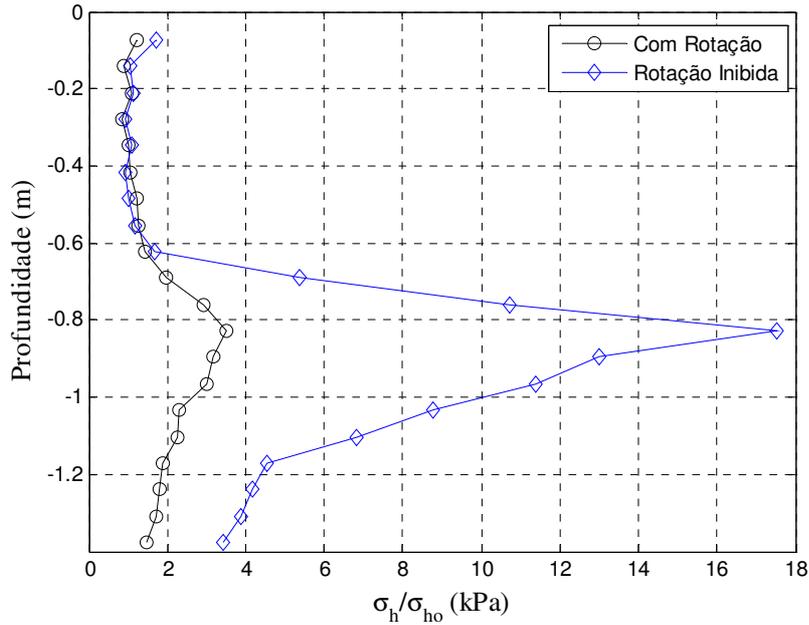


Figura 4.43 - Comparação da variação de tensão horizontal na Zona 4 - Rotação das partículas

A alteração do nível de tensão pode ser explicada, pois uma resistência maior, encontrada na amostra contendo partículas com rotação inibida, implica em tensões médias mais altas suportadas pelo sistema para se chegar à ruptura por penetração.

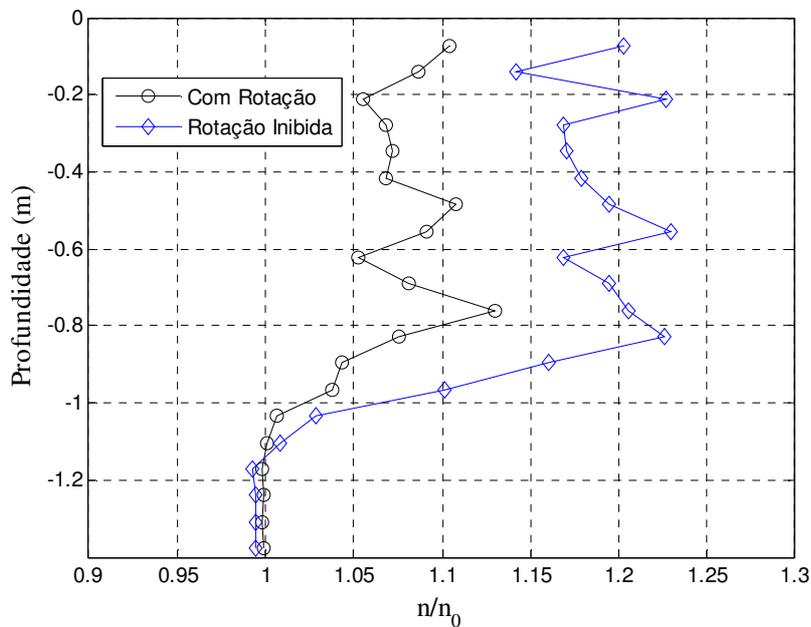


Figura 4.44 - Comparação da variação porosidade na Zona 4 - Rotação das partículas

Pela comparação com a distribuição de porosidade do Modelo 03, obtido no subitem 4.3.2, é possível perceber um aumento de porosidade e consequentemente do volume do material (dilatância) para as duas condições.

A partir das figuras acima é possível perceber uma influência considerável da rotação no estado de tensões e porosidade no final da instalação, corroborando com a decisão, apresentada anteriormente, de permitir a rotação das partículas como base para os modelos utilizados para as simulações de instalação da estaca.

As velocidades consideradas para a avaliação da influência deste fator no modelo foram três, 2cm/s, 5 cm/s e 10 cm/s, sendo esta última utilizada como referência para as demais condições analisadas.

As únicas diferenças observadas pela variação da velocidade de instalação foram a respeito das resistências à cravação. As curvas de resistência de ponta e fuste obtidas para as velocidades consideradas encontram-se na Figura 4.45 e Figura 4.46, respectivamente.

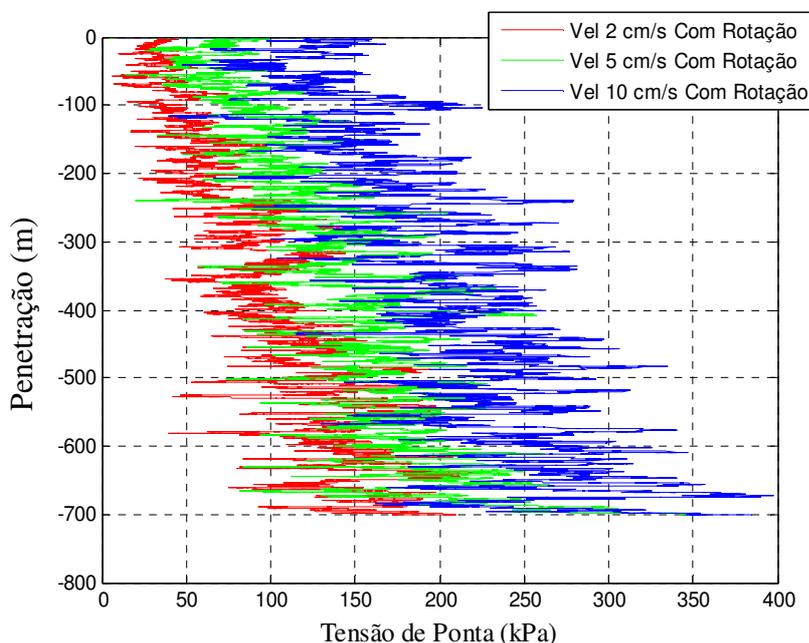


Figura 4.45 - Comparação da resistência de ponta – Velocidade de cravação

Para estas curvas apresentadas se observa uma clara tendência de aumento da tensão de ponta com o aumento da velocidade de cravação, para as velocidades consideradas, apresentando um aumento de 60% da resistência entre as velocidades de 2cm/s e 10 cm/s.

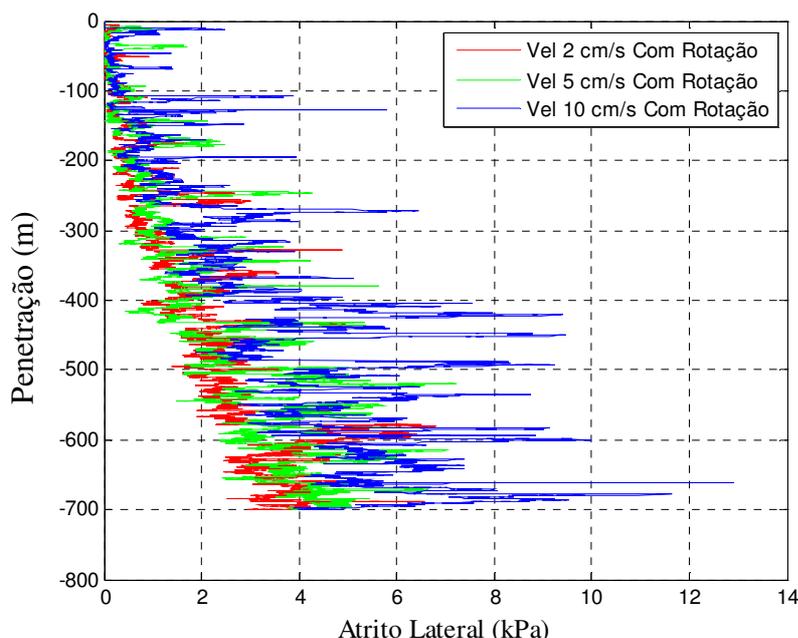


Figura 4.46 - Comparação do atrito lateral – Velocidade de cravação

Pela Figura acima é possível observar um aumento semelhante da resistência lateral entre a menor e a maior velocidade avaliada (aproximadamente 50%).

Esses resultados, apresentando a diferença de resistência à cravação com diferentes velocidades, contrariam os resultados experimentais para solos granulares secos (e.g. Dayal e Allen, 1975, Bolton et al., 1999 e Bolton e Gui, 1993) e as conclusões obtidas numericamente por Arroyo et al. (2011). Velloso e Lopes (2010) discutem que a viscosidade do solo pode resultar na influência da velocidade no ensaio de penetração indicando que altas velocidades de ensaio resultam em resistências maiores e recalques menores concordando com os resultados apresentados. Devido à natureza numérica dos amortecimentos mecânicos de contato, atribuídos no modelo utilizado, os resultados observados na Figura 4.45 e Figura 4.46 seriam uma questão de utilizar e calibrar diferentes amortecimentos de contato para adequar aos resultados experimentais obtidos. Por exemplo, Dayal e Allen (1975) apontam que a viscosidade de areias secas é muito baixa para resultar em mudanças dos valores de resistência na faixa de velocidade ensaiada.

O que pode ser observado nas últimas figuras é que tanto para a resistência de ponta quanto para o atrito lateral, foi verificado o aumento das oscilações dos valores medidos, além do aumento da resistência. Este comportamento poderia ser explicado por efeitos dinâmicos no sistema de partículas, representando o aumento das ondas de compressão geradas pela o aumento da velocidade, o que segundo O'Sullivan (2011), poderia explicar também o aumento das resistências encontradas. Ng (2006) apresenta influências similares para altas velocidades em simulações de ensaios biaxiais.

Como apresentado anteriormente, o atrito entre a estaca e as partículas do modelo, foi avaliado em 2 condições, Perfeitamente Lisa e Perfeitamente Rugosa. De todas os resultados avaliados a única informação relevante foi obtida pela comparação da resistência de ponta, apresentada na Figura 4.47.

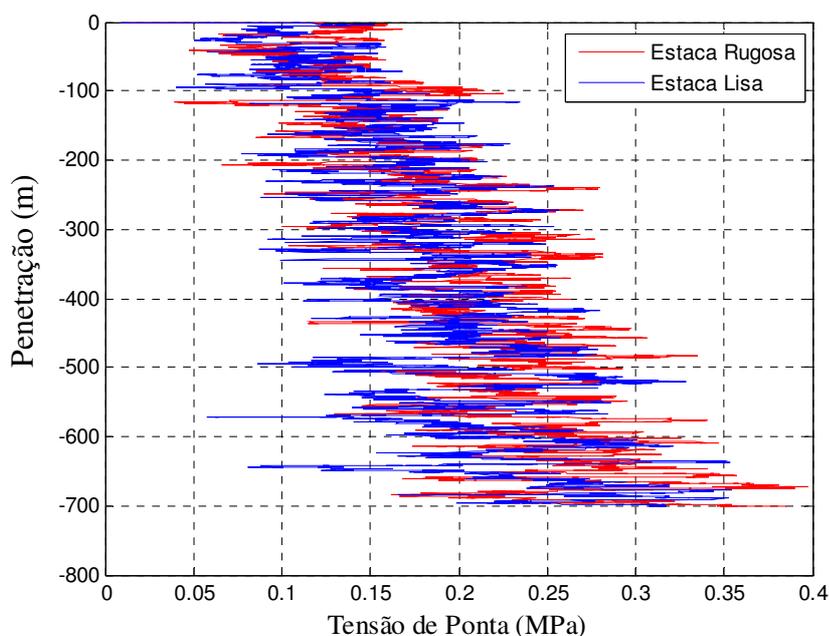


Figura 4.47 - Comparação da resistência de ponta na cravação– Atrito Estaca-Solo

As curvas mostram pouca diferença entre as resistências de ponta analisadas, sendo particularmente difícil a comparação devida às grandes oscilações verificadas.

Os resultados foram diferentes dos obtidos por Jiang, Yu e Harris (2006), onde foi verificada uma resistência de ponta menor para a condição sem atrito. No caso considerado por estes autores a ponta do penetrômetro era angulada com inclinação de 60° .

Devido a esta diferença de geometria, possivelmente o atrito entre a parede da ponta e as partículas tenha uma influência maior do que para a ponta reta considerada no presente trabalho. Além deste fator, o nível de tensões utilizado pelos autores foi consideravelmente maior, pois estes utilizaram uma força gravitacional de 100G em suas análises. Portanto, a diferença da resposta observada pode ter ocorrido por conta de um desses dois fatores citados ou pela combinação entre eles.

O efeito da quantidade de partícula e, conseqüentemente do tamanho e da relação entre o diâmetro da estaca e o diâmetro d_{50} das partículas (B/d_{50}), também foi avaliado, conforme descrito no Item 4.3. Para esta avaliação foi utilizado um modelo com quatro vezes mais partículas, a partir da utilização da mesma forma de distribuição de partículas, mas considerando a metade do raio do tamanho de referência, conforme apresentado na Figura 4.15. Novamente, as influências ocasionadas no modelo devido ao acréscimo de partículas não foram diferentes do ensaio de referência, somente a resistência à penetração apresentou resultados relevantes para comparação.

A Figura 4.48 apresenta as curvas de resistência de ponta obtidas para diferentes tamanhos e quantidades de partículas.

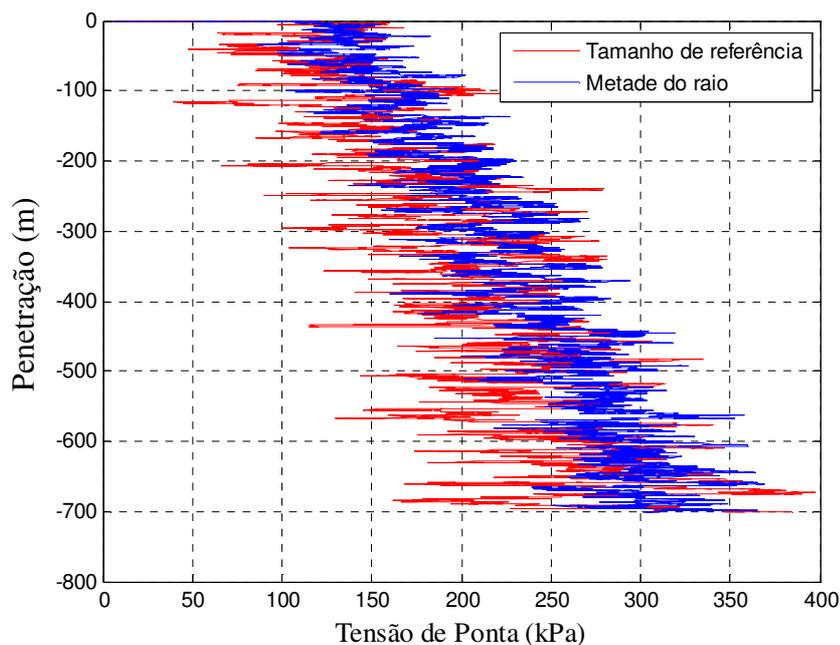


Figura 4.48 - Comparação da resistência de ponta na cravação – Tamanho da partícula

Pela análise dos resultados obtidos é possível perceber, como primeira conclusão, que as oscilações observadas no modelo com mais partículas é menor do que as oscilações de resposta do modelo de referência. Essa constatação foi observada também por McDowell, Falagush e Yu (2012), diminuindo o diâmetro das partículas de seu modelo, e por Arroyo et al. (2011) aumentando o tamanho do penetrômetro e por consequência a relação B/d_{50} . Além disso, pode ser verificado visualmente um pequeno aumento do valor médio de resistência pela profundidade, também em concordância com os resultados obtidos por McDowell, Falagush e Yu (2012).

O resultado do atrito lateral para os dois modelos encontra-se na Figura 4.49, a seguir.

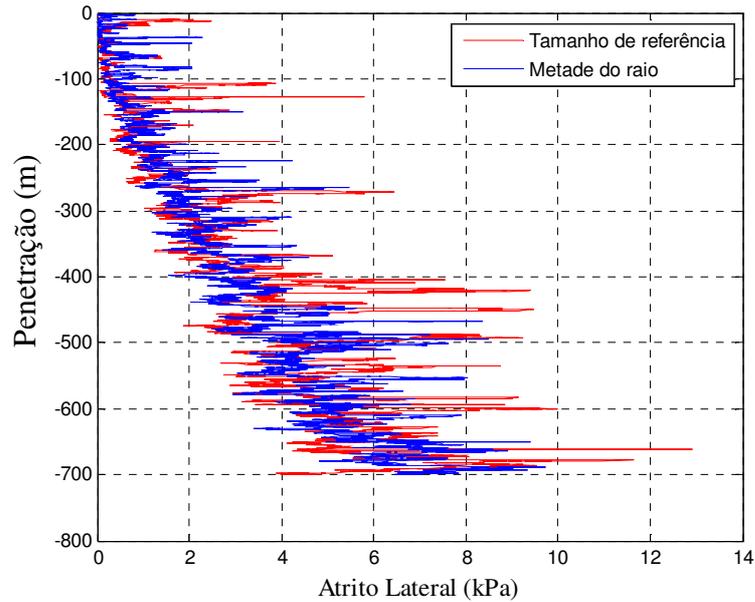


Figura 4.49 - Comparação do atrito lateral na cravação – Tamanho da partícula

Para o atrito lateral apresentado na Figura anterior não foi verificado um aumento de resistência com o aumento de partículas, diferentemente da resistência de ponta, mas foi possível observar uma pequena diminuição da oscilação.

Quanto ao deslocamento das partículas, basicamente todas as condições analisadas apresentaram o mesmo comportamento do ensaio de referência. O modelo com a distância de borda de 30 vezes o diâmetro da estaca foi analisado de forma a avaliar o efeito da largura do modelo no deslocamento das partículas.

A Figura 4.50 apresenta o deslocamento vertical observado após a instalação da estaca.

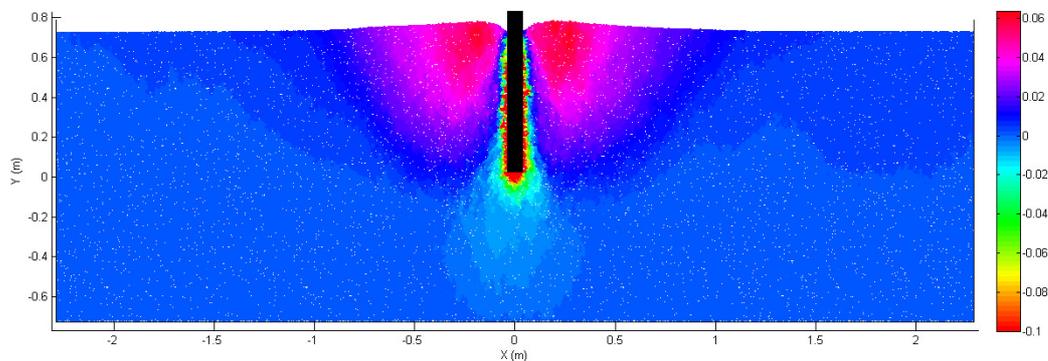


Figura 4.50 – Deslocamento vertical das partículas – Modelo 03 – 30D

A partir da Figura anterior pode-se perceber que o deslocamento vertical se encontra próximo de zero nas partículas adjacentes às bordas do modelo, mas ainda assim algum deslocamento pode ser observado. Portanto foi novamente analisado o deslocamento vertical de forma binária, com as partículas preenchidas de preto apresentando deslocamento vertical ascendente e as partículas preenchidas de branco, deslocamento vertical descendente, conforme apresentado na Figura 4.51, a seguir.

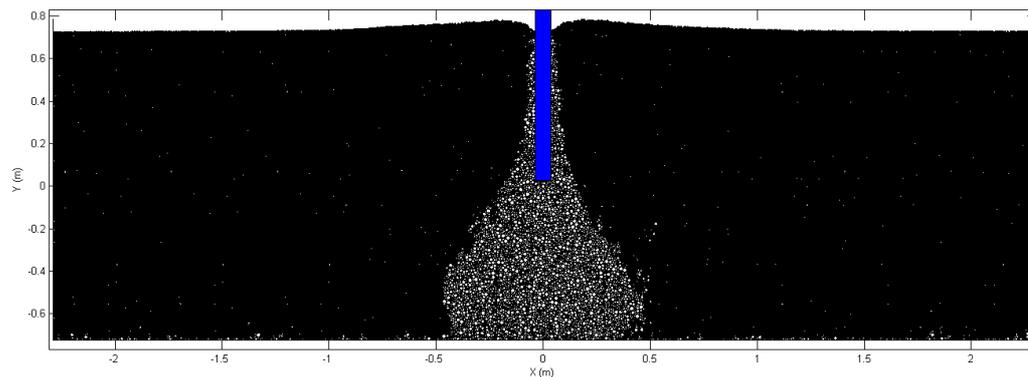


Figura 4.51 – Deslocamento vertical binário das partículas – Modelo 03 – 30D

Como pode ser observado, o deslocamento vertical binário para o modelo com distância de borda de 30D se apresenta bastante similar ao ensaio de referência, indicando que a distância de 30 vezes o diâmetro da estaca ainda não é o suficiente para evitar o efeito de borda no deslocamento das partículas. Apesar deste efeito, as diferentes dimensões utilizadas não apresentaram nenhum outro efeito em comparação ao ensaio de referência, concordando com as premissas adotadas por Butlanska et al. (2014), Jiang, Yu e Harris (2006) e Zhou et al. (2012) e resultados experimentais (e.g. Bolton et al., 1999, Jamiolkowski,; Lo Presti e Manassero, 2003).

Não foram verificadas diferenças significantes em relação ao ensaio de referência para as demais condições analisadas e, portanto não foram apresentadas neste subitem.

4.4.2

Condições antes dos ensaios de prova de carga

Após a instalação da estaca, seja por velocidade constante ou retirando partículas, foi realizado um processo de equilíbrio de forças, entre a reação das partículas nas paredes da estaca e o peso atribuído pra estaca, antes da simulação do ensaio de prova de carga, a partir desta etapa o estado final de cada modelo foi então avaliado.

4.4.2.1

Estudo da velocidade para o equilíbrio de forças

O processo de equilíbrio de forças, necessário para simular a condição inicial dos ensaios de prova de carga, foi realizado aplicando uma velocidade vertical na estaca até que o somatório das forças de reação das partículas fosse igual ao peso da estaca, definido como 86N, portanto foi aplicada uma velocidade vertical ascendente, para os casos onde os somatórios das forças de reação, após a instalação, eram superiores ao peso da estaca e uma velocidade vertical descendente para os casos que apresentavam forças de reação inferiores a este valor. A cada etapa desta simulação o modelo foi levado ao equilíbrio considerando a equação (2.59), com $S \leq 10^{-5}$.

A magnitude da velocidade utilizada no processo de equilíbrio de forças é esperada que tenha efeitos no sistema de partículas, gerando maiores esforços dinâmicos quanto maior for a velocidade, ocasionando um rearranjo mais significativo das partículas do sistema. Portanto este estudo foi realizado com o objetivo de selecionar uma velocidade que tenha pouca influência no modelo e nas respostas das simulações subsequentes.

Com os ciclos de cálculos numéricos necessários para levar a amostra ao equilíbrio é de se esperar algum rearranjo das partículas, pelos motivos explicitados no Item 2.2 e conseqüentemente, alguma mudança nos valores obtidos de resistência de ponta e resistência de fuste. A Figura 4.52 mostra a influência da velocidade aplicada na estaca na carga total (equivalente a soma da reação de todas partículas em contato com as paredes da estaca) antes das simulações de prova de carga.

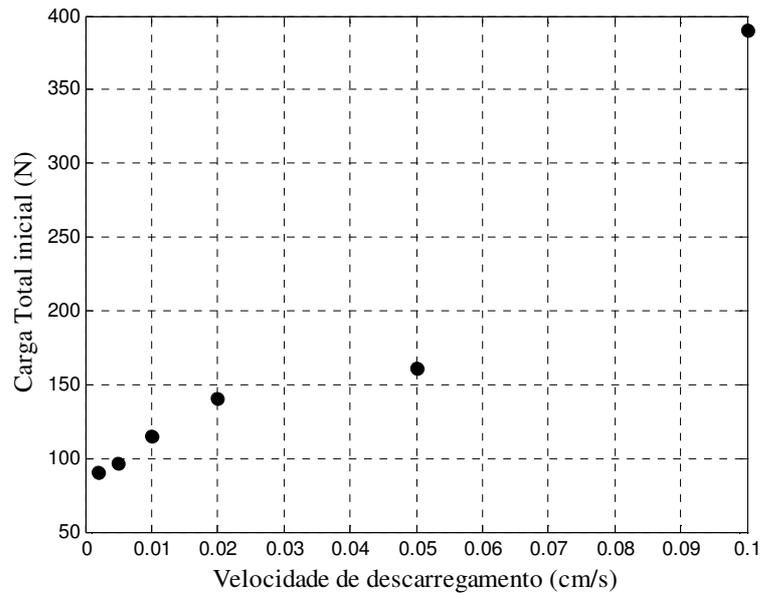


Figura 4.52 – Influência da velocidade de descarregamento no valor de carga total inicial

O critério de equilíbrio pela máxima força desbalanceada das partículas (equação (2.59) foi também avaliado. A Figura 4.53 apresenta o valor médio do critério de equilíbrio durante o equilíbrio de forças para cada velocidade considerada.

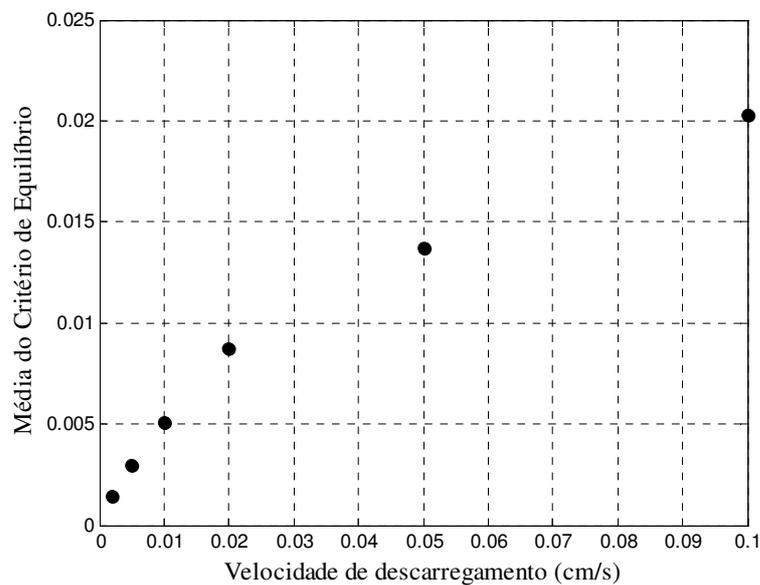


Figura 4.53 – Valor do critério de equilíbrio para cada velocidade de descarregamento

Observando os resultados das figuras acima pode-se concluir que quanto menor a velocidade utilizada para o equilíbrio com a força peso da estaca, menor é a influência no modelo.

Como o DEM utiliza um método de cálculo explícito, onde cada ciclo de cálculo representa um intervalo de tempo, quanto menor for a velocidade utilizada mais ciclos de cálculo serão necessários para se alcançar o estado desejado e, conseqüentemente, maior será o tempo de simulação. A Tabela 4.12, a seguir, apresenta o tempo computacional demandado para se alcançar o equilíbrio de forças nestas condições.

Tabela 4.12 - Tempo de simulação para diferentes velocidades

Velocidade aplicada (cm/s)	Tempo de simulação (h)
0,1	3,7
0,05	5,4
0,02	12,2
0,01	21,6
0,005	37,3
0,002	104,8

Ponderando entre a influência na condição inicial do modelo e o tempo necessário de simulação, considerando o número total de modelos a serem analisados, foi selecionada a velocidade de 0,01 cm/s. Esta velocidade foi utilizada no processo de equilíbrio de forças para as duas formas de instalação analisadas.

4.4.2.2

Análise do estado final de cada modelo

Após o processo de equilíbrio de forças, apresentado no subitem anterior, foi analisado o estado final de cada modelo. Os modelos advindos da instalação pela cravação da estaca serão os mesmos apresentados no item 4.4.1, com apenas uma adição, o processo de cravação feito na condição *Perfeitamente Lisa (PL)*, ou seja sem nenhum atrito entre a estaca e as partículas, teve duas formas de equilíbrio de forças: mantendo o atrito nulo, e modificando o atrito para a condição *Perfeitamente Rugosa (PR)*.

Já a instalação da estaca com a retirada das partículas, realizada para simular o comportamento de estacas escavadas, foi simulada para diferentes situações, variando as partículas a serem retiradas de acordo com qual a porcentagem do raio que estaria "dentro" da área a ser ocupada pela estaca.

Por exemplo, para *10% do raio*, foi permitida a permanência de partículas no modelo que continham até 10% do seu raio na área a ser ocupada pela estaca, o mesmo foi realizado para 30%, 50%, 80% e 100% do raio. Esses diferentes modelos com a instalação da estaca retirando partículas, foram analisados a fim de se investigar as influências do alívio de tensões e deslocamento de partículas no modelo, assim como o subsequente comportamento nas provas de carga simuladas.

Para as análises deste subitem foi verificado o estado de tensão próximo da estaca em cada caso, o arranjo das partículas pela orientação dos contatos, a variação de porosidade e as tensões residuais de ponta e de fuste.

O estado de tensões foi também avaliado, nos diferentes modelos, considerando as tensões médias (σ_m) e desviadoras (σ_d), obtidas pelas equações (4.4) e (4.5), respectivamente, de forma a avaliar melhor a possível influência desse fator nos resultados de prova de carga.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (4.4)$$

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (4.5)$$

Onde σ_1 e σ_2 , são as tensões principais maior e menor para 2D, respectivamente. Os círculos de medição do programa PFC2D fornecem somente os valores das tensões verticais (σ_y) horizontais (σ_x) e cisalhantes (τ_{xy} e τ_{yx}), portanto para a obtenção das tensões principais foi utilizada a rotação de tensões em 2D.

As demais condições foram analisadas de forma análoga aos resultados apresentados nos itens anteriores e também como o subitem 4.4.1.2 só serão apresentados os resultados onde foram verificadas relevantes diferenças em comparação ao ensaio de referência.

Primeiramente, para complementar os resultados obtidos após a instalação da estaca com velocidade constante, foram avaliados os estados finais do modelo para as condições de rotação consideradas.

A Figura 4.54 e Figura 4.55 mostram os acréscimos de tensão média e desviadora, nas zonas 4 e 5 respectivamente, para a análise das rotações nas partículas.

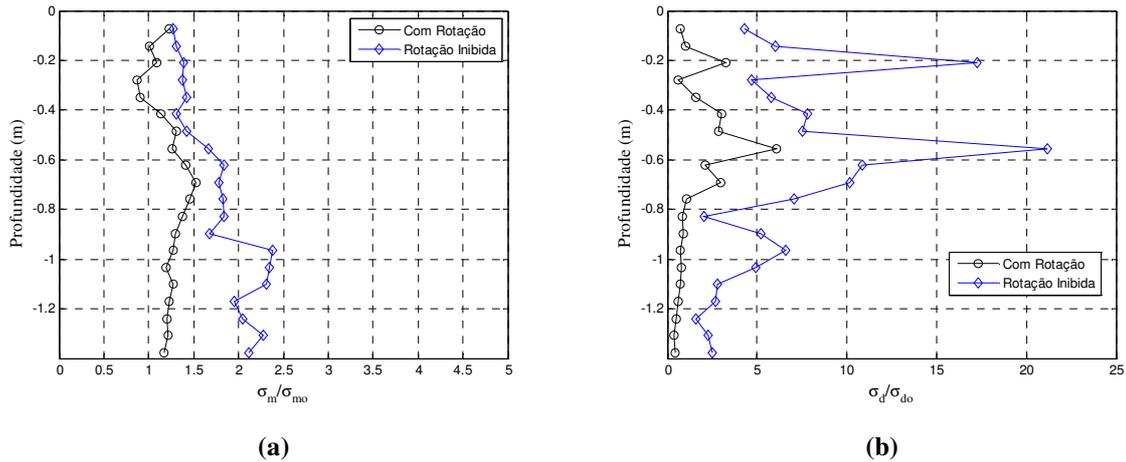


Figura 4.54 – Estado de tensões na Zona 4 do modelo após o equilíbrio de forças (a) Tensão Média (b) Tensão Desviadora

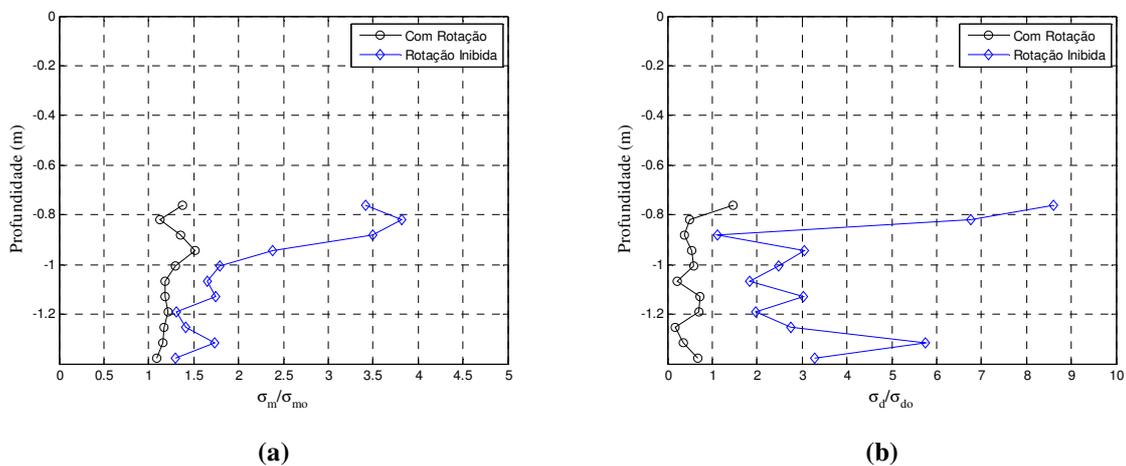


Figura 4.55 – Estado de tensões na Zona 5 do modelo após o equilíbrio de forças (a) Tensão Média (b) Tensão Desviadora

Observando os resultados apresentados nas figuras anteriores pode-se perceber um acréscimo bem maior das tensões desviadoras, em comparação ao acréscimo das tensões médias no modelo com rotação inibida. Com esse efeito deve-se esperar uma resistência de ponta menor no modelo sem rotação para as simulações de prova de carga, pois o mesmo encontra-se em uma condição inicial mais próxima da ruptura.

A Figura 4.56 mostra a orientação dos contatos antes e depois da instalação para o modelo de referência e a condição de cravação com a rotação inibida das partículas.

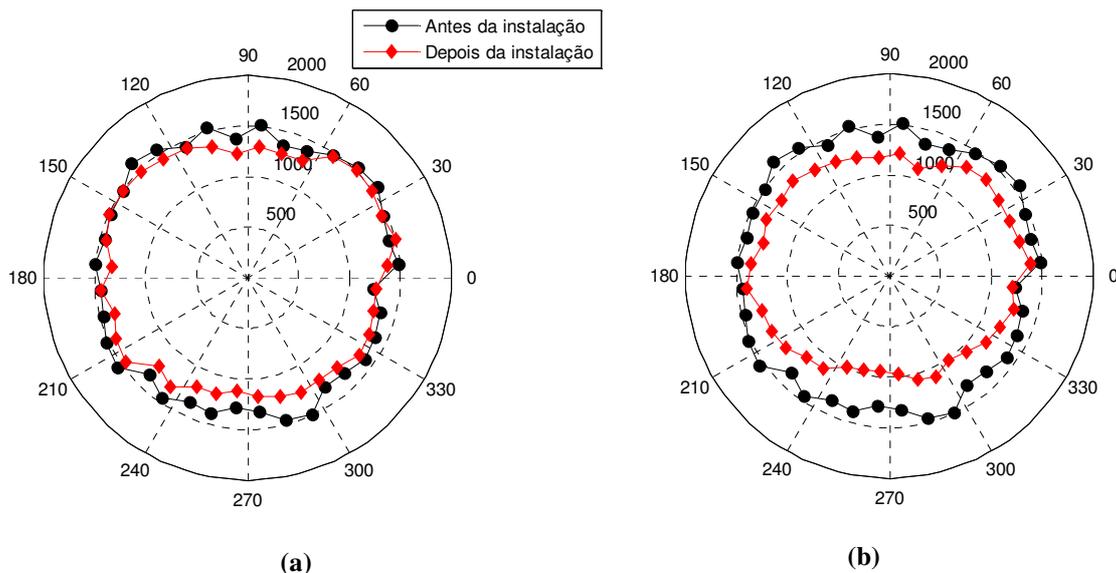


Figura 4.56 – Alteração da orientação dos contatos devida a instalação da estaca (a) partículas com rotação (b) partículas sem rotação

Avaliando os resultados de orientação dos contatos antes e depois da instalação apresentados, pode-se perceber que a instalação da estaca com a rotação das partículas inibida ocasiona uma modificação bem maior na estrutura da amostra, em comparação à cravação realizada utilizando partículas com rotação livre.

Levando estes resultados em consideração, assim como as diferenças em porosidade e estado de tensões após o descarregamento, as condições de cravação com rotação foram escolhidas para serem utilizadas como referência para as simulações de prova de carga apresentadas no próximo item.

Considerando a comparação do estado final dos modelos devida à forma de instalação, foi primeiramente avaliada a influência no estado de tensões, em especial na variação da tensão média nos modelos.

A avaliação do perfil de tensões médias na Zona 4 das estacas escavadas com o modelo de referência, está apresentado na Figura 4.57.

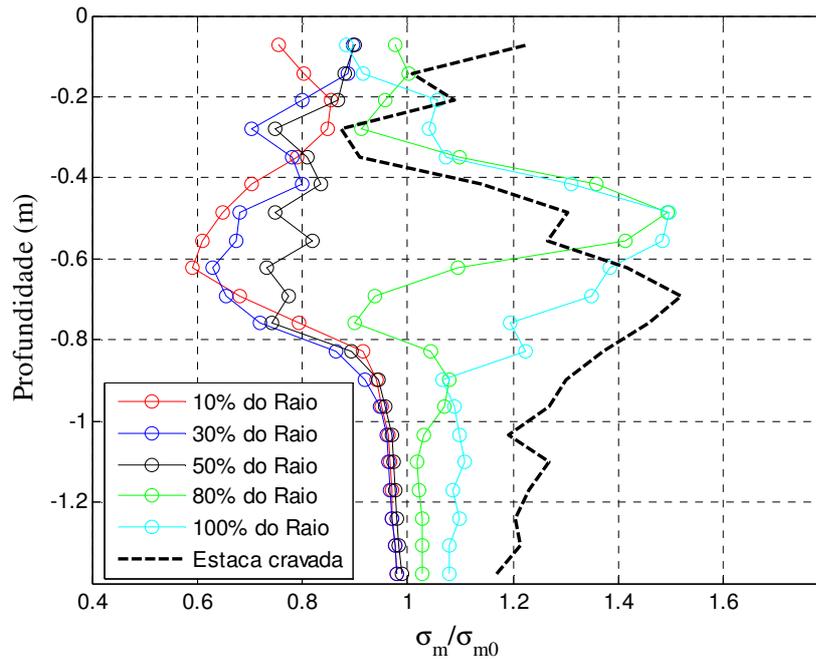


Figura 4.57 – Perfil de variação da tensão média nas diferentes formas de instalação - Zona 4

A partir da análise da Figura 4.57 pode-se observar um descarregamento do solo para os casos até 50% do raio, o que está de acordo com resultados de verificações de campo e experimentais (e.g. Cintra e Aoki, 2010; Décourt, 1998 e Velloso e Lopes, 2010). Já para as estacas escavadas com 80% e 100% do raio, é verificado um aumento da tensão média próximo ao observado no modelo de referência, podendo ser classificadas, pela terminologia utilizada em Velloso e Lopes (2010), como estacas "sem deslocamento".

Ao avaliar o perfil de tensões médias na zona 5, apresentado na Figura 4.58, verifica-se que esse descarregamento é até maior nos modelos com partículas de até 50% do raio mantido na área ocupada pela estaca. Neste caso, todas as estacas escavadas apresentaram uma tensão média menor do que o modelo de referência inclusive o modelo com 100% do raio.

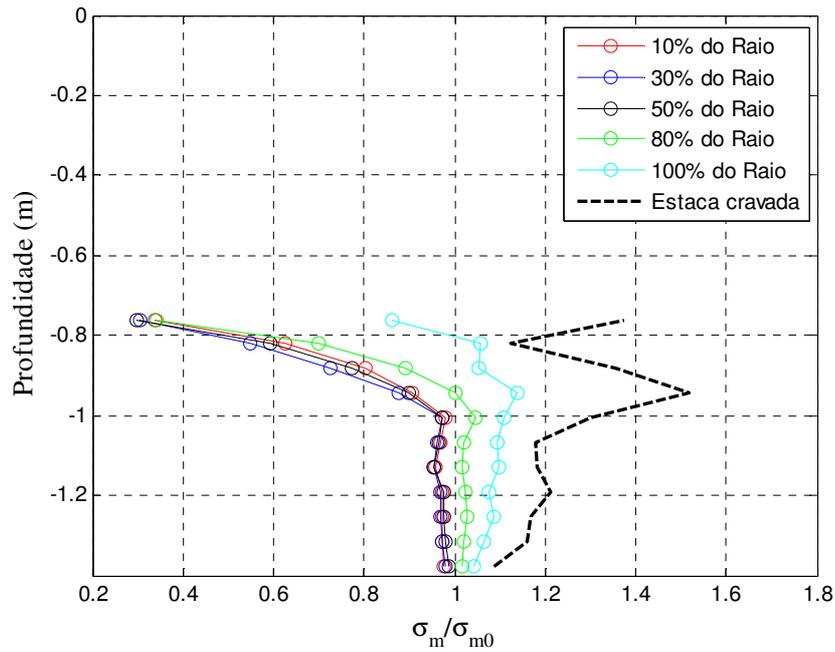


Figura 4.58 – Perfil de variação da tensão média nas diferentes formas de instalação - Zona 5

Outro parâmetro avaliado, no qual foi verificada uma diferença entre a instalação pela retirada de partículas e pela cravação da estaca, foi a variação da porosidade, dentro do modelo.

A Figura 4.59 e a Figura 4.60 apresentam a variação de porosidade das diferentes condições de retirada de partículas para a instalação da estaca escavada, em conjunto com o ensaio de referência, para as Zonas 4 e 5, respectivamente.

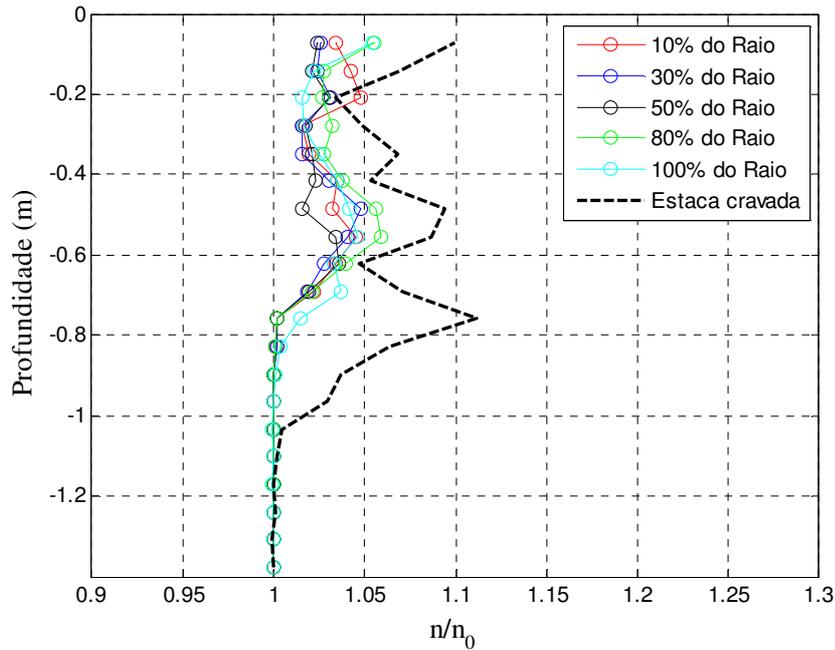


Figura 4.59 – Perfil de variação de porosidade nas diferentes formas de instalação - Zona 4

A comparação entre variação de porosidade das estacas escavadas e do ensaio de referência para a Zona 4 do modelo, mostra que, mesmo apresentando um aumento de porosidade próximo à estaca, este aumento é bastante inferior aos verificados no ensaio de referência e nas demais instalações por cravação.

A Figura 4.60 a seguir, mostra a mesma comparação para a Zona 5 e apresenta pouca variação de porosidade embaixo da estaca nos modelos onde foi realizado a instalação retirando as partículas do local do ensaio.

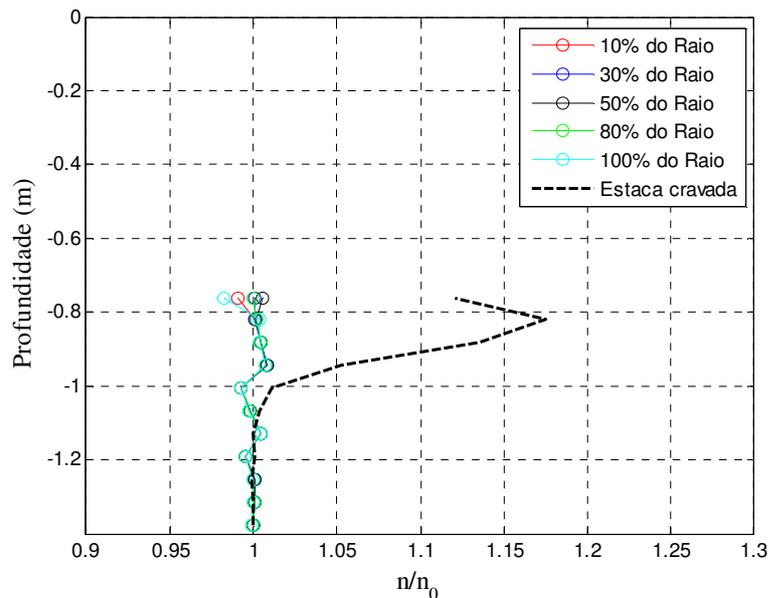


Figura 4.60 – Perfil de variação de porosidade nas diferentes formas de instalação - Zona 5

Além de apresentar um aumento menor de porosidade na Zona 4, a extensão de influência na instalação da estaca escavada é consideravelmente menor do que a estaca cravada. A Figura 4.61, a seguir mostra a variação de porosidade para a Zona 1, comparando entre as duas formas de instalação. Pelo resultado apresentado, pode-se perceber que na zona mais próxima das bordas do modelo, quase não existe variação de porosidade pela instalação da estaca escavada, enquanto a estaca cravada apresenta quase a mesma variação da Zona 4.

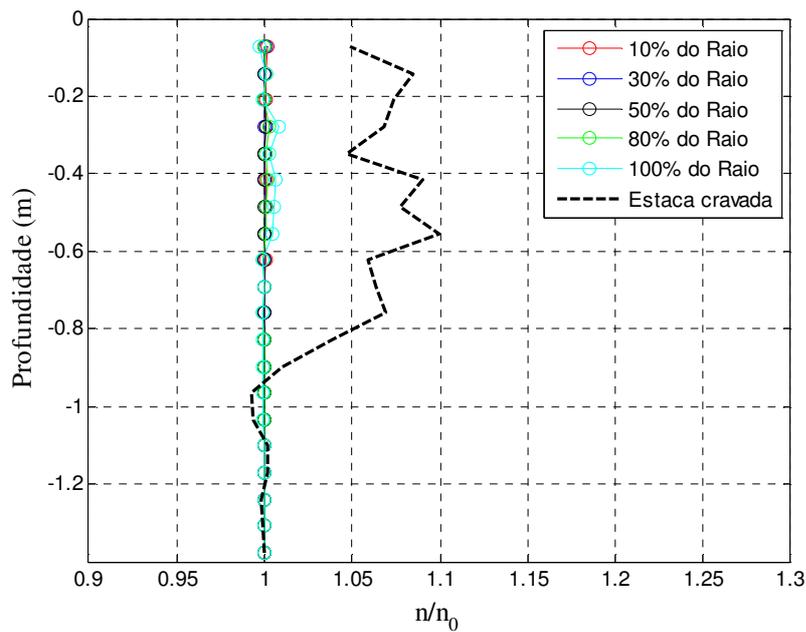


Figura 4.61 – Perfil de variação de porosidade nas diferentes formas de instalação - Zona 1

A comparação realizada entre as duas formas de descarregamento da estaca na condição PL (i.e. mantendo o atrito igual a 0 e retornando o atrito para o valor do ensaio de referência) apresentou o mesmo comportamento para quase todos os parâmetros avaliados. A variação de tensão desviadora, foi o único parâmetro que apresentou alguma tendência, e encontra-se apresentado na Figura 4.62, a seguir.

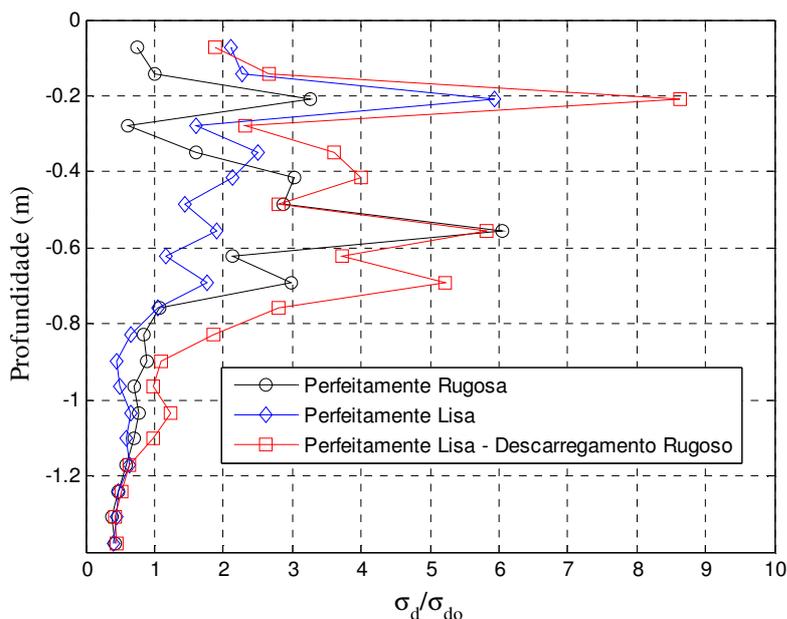


Figura 4.62 – Variação da tensão desviadora para diferentes condições de atrito estaca – partículas

A diferença entre as 3 condições apresentadas na Figura anterior não é muito significativa, mas mostra uma tendência da estaca na condição PL gerar o campo de tensões desviadoras com valores menores do que os demais modelos. Pode-se observar que os resultados da figura apresentam uma diferença acentuada entre o acréscimo de tensão desviadora evidenciado no ensaio de referência e no ensaio onde a estaca permaneceu na condição PL. A estaca na qual o descarregamento foi simulado com atrito apresenta um perfil de acréscimo de tensão desviadora próxima ao ensaio de referência e até um pouco superior próxima à profundidade da ponta da estaca.

Todas as diferentes condições analisadas apresentaram estados finais, nos quais as forças de reação se equivaliam à força peso na estaca. No entanto, as diferentes formas de simular o equilíbrio de forças e também as diferentes tensões de ponta e atrito lateral antes desse processo nos diferentes modelos, geraram tensões residuais de ponta e de fuste na estaca, antes da simulação da prova de carga.

A Tabela 4.13, a seguir, apresenta as tensões residuais encontradas nos diferentes modelos.

Tabela 4.13 – Tensões residuais antes dos ensaios de prova de carga

Modelos	Tensão Ponta (kPa)	Atrito Lateral (kPa)
Modelo 03	13,53	-0,65
Modelo 03 – Rotação inibida	40,80	-2,52
Estaca Escavada 100%	4,40	-0,15
Estaca Escavada 80%	0,40	0,04
Estaca Escavada 50%	0,17	0,04
Estaca Escavada 30%	0,24	0,02
Estaca Escavada 10%	0,15	0,04
Modelo 02	15,31	-0,71
Modelo 01	16,97	-0,83
Modelo 03 – Vel. 2cm/s	14,33	-0,69
Modelo 03 – Vel. 5cm/s	18,65	-0,92
Modelo 03 – 20D	12,63	-0,58
Modelo 03 – 30D	11,81	-0,55
Modelo 03 – Metade do Raio	16,42	-0,77
Modelo 03 – Liso - Rugoso	20,72	-1,02
Modelo 03 – Liso - Liso	1,15	0,00
Modelo 03 – 2,85m	11,44	-0,48

4.4.3

Considerações gerais

O presente item estudou o processo de instalação da estaca até a profundidade de 700 mm, onde será realizada a simulação do ensaio de prova de carga estática, incluindo o efeito da influência de diversas condições nos modelos analisados. Para tal foram considerados os efeitos de rotação de partículas, atrito entre estaca e partículas, largura e profundidade do modelo, forma de geração das amostras dos modelos, velocidade de cravação, tamanho/quantidade de partículas e instalação da estaca retirando partículas do local a ser ocupado pela mesma.

Em todas as condições de instalação avaliadas, foram investigados os efeitos no campo de tensões nos modelos, a partir da avaliação das tensões verticais, horizontais, médias e desviadoras em diferentes zonas, nas tensões apresentadas nos limites dos modelos, na porosidade em diferentes zonas, na resistência à cravação, na orientação dos contatos e no deslocamento das partículas dos modelos.

Destes efeitos citados, foram apresentados neste item somente os resultados que destoaram do ensaio de referência, destacado na Tabela 4.11, e efeitos que contradizem resultados experimentais ou resultados numéricos de outras pesquisas.

As influências das condições analisadas no processo de instalação da estaca, em comparação com o ensaio de referência, para cada um dos fatores instigados estão apresentadas na Tabela 4.14 a seguir. Foi marcado "X" nos fatores em que foram observadas influências da condição analisada.

Tabela 4.14 – Resumo das influências das condições analisadas no processo de instalação da estaca

Diferentes condições analisadas	Durante a instalação				Antes da prova de carga				
	$\Delta\sigma_V$ Fundo	$\Delta\sigma_H$ Bordas	q_c	f_s	σ_m	σ_d	n	Arranjo das Partículas	Tensões Residuais
Rotação	X	X	X		X	X	X	X	X
Velocidade			X	X					
Distância de borda		X							
Métodos Geração Modelos									
Número de partículas		X			X				
Atrito estaca-solo	X			X	X	X			X
Distância de fundo	X	X							
Método de Instalação			NA	NA	X		X		X

NA – Não aplicável

O movimento lateral de partículas em todos os modelos, apresentado na Figura 4.38 para o modelo de referência, em conjunto com o aumento de porosidade verificado, está em concordância com a previsão de alteração do solo ao redor da estaca apontado por Bernardes (1989) e Velloso e Lopes (2010) para uma areia compacta.

Os resultados do aumento da tensão horizontal também aparentam estar de acordo com os resultados experimentais de Yang et al. (2013), onde foram verificados picos de tensão radial próximos à base da estaca e significativas influências nesta tensão até uma distância de 30 vezes o raio da estaca. Os resultados destes autores também apresentaram uma variação entre as tensões radiais da estaca em movimento para as estacas estacionárias, de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho pela comparação do campo de tensões antes e depois de realizado o equilíbrio de forças entre a estaca e a reação do modelo.

4.5 Prova de carga estática

O processo de simulação da prova de carga estática foi realizado pela aplicação de uma velocidade vertical descendente nas estacas, após o equilíbrio de forças descrito no item anterior. As simulações foram realizadas na profundidade de 70 cm e até o recalque de 8 mm, para comparação direta com o resultado de Bernardes (1989).

Com o objetivo da velocidade utilizada não afetar a resposta do modelo (pelas razões apresentadas no Item 2.1.3), foi avaliada a influência desta a partir das curvas de resistência obtidas.

Foram utilizadas 6 velocidades distintas, variando de 5cm/s a 0,05 cm/s nos resultados das curvas de resistência de ponta e fuste *versus* o recalque. Para tal, foi considerado o modelo final do ensaio de referência, apresentado no item anterior. Os resultados obtidos por esse estudo estão apresentados na Figura 4.63 e na Figura 4.64, para resistência de ponta e fuste, respectivamente. Os valores de resistência foram calculados utilizando a tensão obtida pela simulação, multiplicada pela área real da estaca do ensaio de Bernardes (1989), de forma a possibilitar a comparação dos resultados.

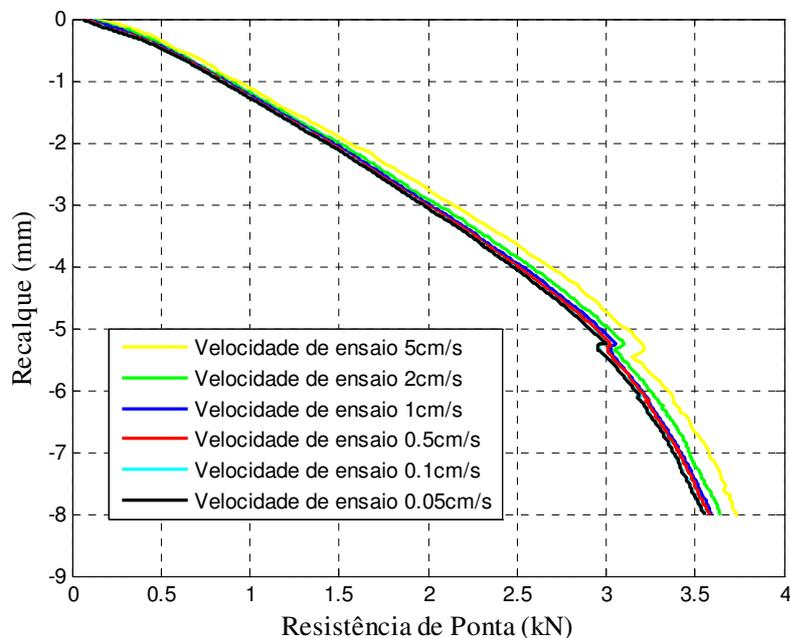


Figura 4.63 – Influência da velocidade na simulação do ensaio de prova de carga – Resistência de ponta

A partir dos resultados apresentados na figura acima, pode-se perceber uma pequena influência da velocidade nas curvas de resistência de ponta.

Esta influência mostra uma relação direta entre o aumento de velocidade e o aumento de resistência, nas condições consideradas.

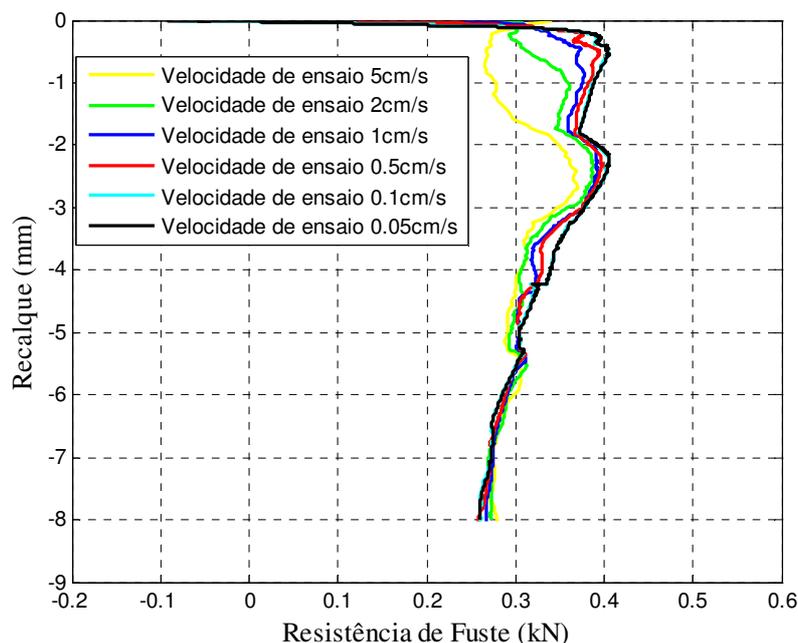


Figura 4.64 – Influência da velocidade na simulação do ensaio de prova de carga – Resistência de fuste

O resultado apresentado na Figura 4.64 também indica uma pequena dependência da curva de resistência com a velocidade de ensaio utilizada. Neste caso, no entanto, não foi observada uma relação direta, como na Figura 4.63.

A partir dos resultados apresentados nas duas figuras anteriores, foi escolhida a velocidade de ensaio de 5 mm/s, de forma a conciliar a influência da velocidade nos resultados com um valor razoável de tempo de simulação (aproximadamente 1 hora).

Para o estudo apresentado neste item foi também realizada a simulação da prova de carga pelo acoplamento mecânico com elementos finitos, modelando a estaca como um elemento flexível, com parâmetros elásticos E e ν , com o objetivo de avaliar e validar esta forma de análise. Portanto os resultados apresentados foram subdivididos em dois subitens, *estaca rígida* e *estaca flexível*, apresentados a seguir.

O valor utilizado para o atrito entre estaca e partícula, de modo geral, foi considerado na condição *Perfeitamente Rugosa*, definida anteriormente, exceto nos casos onde este fator é investigado.

4.5.1 Estaca rígida

Neste subitem estão apresentados os resultados da simulação de prova de carga realizada somente através do programa PFC2D, onde a estaca foi modelada de forma análoga aos item 4.4.

Foram avaliadas 2 condições de análises para as simulações de prova de carga utilizando a estaca rígida: As curvas de resistência de ponta e fuste e o campo de deslocamento das partículas.

Primeiramente serão avaliadas as curvas de resistência no modelo final do ensaio de referência, de forma análoga ao Item 4.4. Serão realizadas também comparações no comportamento das curvas de resistência obtidas pela avaliação de diferentes fatores analisados. Para estes será verificada a influência dos modelos gerados no processo de instalação, conforme apresentados no Item 4.4, além de outros 3 fatores verificados na simulação da prova de carga, como se segue:

- Amortecimento mecânico
- Rotação das partículas
- Atrito entre estaca e partículas

Por fim será apresentada a análise do campo de deslocamento das partículas.

4.5.1.1 **Resultados do ensaio de referência**

Os resultados deste subitem foram obtidos avaliando as curvas de resistência, de ponta e de fuste, pela simulação do ensaio de prova de carga no modelo do ensaio de referência, definido no Item 4.4.

Em conjunto com os resultados das simulações numéricas estão apresentados também os resultados experimentais de Bernardes (1989), como apresentados no Capítulo 3, na mesma profundidade de 700mm.

A Figura 4.65, a seguir, apresenta os resultados da simulação numérica de prova de carga para resistência de ponta, em comparação com o ensaio experimental.

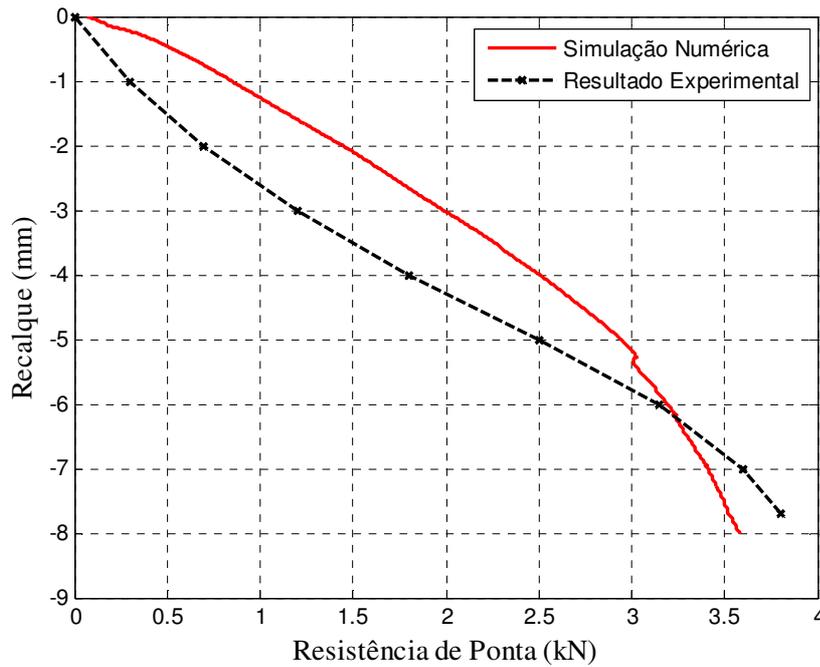


Figura 4.65 – Curva de resistência de ponta da simulação numérica e resultado experimental

O resultado apresentado na Figura acima mostra uma razoável concordância entre as duas curvas, em especial dadas as limitações do modelo 2D, descritas no Item 2.2.6. Além disso, a curva da simulação numérica apresenta uma rigidez inicial maior do que a curva experimental, podendo ser proveniente de incertezas da medição deste trecho inicial, apresentado no Item 3.

A Figura 4.66 apresenta os resultados da curva de resistência de fuste e sua comparação com o resultado experimental de Bernardes (1989).

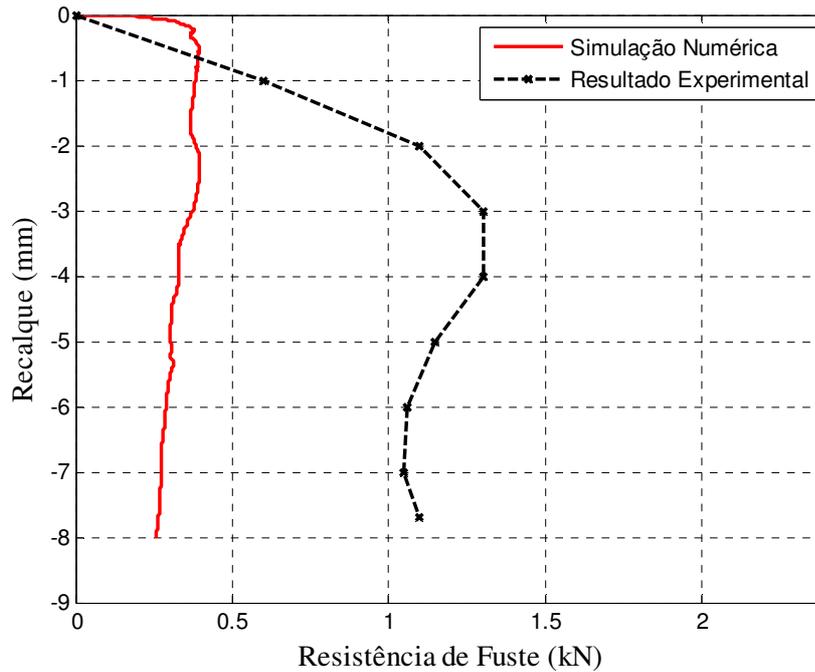


Figura 4.66 Curva de resistência de fuste da simulação numérica e resultado experimental

O resultado das curvas de resistência de fuste apresentadas, mostra valores de resistência consideravelmente inferiores ao resultado de Bernardes (1989). O motivo desta diferença pode decorrer das limitações de movimento das partículas oriundas da simulação em 2D do DEM, apesar do valor de coeficiente de atrito da interface encontrado ($\delta = 21^\circ$) ser coerente com valores encontrados experimentalmente em solos granulares, conforme apresentado em Bernardes (1989).

4.5.1.2

Comparação da influência dos fatores considerados nas curvas de resistência

Neste subitem serão apresentadas as comparações das curvas de resistência de ponta e resistência de fuste *versus* o recalque, devido aos diferentes fatores analisados. Para tal, foram avaliadas as 3 condições no ensaio de prova de carga, já apresentadas, e os modelos gerados pelas diferentes formas de instalação do Item 4.4.

A Figura 4.67, a seguir, apresenta a comparação das curvas de resistência de ponta, para as simulações de prova de carga com rotação livre e rotação inibida das partículas, utilizando o modelo de referência do Item 4.4.

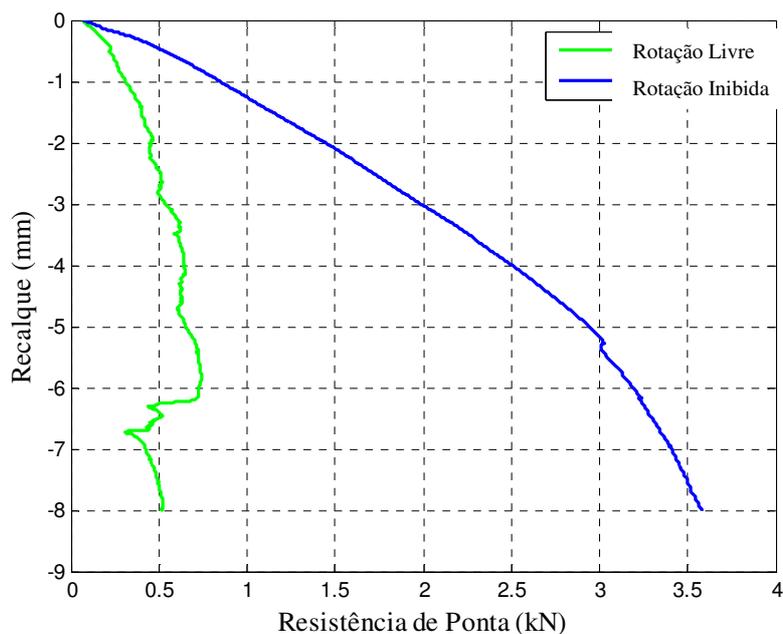


Figura 4.67 – Influência da rotação na curva de resistência de ponta

Os resultados apresentados na figura anterior mostram a diferença de resistência entre o modelo com rotação inibida e com a rotação livre, de acordo com os resultados da instalação da estaca apresentada no Item 4.4 e com as diferenças de resistência usualmente observadas entre estas formas de análise, discutidas no subitem 2.2.5.

A Figura 4.68 apresenta a influência da rotação nas curvas de resistência de fuste.

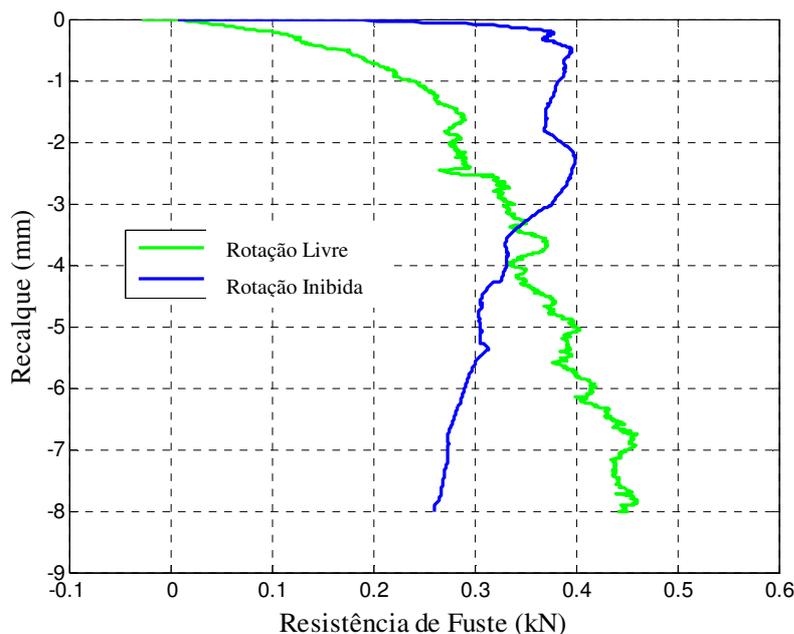


Figura 4.68 – Influência da rotação na curva de resistência de fuste

Os resultados da figura anterior mostram valores de resistência de fuste com a mesma ordem de grandeza entre as duas condições, diferente dos resultados apresentados na Figura 4.67, mas de acordo com os resultados apresentados no Item 4.4.

Outro ponto importante observado na figura acima é a diferença de comportamento entre as duas curvas de resistência de fuste. O ensaio com rotação inibida apresenta uma rigidez inicial maior e um comportamento frágil na curva de resistência, enquanto o ensaio com rotação livre apresenta uma rigidez inicial menor e um aumento da resistência de fuste com o recalque. Para investigar esta diferença, foram avaliadas as tensões horizontais nas paredes da estaca, nestes dois casos, apresentados na Figura 4.69, a seguir.

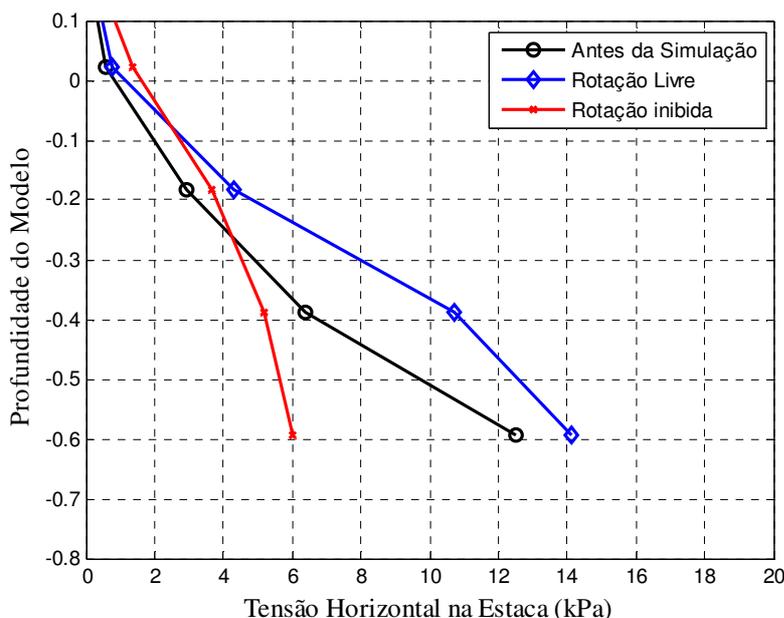


Figura 4.69 – Análise do perfil de tensão horizontal

O resultado da figura acima mostra um aumento do valor das tensões horizontais atuantes nas estacas após as simulações de prova de carga de rotação livre, enquanto a simulação com rotação inibida mostrou uma diminuição desta, coerente com o comportamento das curvas de resistência apresentadas. Lehane e White (2005), em seus ensaios de prova de carga em areia, verificaram um aumento da tensão horizontal próximo a estaca, em todos os casos analisados. Esta comparação indica que a condição de partículas com rotação inibida não representa corretamente o campo de tensões da areia próxima ao fuste da estaca no ensaio de prova de carga.

Baseando-se nas diferenças de comportamentos obtidos pela variação do atrito entre estaca e partículas, observadas nos resultados de simulação de diversos pesquisadores (e.g. Jiang, Yu e Harris, 2006; Kinloch e O'Sullivan, 2007 e Takana, 2000), a influência deste fator foi avaliada nas curvas de resistência das simulações de prova de carga realizadas.

A Figura 4.70, a seguir, apresenta a variação da curva de resistência de ponta para os diferentes fatores de atrito utilizados, sendo estes definidos como o coeficiente de atrito utilizado dividido pelo coeficiente de atrito entre as partículas.

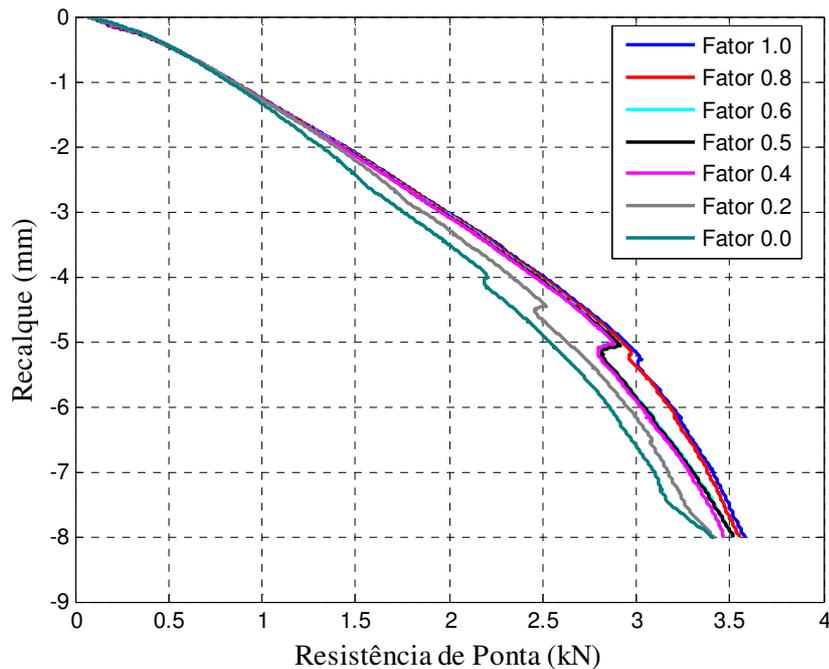


Figura 4.70 – Influência do atrito entre estaca e partículas na curva de resistência de ponta

Os resultados da figura acima mostram uma relação direta pequena entre a resistência de ponta e o atrito entre a estaca e as partículas do modelo, apresentando uma diferença de resistência de aproximadamente 6% entre o Fator 1,0 e o Fator 0,0 para o recalque de 8mm.

A Figura 4.71, a seguir, apresenta os resultados das resistências de fuste com os diferentes fatores de atrito considerados.

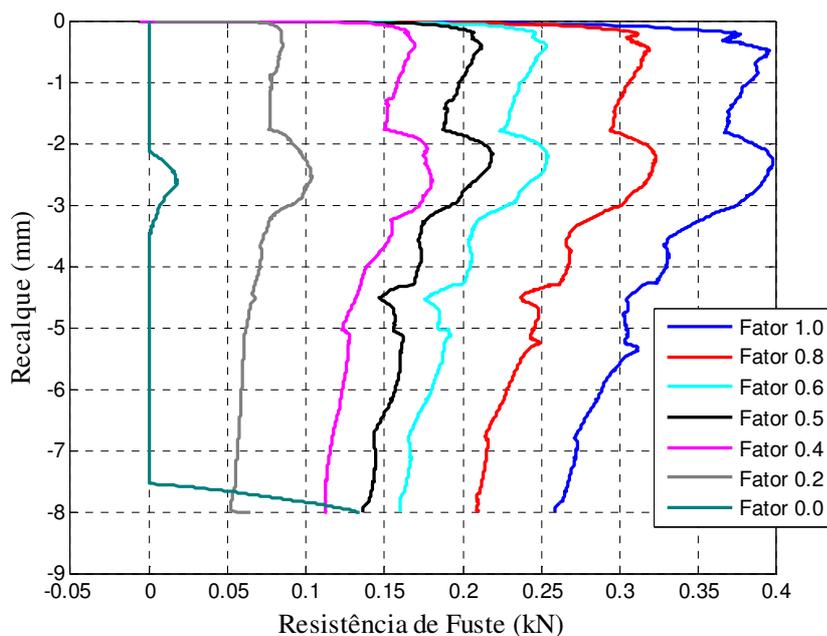


Figura 4.71 – Influência do atrito entre estaca e partículas na curva de resistência de fuste

Os resultados apresentados na figura anterior mostram uma forte dependência entre as curvas de resistência de fuste e o atrito entre estaca e partículas do modelo. Este resultado está de acordo com o tipo de ruptura esperada para o fuste em solos granulares, como apresentada no Item 2.1.2.2, equação (2.13). Como estas simulações utilizaram o mesmo modelo, o valor de K_s antes do ensaio também era o mesmo, assim como o valor de σ'_v , permanecendo como variável somente o valor do atrito da interface solo-estaca, δ . Desta forma, os resultados apresentados devido à variação do atrito na prova de carga mostram que a resistência de ponta, assim como no cálculo teórico, tem parcelas que independem do atrito estaca-solo, enquanto a resistência lateral é inteiramente devida ao cisalhamento e , portanto inteiramente dependente do atrito de interface com a areia.

Foi realizada uma retroanálise nestes resultados, considerando o pico da curva como valor de resistência de fuste, apresentada na Tabela 4.15, a seguir.

Tabela 4.15 – Resultados da retroanálise de resistência de fuste

Fator de atrito	K_s	δ	$Tg(\delta)$	$Tg(\delta)/Tg(\delta)_{Ref}$
0,0	1,18	0,0	0,00	0,00
0,2	1,18	4,3	0,07	0,20
0,4	1,18	8,4	0,15	0,40
0,5	1,18	10,9	0,19	0,52
0,6	1,18	13,0	0,23	0,63
0,8	1,18	16,4	0,29	0,80
1,0	1,18	20,3	0,37	1,00

Os resultados obtidos na tabela acima mostram uma relação direta, quase exata, entre os fatores de atrito utilizados e a relação entre $Tg(\delta)/Tg(\delta)_{Ref}$. Além disso. Foi encontrado o valor de $Tg(\delta) = 0,37$ para o ensaio de referência (próximo ao valor do coeficiente de atrito calibrado e utilizado no modelo, 0,40), indicando que a ruptura de fuste, com estas condições de simulação, ocorre no contato entre a estaca e as partículas.

A simulação utilizando o fator 0,0 apresenta um pico de resistência no final da curva, o que, em teoria, devida à ausência de atrito entre estaca e partícula, não poderia ocorrer. Esta situação caracteriza um efeito de borda observada em algumas das simulações realizadas. Este efeito será discutido, a seguir, com o auxílio das curvas de resistência de fuste obtidas pela simulação no modelo de velocidade de instalação de 2cm/s, apresentado na Figura 4.72.

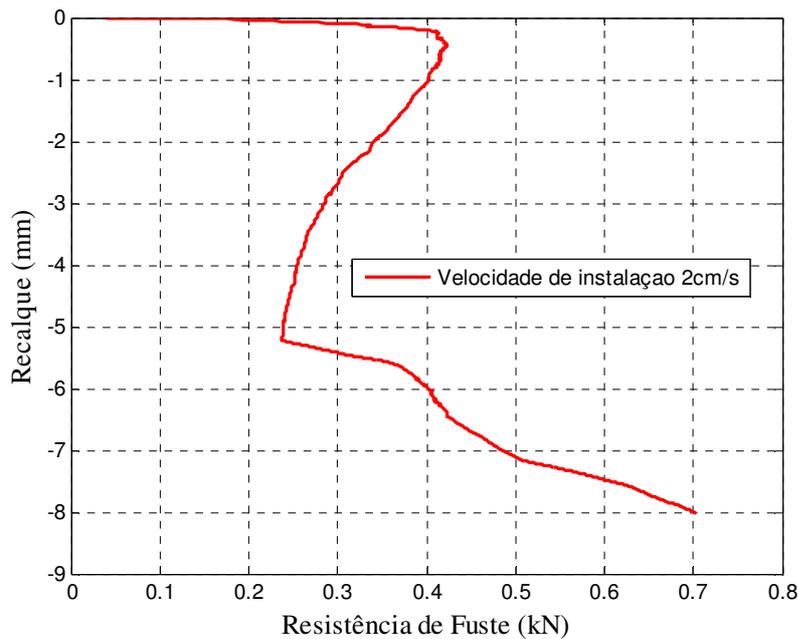


Figura 4.72 – Curva de resistência de fuste do modelo com velocidade de instalação de 2cm/s

A simulação de prova de carga no modelo de velocidade de 2 cm/s apresenta uma variação brusca de resistência a partir de 5mm de recalque. Para investigar este efeito, foram avaliados os vetores normais de contato das partículas em contato com a estaca, apresentados na Figura 4.73 e Figura 4.74, com a espessura da linha, que representa o vetor, relativa ao valor da força de contato.

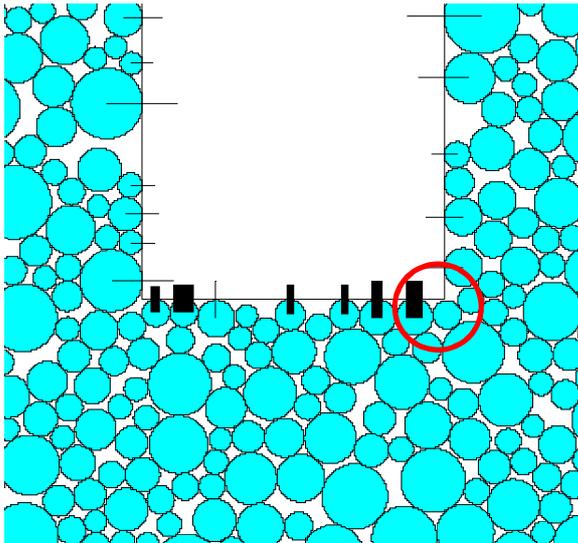


Figura 4.73 – Disposição das partículas quando do recalque de 5mm - Acréscimo de força vertical no fuste de 0,0 kN

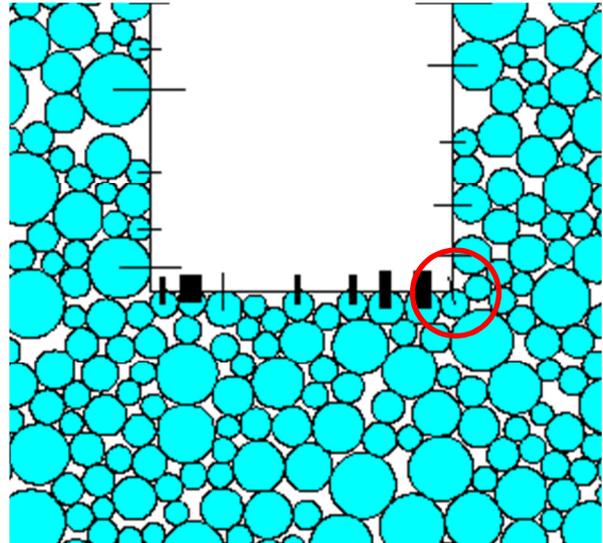


Figura 4.74 – Disposição das partículas quando do recalque de 6mm - Acréscimo de força vertical no fuste de 0,16 kN

Observando o círculo vermelho de destaque nas duas figuras acima, pode-se perceber que, para 6mm de recalque, uma das partículas apresenta um vetor normal de contato inclinado, enquanto que no momento anterior (recalque de 5mm) esta partícula ainda não está em contato com a estaca. Este vetor encontra-se inclinado, pois o contato está ocorrendo com as duas paredes ao mesmo tempo, exercendo uma força vertical de 0,16 kN no fuste da estaca. Observando-se a Figura 4.72, nota-se que a diferença de resistência mobilizada entre os valores de recalque de 5 e 6 mm é exatamente de 0,16 kN.

Esta situação apresenta um cenário possível de condição de contorno, abordada no Item 2.2.3, e foi verificado também nos resultados de fuste das seguintes simulações:

- Modelos de instalação da estaca por retirada de partículas com *overlap* de 10% e 30%;
- Modelo 02;
- Modelo obtido pela instalação na condição *Perfeitamente Lisa* (PL) e equilíbrio de forças na condição *Perfeitamente Rugosa* (PR).

Os resultados das curvas de resistência de fuste destes modelos serão apresentados somente até o início do efeito de borda apresentado.

As simulações de prova de carga foram realizadas nos modelos gerados pela instalação da estaca retirando partículas, apresentados no Item 4.4.2. Estas simulações apresentaram comportamentos distintos nas curvas de resistência do modelo de instalação por velocidade constante e as comparações realizadas encontram-se a seguir.

A Figura 4.75 apresenta os resultados de resistência de ponta para os modelos de instalação de estaca com retirada de partículas e a comparação com o ensaio de referência.

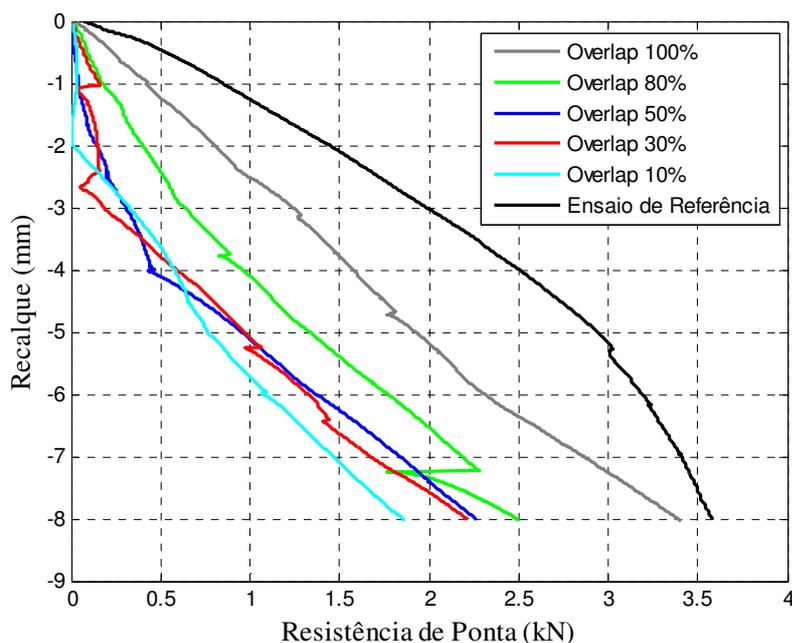


Figura 4.75 – Curvas de resistência de ponta – Métodos de instalação

A comparação entre os diferentes modos de retirada de partícula (diferentes *overlaps*) mostram um aumento de rigidez inicial e resistência a partir do *overlap* de 80% do raio. Este resultado está de acordo com as avaliações da tensão média abaixo da ponta da estaca, realizadas no Item 4.4.2.2, apresentando aumento desta a partir do *overlap* de 80% do raio.

O resultado apresentado na figura anterior também mostra, além de resistências menores para mesmos valores de recalque, valores de rigidez inicial também menores em comparação com o ensaio de referência. Esse resultado está de acordo com o discutido por diversos autores (e.g. Gui e Bolton, 1998; Décourt, 1998; Velloso e Lopes, 2010) que afirmam que uma estaca escavada sofre maiores deslocamentos para desenvolver sua resistência, em comparação a uma estaca cravada, indicando uma boa representação qualitativa dos efeitos de instalação, pelo DEM.

A Figura 4.76, a seguir, apresenta as curvas de resistência de fuste para os modelos de instalação de estaca com retirada de partículas e para o ensaio de referência.

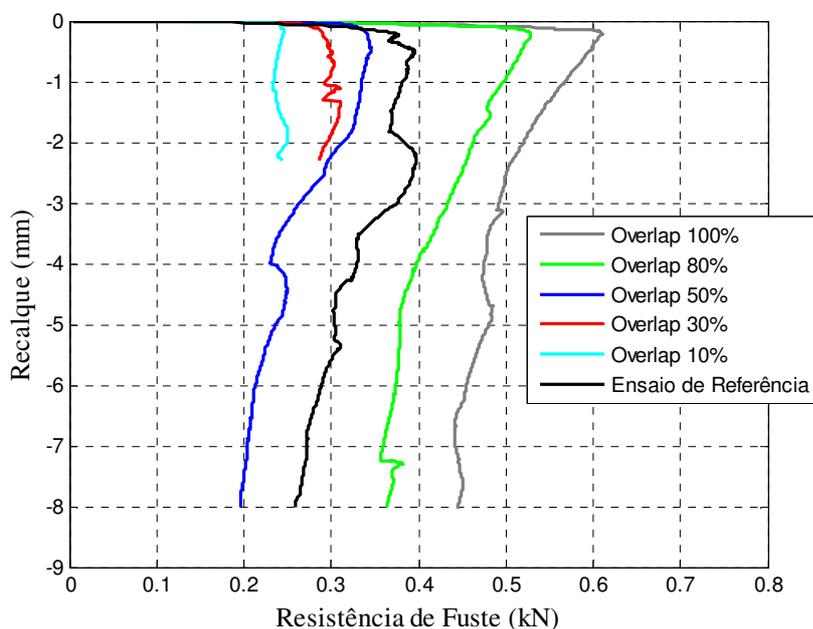


Figura 4.76– Curvas de resistência de fuste - Métodos de instalação

Nos resultados apresentados na figura anterior, os valores de resistência de fuste encontrados aumentam com o aumento do *overlap* e a curva de resistência de fuste do ensaio de referência encontra entre as curvas das estacas escavadas de se *overlap* 50% e 80%. Estas relações podem ser explicadas pelo aumento de tensão horizontal atuando na parede da estaca, conforme apresentado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Comparação da tensão horizontal média nas estacas escavadas e Modelo de referência antes da simulação de prova de carga

Modelo	σ_h média (kPa)
Overlap 100%	8,90
Overlap 80%	7,57
Modelo de Referência	6,58
Overlap 50%	4,62
Overlap 30%	3,91
Overlap 10%	3,59

A tensão horizontal média do modelo de referência verificada encontra-se entre os valores de tensão das estacas escavadas com *overlap* de 50% e 80% e o valor de atrito entre estaca e partículas é o mesmo para estas simulações, justificando o resultado encontrado na Figura 4.76.

As respostas dos modelos gerados pela instalação da estaca com a rotação livre e a rotação inibida das partículas na simulação de prova de carga foram avaliadas com objetivo de verificar sua influência. A Figura 4.77, a seguir, apresenta as curvas de resistência de ponta para os dois modelos.

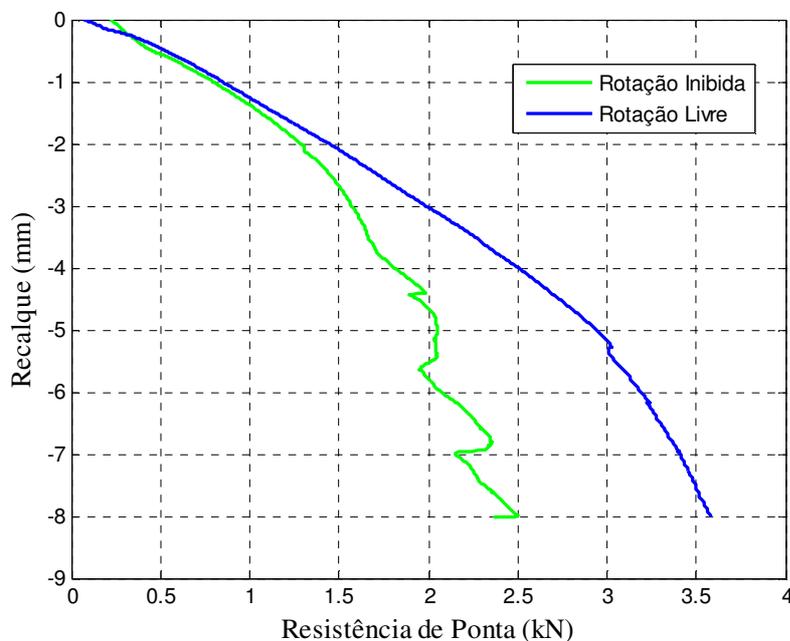


Figura 4.77 – Influência dos modelos com rotação livre e inibida na instalação nas curvas de resistência de ponta

Os resultados exibidos na figura anterior apresentam uma diferença de resistência final, com recalque de 8 mm, entre os dois modelos considerados. Esta diferença pode ser proveniente de diversos fatores, conforme pode ser observado pelos estados finais dos modelos gerados, expostos no Item 4.4.

A Figura 4.78, a seguir, apresenta o resultado da comparação entre os dois modelos para as curvas de resistência de fuste.

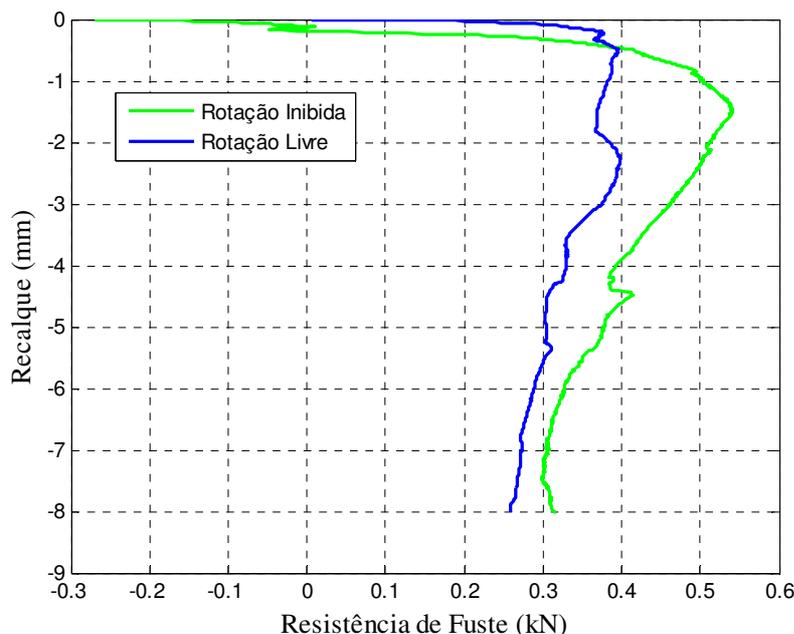


Figura 4.78 – Influência dos modelos com rotação livre e inibida na instalação nas curvas de resistência de fuste

Apesar de diferentes estados de tensões entre os dois modelos e de tensões residuais diferentes observadas, os valores das tensões normais às paredes do fuste das estacas, encontradas nos dois modelos antes do ensaio (Tabela 4.17), foram próximos, resultando em curvas parecidas de resistência de fuste.

Tabela 4.17 – Comparação da tensão horizontal média nas estacas dos modelos com e sem rotação livre antes da simulação de prova de carga

<i>Modelo</i>	σ_h média (kPa)
Rotação inibida	6,32
Rotação livre	6,58

Os dois modelos obtidos pela instalação da estaca na condição PL, apresentados no subitem 4.4.2.2, foram utilizados na simulação da prova de carga para a avaliação deste efeito nos resultados obtidos. Para tal, a simulação foi realizada na condição PR, no modelo com o processo de equilíbrio de forças também realizado nesta condição e nas condições PR e PL no modelo onde o equilíbrio de forças foi realizado na condição PL. As curvas de resistência obtidas a partir destas três simulações foram comparadas com as curvas do ensaio de referência a seguir.

A Figura 4.79 apresenta os resultados das comparações com as curvas de resistência de ponta. As 3 simulações realizadas no modelo com instalação na condição PL foram denominadas na figura a seguir pela condição de atrito utilizada, onde cada processo encontra-se separado por um hífen, na ordem: Instalação; Equilíbrio de forças, e; Prova de carga.

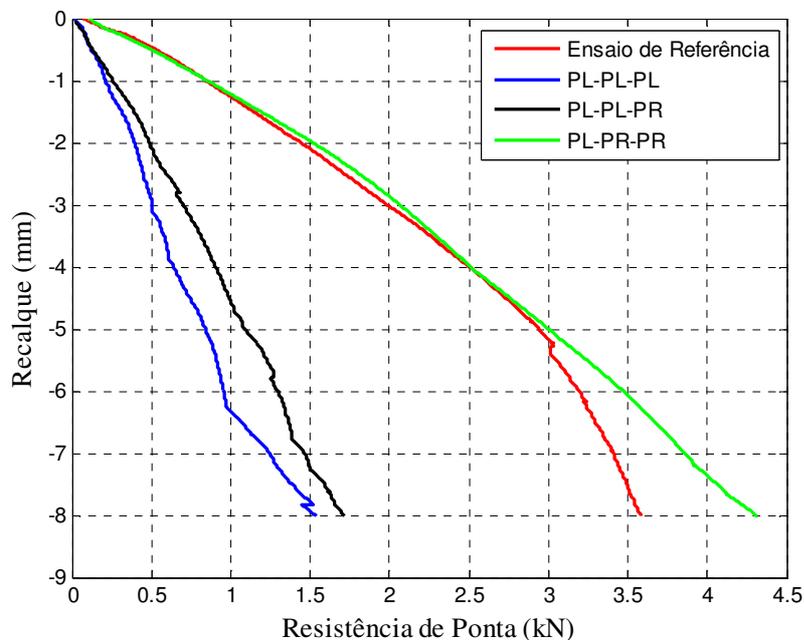


Figura 4.79 – Influência do atrito de instalação nas curvas de resistência de ponta

Os resultados da figura acima mostram que as duas simulações realizadas no modelo com equilíbrio de forças na condição PL apresentaram curvas semelhantes, indicando uma pequena diferença do atrito na resistência de ponta, coerente com os resultados apresentados na Figura 4.70. As curvas de resistência de ponta do modelo de referência e do modelo com equilíbrio de forças na condição PR também apresentam comportamentos bastante similares, indicando que as alterações no modelo geradas pela instalação da estaca na condição PL não influenciaram o resultado da resistência de ponta. Os resultados acima mostram que as propriedades do modelo, no processo de equilíbrio de força entre a estaca e a reação das partículas, têm grandes influências na curva de resistência de ponta.

A Figura 4.80, a seguir, apresenta os resultados de resistência de fuste, utilizando as mesmas denominações da Figura 4.79.

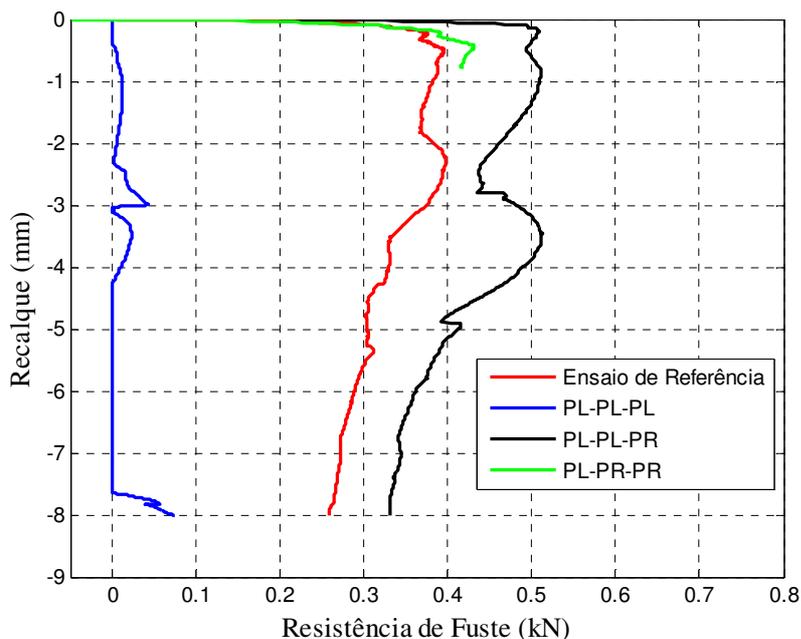


Figura 4.80 – Influência do atrito de instalação nas curvas de resistência de fuste

Os resultados da figura acima apresentam resultados próximos entre o modelo de referência e a curva PL-PL-PR. A curva PL-PR-PR apresentou o efeito de borda, discutido anteriormente, com deslocamentos pequenos, portanto mostrando resultados inconclusivos. No entanto a curva aparenta apresentar o início do pico de resistência entre as curvas PL-PL-PR e do ensaio de referência. Se este comportamento for comprovado, indicaria que nem a instalação e nem o equilíbrio de forças, realizados em condições diferentes de atrito, causam modificações, no modelo, suficientes para alterar os resultados de resistência de fuste, se o atrito for o mesmo nesta simulação, com as demais condições de simulação utilizadas.

O resultado da prova de carga realizada com atrito nulo entre a estaca e as partículas apresentou resultados de resistência de fuste quase constante, próximos à zero, condizente com sua condição.

Os demais fatores, investigados na instalação da estaca, não apresentaram diferenças significativas ou influências claras no comportamento das curvas e nos valores de resistência encontrados e foram condensados na Figura 4.81 e Figura 4.82, para a resistência de ponta e de fuste, respectivamente.

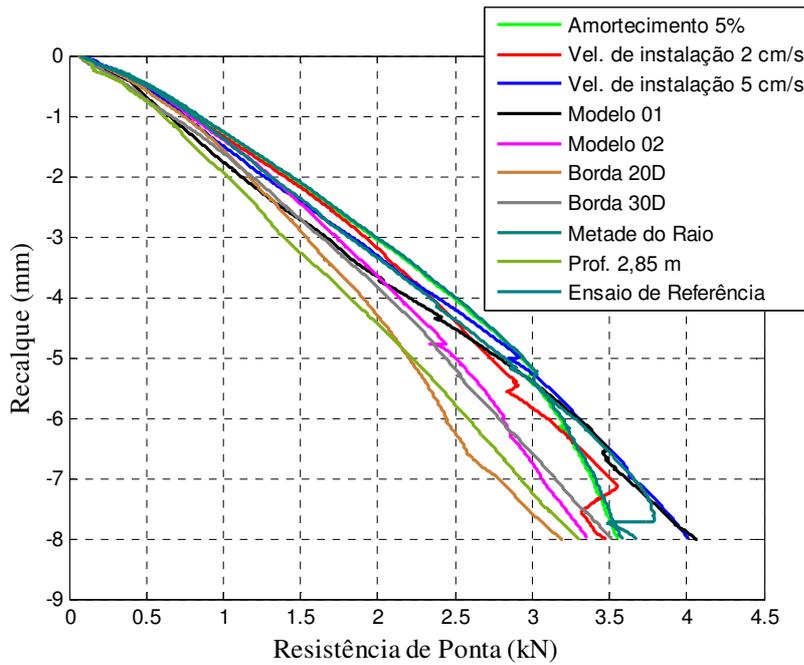


Figura 4.81 – Comparação dos demais fatores nas curvas de resistência de ponta

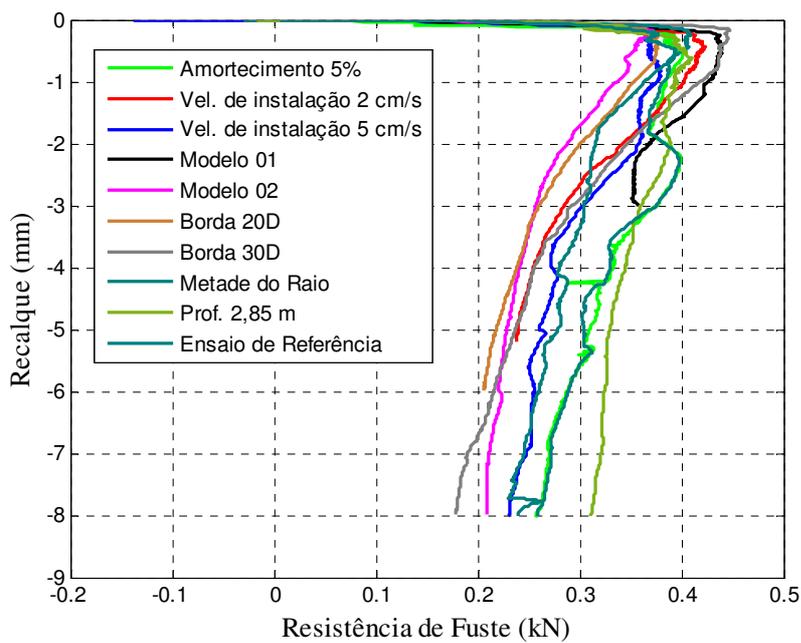


Figura 4.82 – Comparação dos demais fatores nas curvas de resistência de fuste

Os resultados apresentados nas figuras acima mostram comportamentos similares entre os fatores analisados e valores de resistência também similares, mas como uma certa variação, levando às seguintes conclusões:

- A variação de amortecimento de 70% para 5%, utilizando o ensaio de referência, apresentou efeitos negligenciáveis nos resultados das curvas de resistência, apesar das recomendações feitas por alguns autores (e.g. O'Sullivan, 2011 e Calvetti, Viggiani e Tamagnini, 2003).
- As variações de resistência, obtidas pela comparação dos modelos gerados pela instalação da estaca com diferentes velocidades, apresentam comportamentos bastante similares tanto na curva de resistência de ponta quanto na resistência de fuste, com diferenças de valores de resistência também negligenciáveis, menores do que 5%.
- A influência da geração dos modelos, com a instalação da estaca e prova de carga nas mesmas condições, também apresentam comportamentos similares nas curvas de resistência, com variações de até 10% nas curvas de resistência de ponta e até 8% nas resistências de fuste.
- A influência da distância de borda dos modelos de 20D e 30D apresentam algumas diferenças maiores, (na ordem de 15%), mas não mostram relação direta com o aumento da distância de borda. Com isso pode-se assumir que este fator não influencia na simulação de prova de carga no DEM e que as diferenças observadas seriam referentes às discrepâncias advindas da geração destes 3 modelos.
- Pode-se notar a influência negligenciável dos tamanhos de partícula utilizados nas curvas de resistência de ponta e fuste (variações máximas de 5%), mesmo com as pequenas diferenças na tensão horizontal inicial e orientação de contatos, observadas neste modelo. Estes resultados mostram que, para as condições ensaiadas numericamente, as relações B/d_{50} de 7,2 e 14,4 têm efeitos similares nas curvas de resistência, indicando que para qualquer valor de B/d_{50} maior que 7,2 os resultados esperados devem ser similares. De qualquer forma, o tamanho menor de partícula pode diminuir possíveis variações de resultados e efeitos de contorno, sendo, portanto mais indicado para simulações no DEM.

- A comparação das curvas de resistência destas simulações mostram variações de até 20% nas curvas de resistência de ponta e 16% na resistência de pico de fuste.

A análise visual das curvas de resistência de ponta dos ensaios apresentados neste item não mostraram comportamentos claros de ruptura generalizada, i.e. assíntotas verticais ou claras inflexões na curva. Por conta disso, foram selecionados alguns modelos para continuar a simulação até o recalque de 15mm, ou seja, 20% do diâmetro da estaca. Os modelos selecionados foram:

- Ensaio de referência
- Metade do Raio
- PL-PL-PL
- PL-PL-PR
- Amortecimento Local de 5%
- Ensaio com rotação livre
- Modelo com instalação sem rotação

A

Figura 4.83, a seguir, apresenta as curvas de resistência obtidas. O resultado da prova de carga no ensaio com rotação livre encontra-se apresentado na Figura 4.84, para uma melhor avaliação do formato da curva, devida à diferença de escala.

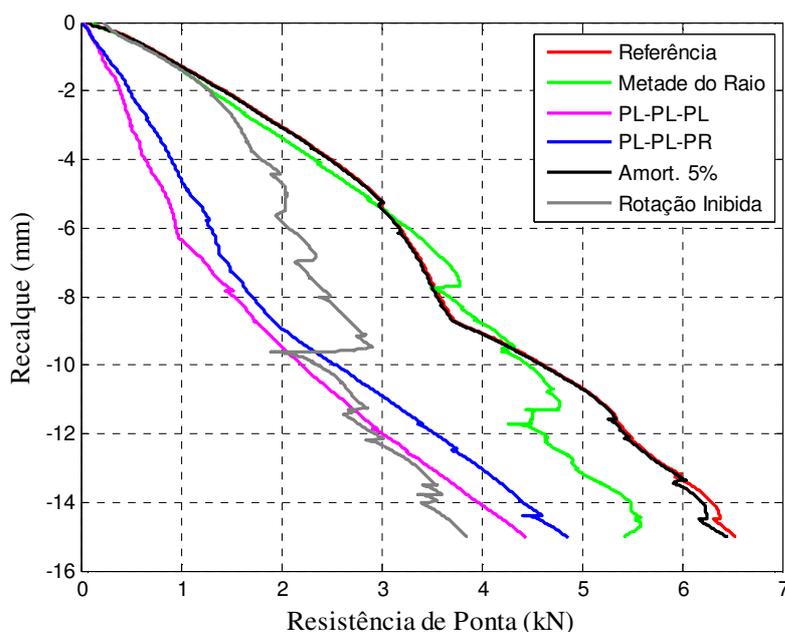


Figura 4.83 – Curvas de resistência de ponta - simulação de prova de carga até 15mm de recalque

Os resultados da figura acima, mostram que, mesmo com a simulação da prova de carga prosseguindo até o recalque de 15mm (20% do diâmetro da estaca), os modelos experimentaram um crescimento da resistência com a profundidade, sem o sinal de uma ruptura generalizada. A curva de resistência de ponta, obtida a partir do modelo com instalação na condição de rotação inibida, apresenta uma maior inflexão próximo ao recalque de 3mm, mas a partir deste ponto a curva mostra um aumento de resistência com o recalque, semelhante aos demais ensaios. Estes resultados, apesar de não apresentarem condições claras de ruptura, estão de acordo com os resultados discutidos por Fellenius (1999, 2014) que considera que não ocorre a ruptura generalizada na base de fundações profundas e que a resistência cresce continuamente com o recalque.

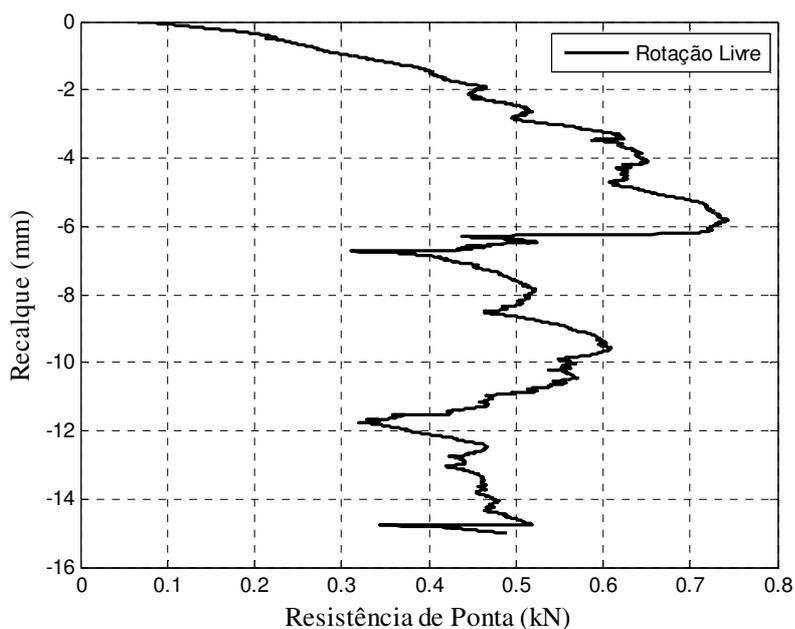


Figura 4.84 – Curva de resistência de ponta com rotação livre – 15mm de recalque

Diferente das demais curvas obtidas pela simulação da prova de carga com a rotação das partículas inibida, a curva apresentada na figura anterior mostra uma clara tendência de ruptura generalizada, apresentando uma tendência de valor constante de resistência a partir dos 6mm de recalque.

4.5.1.3

Análise do campo de deslocamento das partículas

Apesar de não ter sido verificada nenhuma tendência clara de ruptura generalizada nas análises do subitem anterior, exceto na simulação realizada na condição de rotação livre, a movimentação das partículas do modelo é necessária para permitir o deslocamento da estaca. Desta forma, os deslocamentos foram avaliados com o objetivo de observar este processo no DEM em duas dimensões, devida à simulação de prova de carga, assim como verificar algumas influências dos diferentes fatores considerados neste processo.

A avaliação dos deslocamentos das partículas do modelo foi realizada verificando separadamente o módulo de deslocamento dos vetores de deslocamento de cada partícula. Os modelos selecionados para esta análise foram os mesmos, dos quais

os resultados foram apresentados na

Figura 4.83, para os valores de recalque de 2 mm e 15 mm.

Os módulos de deslocamento foram avaliados de modo similar à Jiang, Yu e Harris (2006), subdividindo as partículas do modelo em 7 grupos de cores diferentes, com base no deslocamento máximo (D_{max}) obtido. Os deslocamentos foram contabilizados a partir do início da simulação da prova de carga. A escala de cores e os intervalos considerados nesta análise encontram-se apresentadas na Figura 4.85, a seguir.



Figura 4.85 - Escala de cores utilizada na avaliação do módulo de deslocamento

Na análise dos vetores de deslocamento, estes foram plotados apenas em partículas que apresentaram o módulo de deslocamento superior a um valor previamente definido. A definição deste valor foi realizada individualmente em cada modelo, sendo este obtido pelo menor valor antes do modelo apresentar

deslocamentos generalizados. Os vetores estão apresentados com as mesmas dimensões, independente do módulo.

Os resultados das análises de deslocamento dos ensaios de Referência, PL-PL-PL, Rotação inibida na instalação e rotação livre na prova de carga estão apresentados, a seguir, na Figura 4.86, Figura 4.87, Figura 4.88 e Figura 4.89, respectivamente.

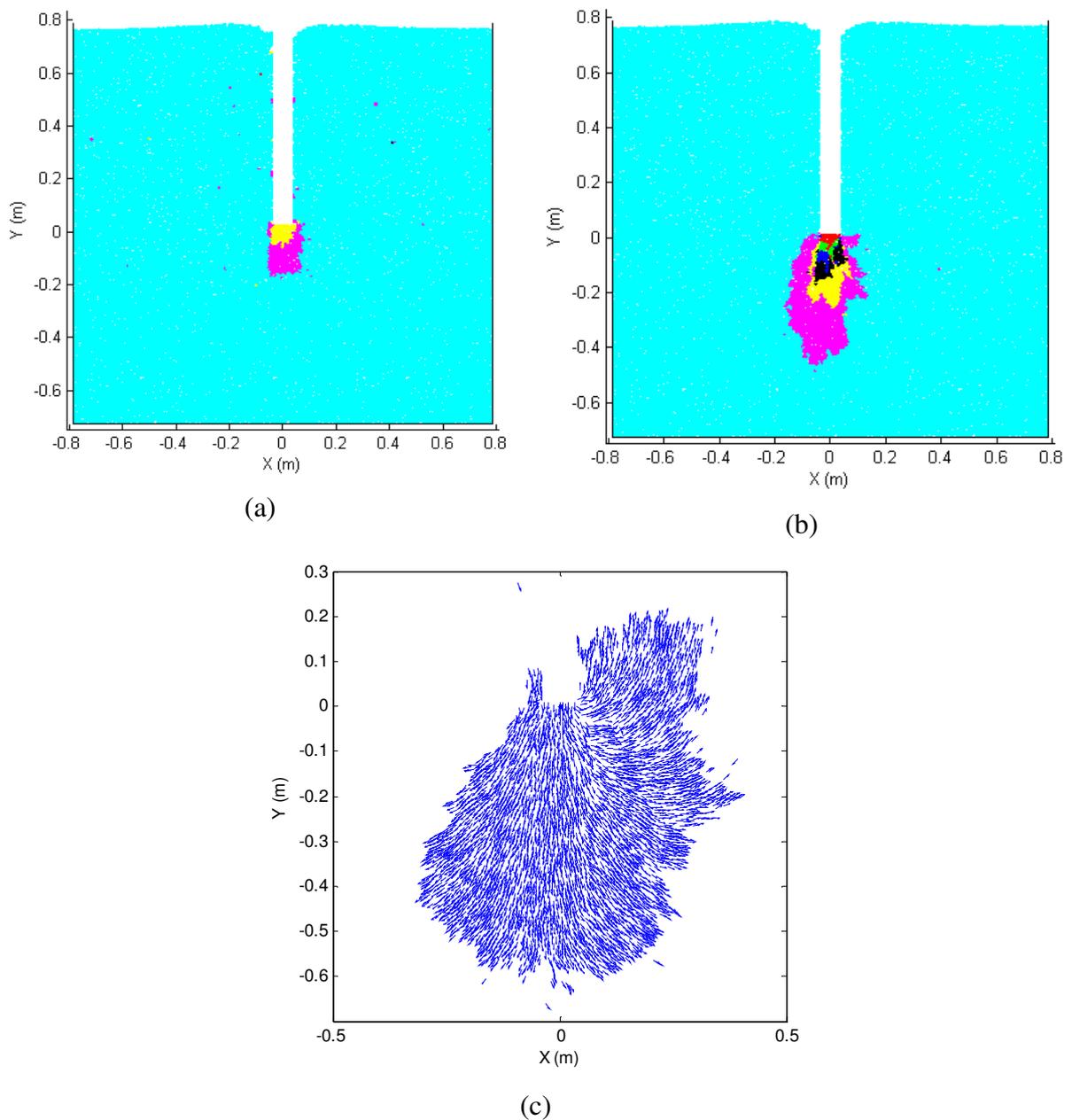


Figura 4.86 - Avaliação dos deslocamentos do Ensaio de Referência (a) Módulo de deslocamento 2mm (b) Módulo de deslocamento 15mm (c) Vetor de deslocamento 15mm

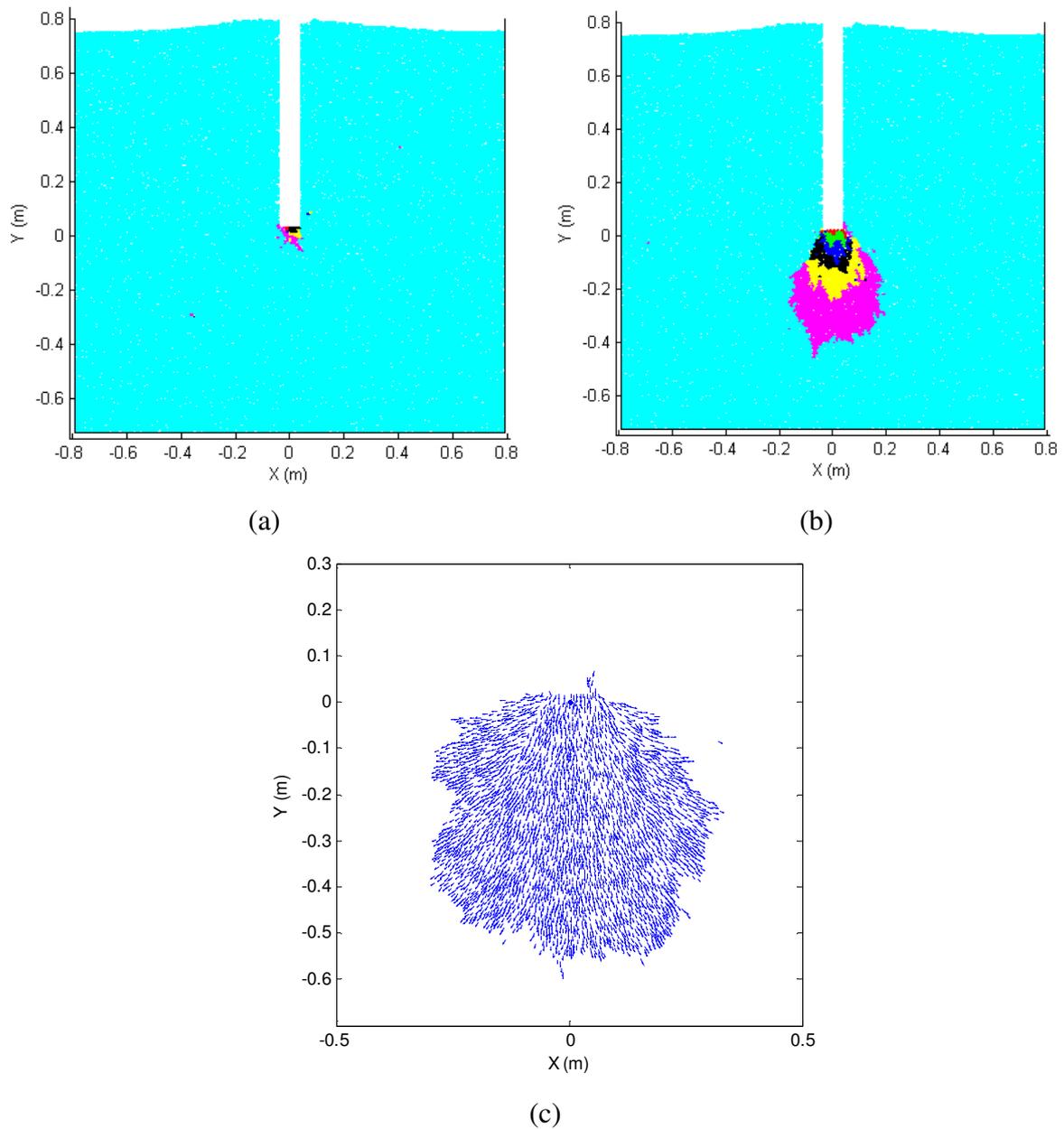


Figura 4.87 - Avaliação dos deslocamentos do ensaio PL-PL-PL (a) Módulo de deslocamento 2mm (b) Módulo de deslocamento 15mm (c) Vetor de deslocamento 15mm

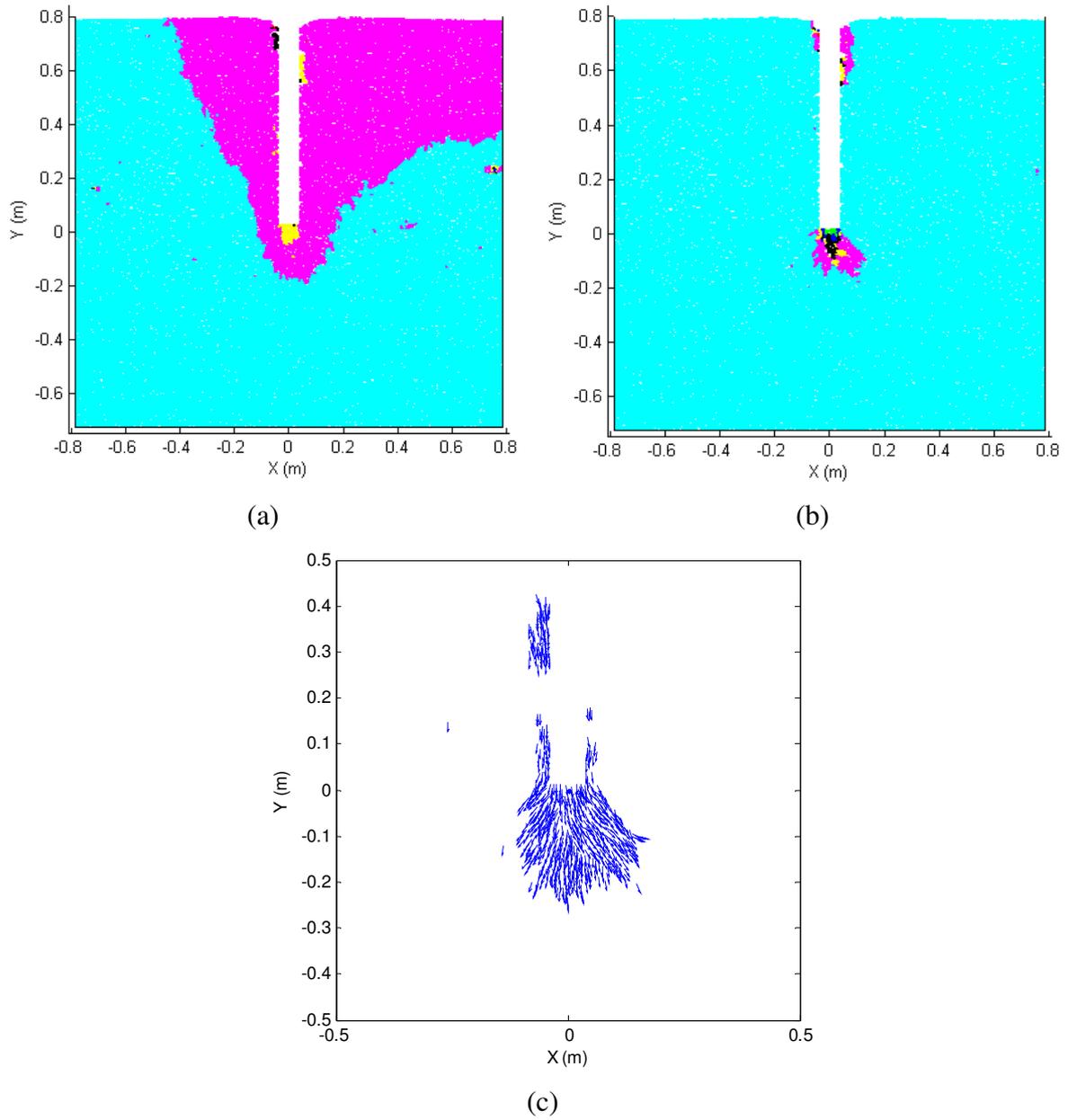


Figura 4.88 - Avaliação dos deslocamentos do modelo com rotação inibida na instalação(a) Módulo de deslocamento 2mm (b) Módulo de deslocamento 15mm (c) Vetor de deslocamento 15mm

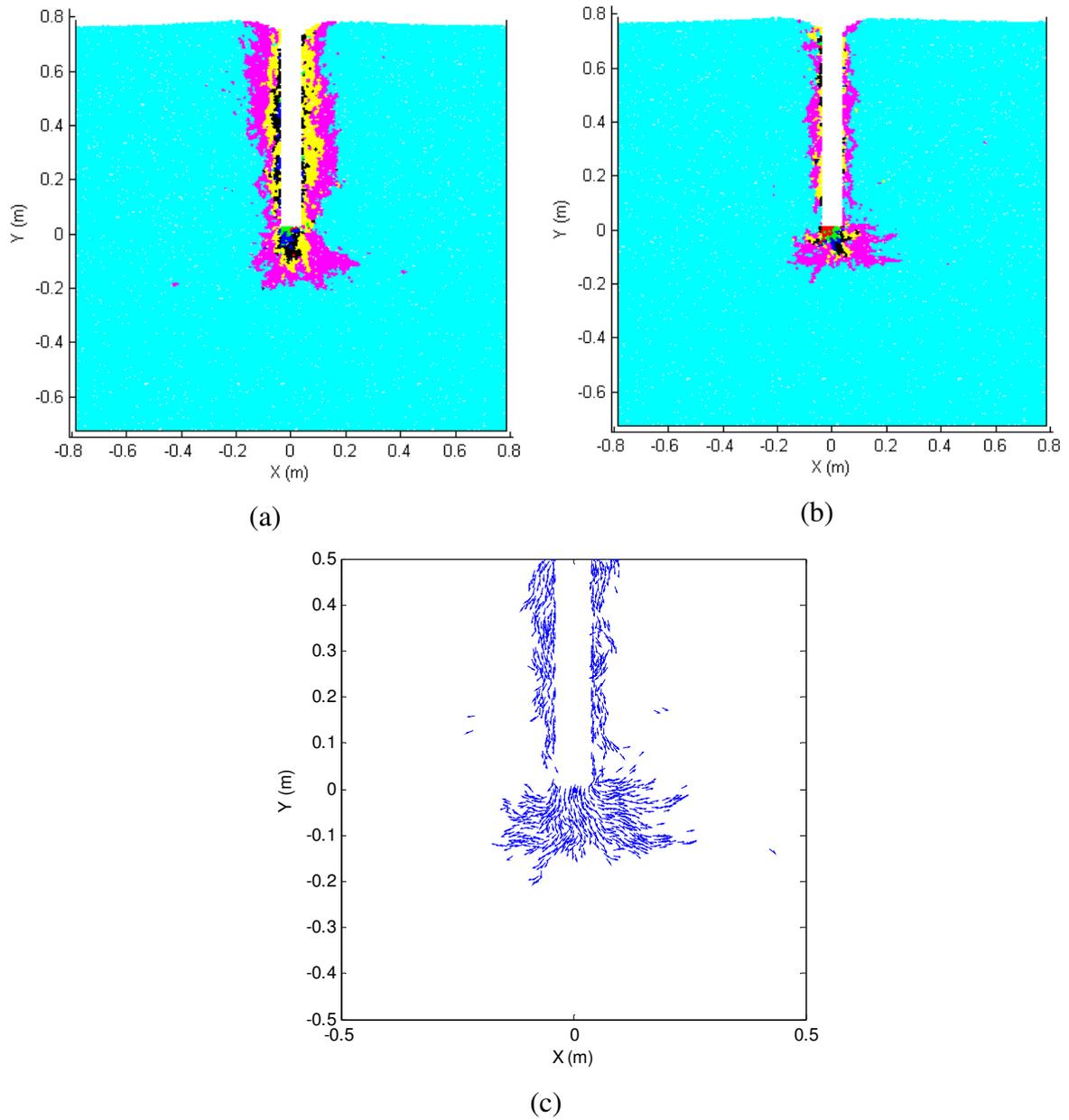


Figura 4.89 - Avaliação dos deslocamentos do ensaio com rotação livre (a) Módulo de deslocamento 2mm (b) Módulo de deslocamento 15mm (c) Vetor de deslocamento 15mm

Os resultados apresentados nas figuras anteriores mostram diferenças claras nos campos de deslocamento entre os recalques de 2mm e 15mm, para as diferentes simulações investigadas. Os vetores apresentados foram obtidos com deslocamentos maiores do que $D_{\max}/14$, $D_{\max}/15$, $D_{\max}/14$, $D_{\max}/7$ para as simulações no ensaio de referência, no ensaio PL-PL-PL, no modelo com instalação com rotação inibida e no ensaio com rotação livre, respectivamente.

O ensaio PL-PL-PL apresentou a mesma configuração de vetores de deslocamento até o deslocamento de $D_{\max}/80$, indicando que na simulação na condição Perfeitamente Lisa, virtualmente todos os deslocamentos estão restritos à configuração apresentada. Os demais modelos apresentaram deslocamentos menores ao longo de todo o arranjo de partículas.

Pela forma de avaliação realizada pode-se concluir que, nas condições utilizadas, todas as simulações de prova de carga concentram grande parte de seus deslocamentos limitados às partículas abaixo da estaca.

Os modelos PL-PL-PR, amortecimento 5% e Metade do raio apresentaram campos de deslocamento quase análogos aos obtidos para o ensaio de referência.

4.5.2 Estaca Flexível

A simulação numérica da prova de carga com a "estaca flexível" foi realizada simulando a estaca como um elemento contínuo, por uma malha de elementos finitos. Isto foi possível pelo auxílio do programa UDEC, de diferenças finitas, e pelo acoplamento mecânico entre os programas UDEC, simulando a estaca, e PFC2D, simulando o aglomerado de partículas.

A estaca no programa UDEC, foi modelada como um bloco de 3,5 m de altura e 0,075m de largura correspondendo aos valores de altura e diâmetro da estaca utilizada no experimento de Bernardes (1989). O modelo constitutivo elástico-linear foi empregado no modelo do UDEC para simular o comportamento da estaca, com as propriedades elásticas da liga de alumínio utilizada e descrita em Bernardes (1989), i.e. $E=70\text{GPa}$ e $\nu=0,33$. Foram aplicadas condições de contorno de deslocamento horizontal nulo em alguns pontos próximos ao topo da estaca, de forma a garantir a verticalidade da mesma nas simulações. A malha utilizada no programa UDEC, assim como a condição de contorno utilizada, pode ser observada em parte da estaca apresentada na Figura 4.90, a seguir.

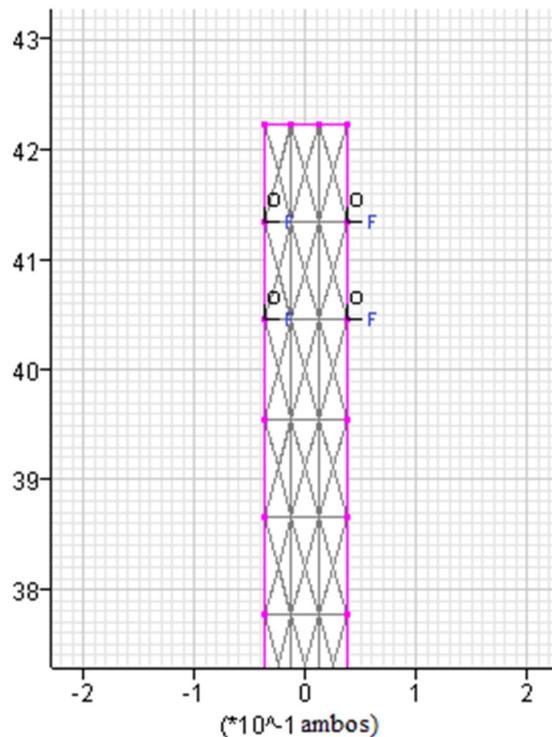


Figura 4.90 - Malha do programa UDEC

Os programas PFC2D e UDEC são explorados pela Itasca co. e ambos tem configurações paralelas e funções *socket I/O (input/output)* que permitem a troca de informações entre outros programas durante as simulações, possibilitando o acoplamento. Para a realização do acoplamento mecânico é necessário que ambos os programas funcionem com o mesmo passo de tempo. O processo de acoplamento mecânico entre os dois programas pode ser descrito como se segue:

1. O modelo é inicializado no programa UDEC e a localização dos nós é transmitida ao programa PFC para a construção da estaca no local da estaca rígida previamente excluída;
2. As velocidades nodais do UDEC (inicialmente nulas) são enviadas ao PFC onde é realizado um ciclo de cálculo e são obtidas as forças atuantes nas paredes da estaca, posteriormente transmitidas aos nós do UDEC como condição de contorno;
3. As forças nodais transmitidas pelo PFC são obtidas pelo UDEC e é realizado um ciclo de cálculo, transmitindo as velocidades nodais dos contornos do modelo para as paredes da estaca no PFC;

4. São repetidos os passos 2 e 3 para o próximo ciclo de cálculo, que só começa após ser recebida a nova informação do programa acoplado.

Para as simulações de prova de carga realizadas com acoplamento mecânico, a estaca foi criada no mesmo local da estaca rígida posterior à instalação, i.e. profundidade de 700mm. Após a criação da estaca nos dois programas, foram realizados ciclos de cálculo para que os dois modelos chegassem ao equilíbrio, só depois de atingida essa condição foi iniciada a simulação do ensaio de prova de carga, com a velocidades constante de 5mm/s aplicada no topo da estaca.

Como o passo de tempo do PFC2D pode experimentar pequenas modificações a cada ciclo de cálculo, foi necessário aplicar uma função, convocada a cada ciclo, para garantir a utilização do mesmo passo de tempo em cada programa.

Com a configuração utilizada no modelo do UDEC, foi obtido o valor de $1,519 \times 10^{-7}$ segundos para o passo de tempo, quase duas ordens de grandeza menor do que o passo de tempo médio das simulações do PFC2D, de $1,53 \times 10^{-5}$ segundos. Desta forma as simulações acopladas necessitaram de um tempo computacional bem superior para serem realizadas, conforme apresentado na Tabela 4.18, a seguir.

Tabela 4.18 – Comparação do tempo computacional da simulação de prova de carga considerando o acoplamento

Prova de carga	Tempo médio de simulação
Acoplada	7 dias
Desacoplada	1 hora

Esta diferença de tempo, apresentada na tabela acima, pode ser explicada não só pela diferença entre os passos de tempo dos dois programas, mas também pelo processo de acoplamento e pelos ciclos de cálculo necessários para se alcançar o equilíbrio inicial entre os programas.

Por conta do tempo excessivo gasto na simulação acoplada, foram realizadas apenas duas simulações de prova de carga, nas quais foi utilizado o modelo de referência do Item 4.4. Na primeira o equilíbrio de forças antes da prova de carga foi realizado com a estaca rígida e na segunda o equilíbrio de forças foi realizado já no modelo acoplado.

4.5.2.1

Apresentação dos resultados

Neste subitem serão avaliados os comportamentos das curvas de resistência dos modelos acoplados, em comparação ao ensaio de referência com estaca rígida, para avaliar a influência da simulação acoplada nos resultados da prova de carga. Além deste aspecto, será avaliado também a compressão da estaca e as resultantes de velocidade e força, ao longo da simulação para averiguar a validade do acoplamento mecânico.

A Figura 4.91, a seguir, apresenta os resultados de ponta e de fuste das duas formas de simulação acoplada em conjunto com o resultado obtido com a estaca rígida.

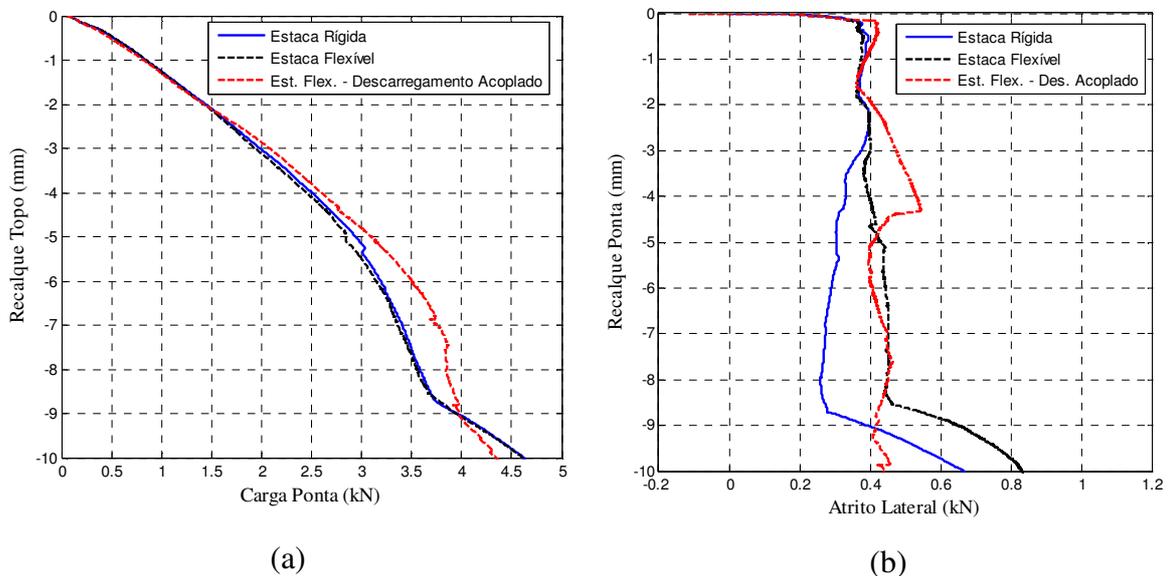


Figura 4.91 - Curvas de resistência com acoplamento mecânico (a) Resistência de ponta (b) Resistência de fuste

A curva de resistência de ponta apresentada na Figura 4.91(a), mostra uma boa concordância entre os resultados da estaca rígida e da estaca flexível, onde o equilíbrio de forças foi realizado antes do acoplamento, o que é de se esperar, devido ao alto valor de rigidez utilizado na estaca (i.e. 70 GPa).

O resultado da simulação de prova de carga com o equilíbrio de forças acoplado apresentou pequenas diferenças na curva de resistência de ponta. Isto ocorreu, possivelmente, por alterações no modelo de elementos discretos, próximo à ponta da estaca, obtidas pela diferença no processo de equilíbrio de forças.

As curvas de resistência de fuste das duas simulações acopladas não apresentaram redução da resistência após a resistência de pico, diferentemente da estaca rígida.

A Figura 4.92 abaixo apresenta as curvas de compressão das duas simulações com acoplamento mecânico, obtidas pela diferença de deslocamento entre topo e base das estacas.

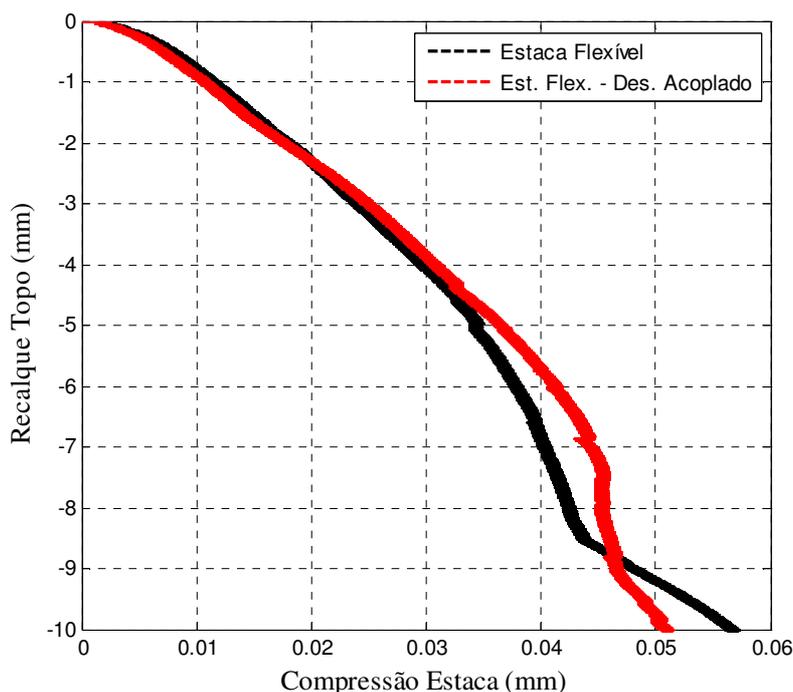


Figura 4.92 - Curvas de compressão da estaca

Para avaliar os resultados da figura acima, a compressão foi analisada como uma coluna submetida somente a esforços axiais, se utilizando da equação (4.6) abaixo.

$$\Delta l = \frac{F_a L}{EA} \quad (4.6)$$

Onde Δl é a compressão calculada da estaca, L é o comprimento total da estaca, igual a 3,5m, E é o módulo de rigidez de 70 GPa, utilizado nas análises, A é a área transversal de 0,004418 m² e F_a é a força axial.

Se for considerada, como exemplo, a condição na estaca a 4mm de recalque e utilizada F_a como a força axial na ponta da estaca, obtida, de 2,5kN, a compressão seria de 0,028 mm, próximo ao valor de 0,03 mm obtido. Esta proximidade da ordem de grandeza ajuda a validar a simulação acoplada, onde para obter o mesmo valor de compressão, o fenômeno de transferência de carga ao longo da estaca, nas condições 2D e 3D equivalente, deve ser melhor avaliado.

A Figura 4.93, a seguir, apresenta os resultados das resultantes de velocidade e força verticais entre topo e base na estaca para avaliar a condição quasi-estática da simulação acoplada, considerando a velocidade de ensaio utilizada.

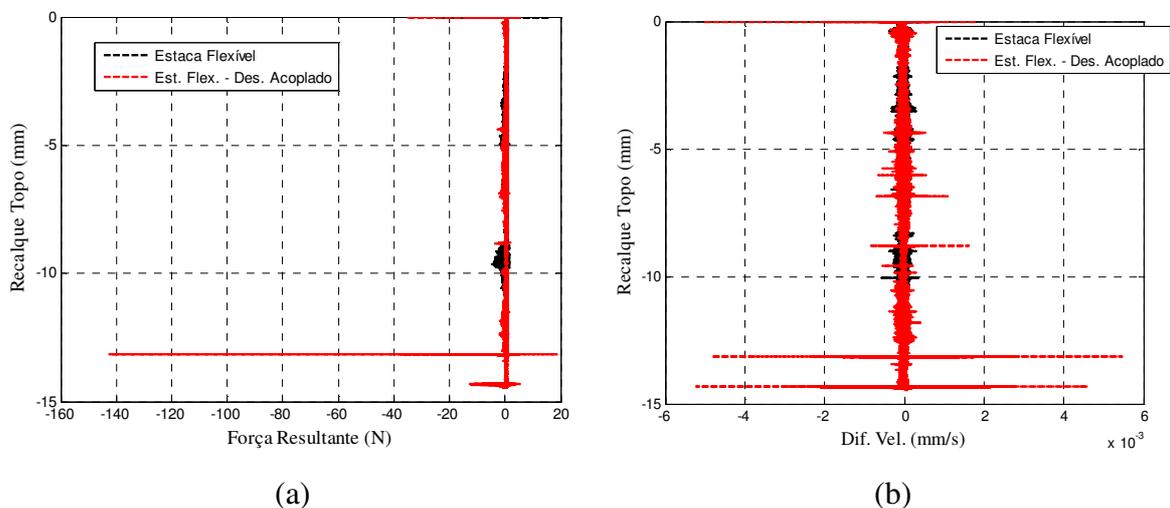


Figura 4.93 – Análise da condição quasi-estática (a) Força vertical resultante (b) Diferença entre as velocidades de topo e base

Os resultados apresentados na figura acima mostram resultantes próximas a 0 com valores muito abaixo às forças axiais obtidas na simulação e à velocidade utilizada, indicando uma condição quasi-estática satisfatória, verificada também pela proximidade das curvas de resistência de ponta.

4.5.3 Considerações gerais

A partir dos resultados apresentados e discutidos neste item, é possível fazer as seguintes considerações gerais:

- As diferentes velocidades utilizadas nas simulações de prova de carga apresentaram pouca influência na resistência de ponta, mas mostraram um aumento de resistência com o aumento da velocidade, coerente com a relação esperada entre aumento da força dinâmica e o aumento de velocidade. O mesmo não ocorreu com a resistência de fuste, apresentando picos de resistência com reduções mais rápidas quanto maior a velocidade de simulação. Na resistência de fuste foram também observadas reduções nos valores de pico, enquanto que, no trecho final da curva, a velocidade pareceu não apresentar efeitos significativos. As razões por de trás desta diferença devem ser melhor investigadas.

- O formato da curva de resistência de ponta no ensaio de referência apresentou comportamentos diferentes da curva obtida por Bernardes (1989) para a mesma profundidade de ensaio. No entanto, a curva numérica mostra um comportamento próximo aos demais ensaios realizados experimentalmente.

- Foi observada uma concordância na ordem de grandeza dos valores de resistência de ponta obtidos numericamente com o ensaio experimental. Este resultado mostra que a calibração realizada, a partir de ensaios biaxiais, resultou em valores próximos de resistência de ponta, mesmo com as restrições de duas dimensões já descritas.

- A comparação da curva de resistência de fuste com a curva experimental apresentou diferenças tanto no formato quanto na ordem de grandeza nos valores obtidos. Uma suposição a respeito desta diferença de valores seria devida às condições de duas dimensões impostas por esta forma de simulação e deve ser futuramente investigada, no entanto, os valores de K_s (1,18) e δ (21°), obtidos não estão muito distantes dos valores encontrados na bibliografia.

- A análise da tensão horizontal em contato com a estaca, após a simulação de prova de carga, apresentou o crescimento desta na condição de rotação livre, enquanto a simulação com rotação inibida mostrou o decréscimo da tensão normal ao fuste. Esta análise indica uma concordância da condição de rotação livre com os valores obtidos experimentalmente por Lehane e White (2005) e justifica a diferença de formato entre as duas curvas de resistência de fuste, obtidas numericamente.

- Os resultados de resistência de fuste apresentadas nas simulações dos modelos com estacas escavadas e das simulações de variação do fator de atrito mostraram claras e diretas relações da resistência de pico com as tensões horizontais antes de ensaio e com o ângulo de atrito entre estaca e partículas. Estas dependências observadas estão de acordo com as soluções analíticas apresentadas no Item 2.1.

- As resistências de ponta obtidas a partir das duas formas de instalação utilizadas, por velocidade constante e retirada de partículas, apresentaram relações próximas às esperadas e observadas na prática, onde foi verificado um recalque maior para uma mesma mobilização da resistência de ponta.

- A influência das cargas residuais pôde ser claramente analisada pela comparação dos resultados nos modelos onde a estaca foi instalada na condição Perfeitamente Lisa. A utilização de diferentes atritos no processo de equilíbrio de forças apresentou pequenas alterações no modelo e grandes diferenças nas tensões residuais, o que implicou diretamente no formato e valores da curva de resistência de ponta. Através dessa análise foi observada a importância das tensões residuais e do processo de equilíbrio de forças na simulação de prova de carga estática com o Método dos Elementos Discretos em 2D. Os resultados de fuste obtidos nestas simulações se mantiveram razoavelmente próximos.

- As resistências de ponta nas simulações realizadas até o recalque de 20% do diâmetro, apresentadas na

Figura 4.83 e Figura 4.84, mostrou um contínuo aumento da resistência com o recalque, para todas as simulações realizadas com rotação inibida. As maiores inflexões nas curvas destas simulações foram observadas nos modelos com partículas menores e com a instalação realizada inibindo as rotações. A simulação realizada na condição de rotação livre mostrou uma clara tendência de ruptura,

com um pico de resistência, próxima ao recalque de 6 mm, e valores de resistência quase constantes para recalques maiores.

- A análise nos campos de deslocamento mostrou que a simulação de 15 mm de recalque na condição de rotação livre apresenta uma clara diferença de direção de deslocamentos entre as partículas logo abaixo da ponta, indicando a formação da cunha abaixo da ponta, coerente com a maioria dos modos de ruptura teóricos. A simulação no modelo com instalação na condição de rotação inibida, mostrou um comportamento similar nas direções dos deslocamentos. A zona formada pelos maiores deslocamentos de partículas destas duas simulações se assemelha ao formato de superfície de ruptura de Vesic (1975) e Janbu (1976) *Apud*. Bernardes (1989).

- Os demais campos de deslocamento apresentaram condições similares entre si, apresentando movimentos concentrados abaixo da ponta da estaca e direções ascendentes de algumas partículas próximas a base, no ensaio de referência e nas simulações com 5% do amortecimento e com partículas menores. A prova de carga na condição perfeitamente lisa apresentou módulos de deslocamentos próximos aos demais, mas virtualmente todos os deslocamentos produzidos por este ensaio se limitam à região abaixo da estaca.

- As análises de prova de carga com acoplamento mecânico se mostraram válidas através das comparações das curvas de resistência obtidas com as curvas da estaca rígida, além da ordem de grandeza da deformação elástica medida e das resultantes de força e velocidade.