

5. Apresentação e discussão dos resultados

5.1. Caracterização geotécnica do conglomerado

Segundo a classificação da JGS (Osada *et al.*, 2005), a resistência dos maciços rochosos brandos rudílicos (por exemplo: os conglomerados) é governada pelas características da matriz e dos blocos imersos nela. Por isso, foi desenvolvida uma campanha de caracterização que incluiu as propriedades índice, resistência e deformabilidade de cada um dos materiais que compõem o conglomerado, com o principal objetivo de obter os insumos necessários para realizar sua modelagem numérica na escala de campo. Em seguida são apresentados os resultados da caracterização geotécnica do conglomerado, realizada com base nas investigações, ensaios e métodos descritos no item 4.4.

5.1.1. Matriz

A divisão entre os grãos do conglomerado para serem considerados matriz ou blocos depende do contexto da análise. Neste trabalho foram consideradas como parte da matriz do conglomerado todas as partículas menores de 32 mm, utilizando-se para realizar esta divisão as características das amostras testadas no laboratório, e o limite de tamanho de bloco máximo propostos por Medley (1994b).

5.1.1.1. Análise granulométrica

O estudo granulométrico, em peso, das partículas entre 32 mm e 75 μm (peneira 200) foi realizado no local da barragem e no local do afloramento (Figura 5.1). No local do afloramento, a distribuição de frequência observada é de tipo unimodal, com a moda entre 32 mm e 16 mm. No local da barragem a distribuição é de tipo bimodal, com uma primeira moda entre 32 mm e 16 mm, e uma segunda moda (com uma frequência muito menor que a primeira moda) entre

0,5 mm e 0,25 mm. Segundo a distribuição de frequência por peso do tamanho das partículas (Tabela 5.1), a matriz pode ser classificada como um conglomerado fino (Tucker, 2001).

Tabela 5.1 – Distribuição granulométrica, em peso, das partículas menores de 32 mm da matriz do conglomerado.

Classe	Diâmetro partícula	Local Barragem	Local Afloramento
Seixo – Cascalho	32 mm – 2 mm	68	70
Areia grossa-média	2 mm – 500 μm	13	3
Areia fina	500 μm – 63 μm	12,1	3,6
Silte – Argila	< 63 μm	6,9	23,4

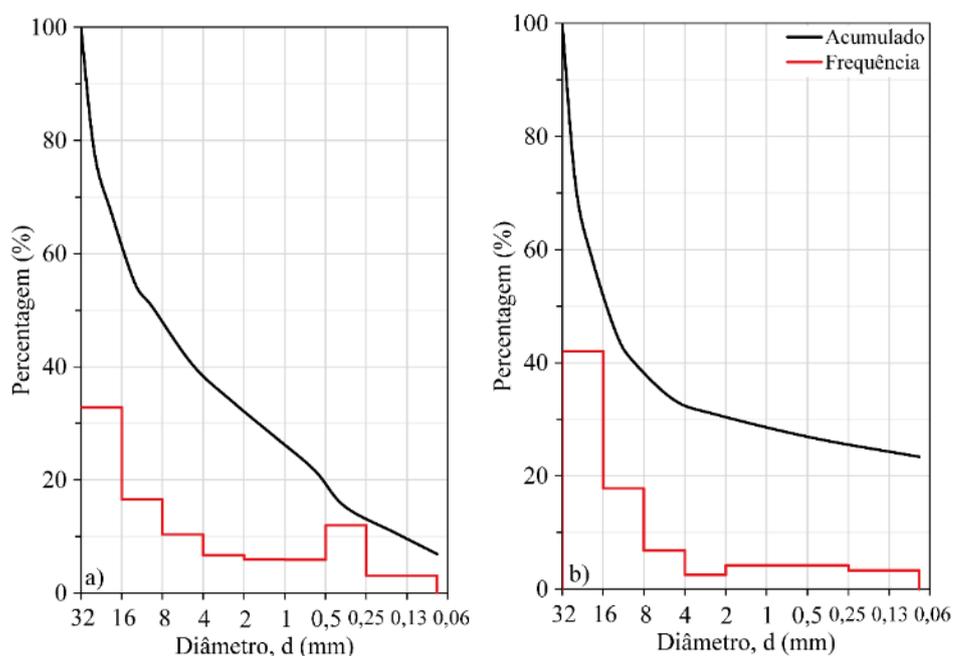


Figura 5.1 – Distribuição granulométrica (em peso) das partículas menores de 32 mm. (a) Local da barragem. (b) Local do afloramento.

O estudo detalhado da fracção fina da matriz, em volume, foi realizado utilizando o método de difração de raios laser. Por intermédio desta análise observou-se como a maior parte das partículas passada pela peneira número 40 corresponde à silte e à areia fina (Tabela 5.2). Além disso, foi possível notar como a distribuição das partículas apresenta múltiplas modas, especificamente para diâmetros de partícula menores que 100 μm ; a distribuição de frequência apresenta o mesmo comportamento nos dois locais estudados, com duas modas em 10 μm e 0,3 μm (Figura 5.2).

Tabela 5.2 – Distribuição granulométrica, em volume, das partículas menores de 425 μm (peneira No. 40) da matriz do conglomerado.

Classe	Diâmetro partícula (μm)	Percentagem acumulado	
		Local Barragem	Local Afloramento
Areia grossa	> 250	19,6	7,6
Areia fina	250-63	36,6	33,6
Silte	63-4	37,2	50,3
Argila	< 4	6,6	8,5

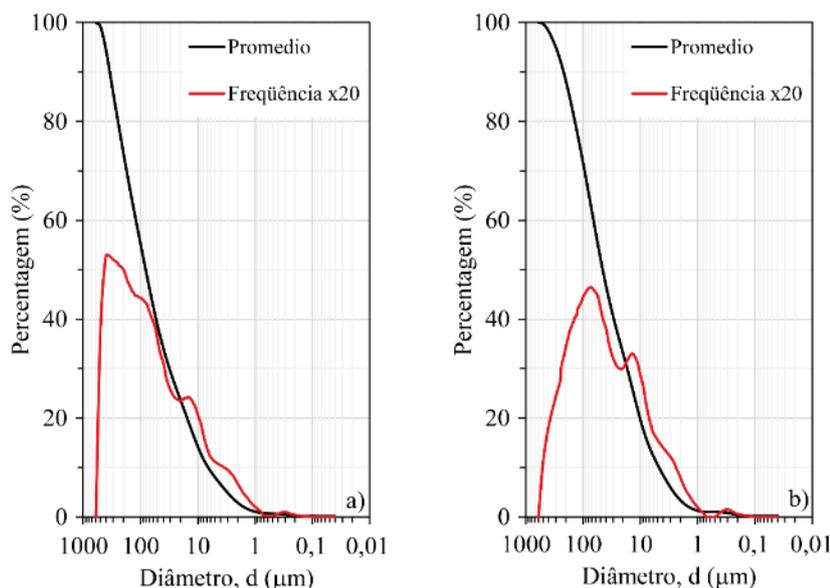


Figura 5.2 – Distribuição granulométrica (em volume) das partículas passando a peneira No. 40. (a) Local da barragem. (b) Local do afloramento.

5.1.1.2. Análise petrográfica

Através da análise petrográfica do conglomerado foi possível determinar que os grãos menores a 10 mm são compostos geralmente por lavas andesíticas, com formas angulosas e até subarredondadas. Do mesmo modo, foram observados minerais argilosos (em média 15% da área das amostras) ao redor dos grãos de origem vulcânica (Figura 5.3). Nenhum outro material cimentante diferente das argilas foi identificado nas amostras analisadas na petrografia.

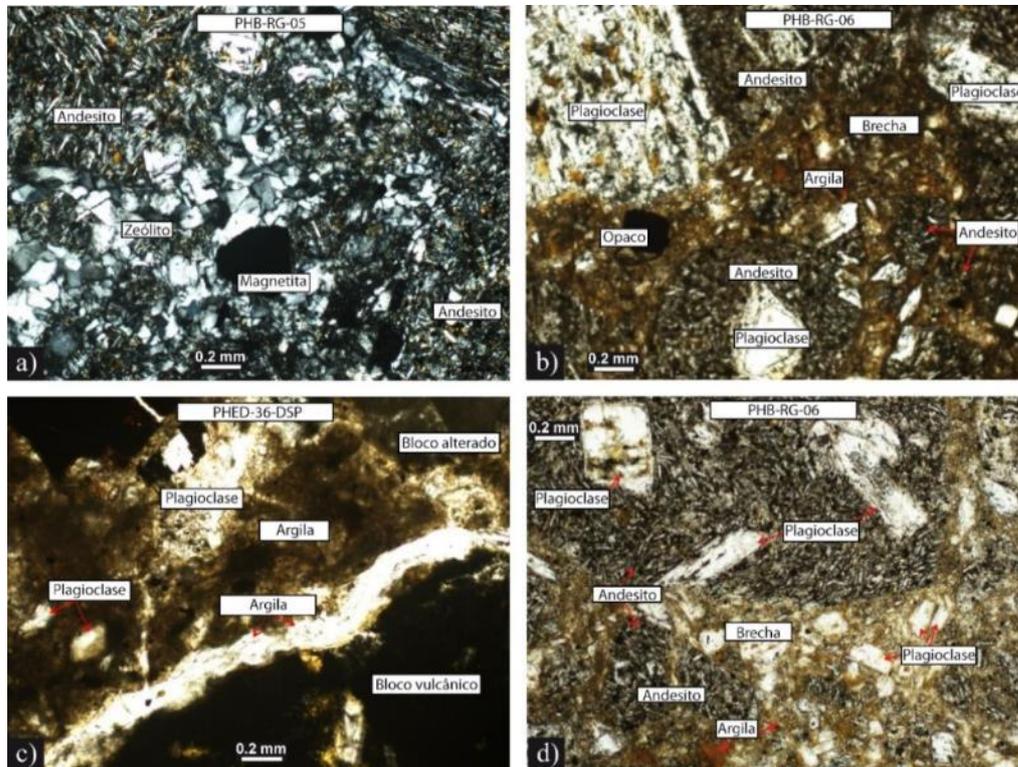


Figura 5.3 – Petrografia realizada na matriz do conglomerado. (a) Amostra obtida no furo de sondagem PHB-RG-05. (b) e (d) Amostras obtidas no furo de sondagem PHB-RG-06. (c) Amostra obtida no furo de sondagem PHED-36-DSP.

5.1.1.3.

Peso específico seco, Absorção, Porosidade interconectada e Permeabilidade

O peso específico seco (γ_d), a absorção (Abs) e a porosidade interconectada (n_e) da matriz foram estudados por meio de ensaios de laboratório realizados em amostras recuperadas no local da barragem e no local do afloramento (Tabela 5.3). Os resultados de densidade e porosidade interconectada obtidos dos ensaios são típicos para rochas de grão médio, pouco compactas e cimentadas, como, por exemplo, arenitos ou tufos vulcânicos (González *et al.*, 2002).

Tabela 5.3 – Estatística descritiva do peso específico seco, absorção e porosidade interconectada da matriz do conglomerado.

Estatística	γ_d (kN/m ³)	Abs (%)	n_e (%)
Número de dados	257	148	15
Mínimo	17,4	5,0	10,6
Máximo	23,1	16,0	34,6
Intervalo	5,7	11,0	24,0
Primeiro quartil	20,0	7,0	16,6
Terceiro quartil	22,1	11,6	29,8
Mediana	21,4	8,83	25,6
Média	21,0	9,41	23,2
Desvio padrão	1,37	2,71	7,88
Coefficiente de variação (%)	6,5	28,8	34

Nos dados analisados foi observada a lógica tendência decrescente unidirecional existente entre a absorção (ou a porosidade) e o peso específico seco (Figura 5.4).

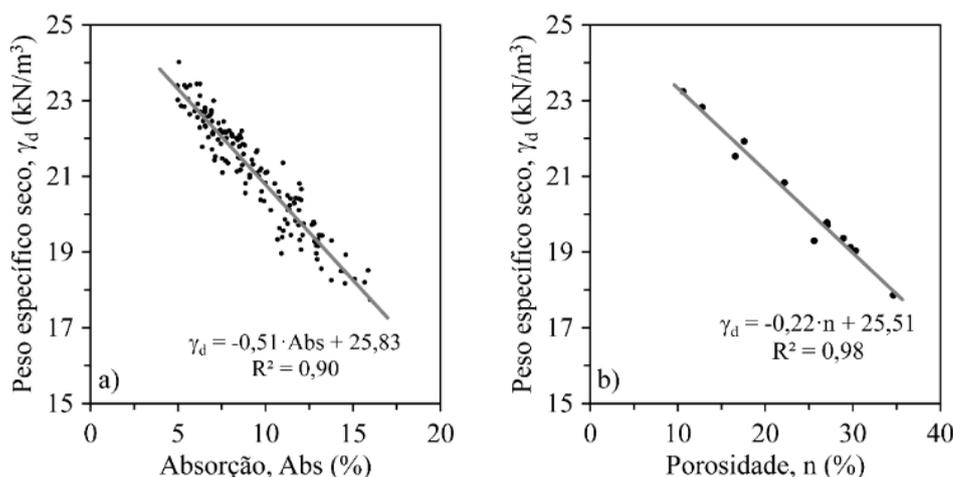


Figura 5.4 – Relação entre o peso específico seco da matriz do conglomerado e: (a) Absorção. (b) Porosidade interconectada.

Através dos gráficos de absorção e peso específico seco contra a elevação (Figura 5.5) foi possível observar a inexistência de uma tendência geral dos parâmetros analisados com a profundidade. Resultado que pode ser explicado pela presença de múltiplas camadas de deposição e a grande variedade de propriedades no interior de cada uma das diferentes camadas.

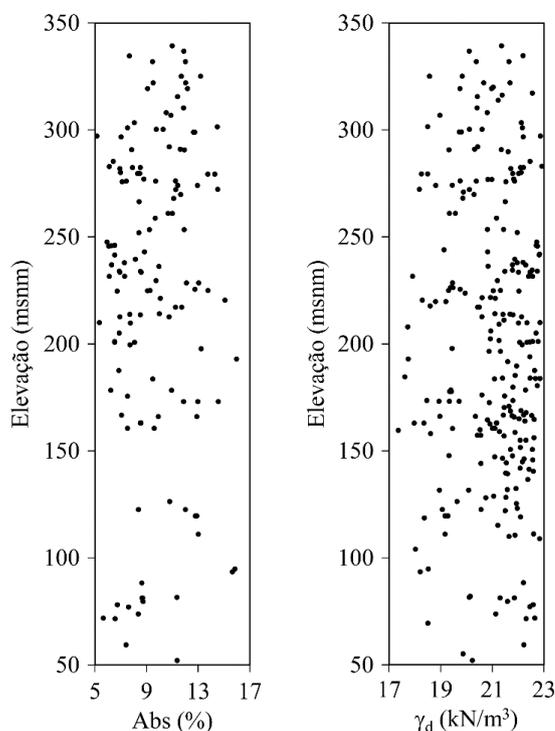


Figura 5.5 – Variação das propriedades da matriz do conglomerado com a profundidade: (a) Absorção. (b) Peso específico seco.

O estudo da geometria dos poros interconectados da matriz do conglomerado foi feito por meio de ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio, realizados em duas amostras recuperadas no local do afloramento. Observa-se como a maior parte dos poros interconectados na matriz do conglomerado (aproximadamente o 70 por cento dos poros) apresentam diâmetros menores de $0,1 \mu\text{m}$ (microporos).

A distribuição dos poros nas duas amostras testadas é do tipo bimodal, com uma primeira moda no intervalo dos microporos com um diâmetro $0,005 \mu\text{m}$ e uma segunda moda no intervalo dos macroporos com um diâmetro de $2 \mu\text{m}$ (Figura 5.6).

Tabela 5.4 – Parâmetros obtidos dos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio realizados na matriz do conglomerado.

Parâmetro	Amostra	
	M8	M18
Microporos, $<0,1 \mu\text{m}$ (%)	69,7	70,5
Mediana do diâmetro dos poros (μm)	0,0164	0,017
Porosidade interconectada, n_e (%)	25,9	22,9
Massa específica aparente dos sólidos (g/cm^3)	2,6	2,58
Superfície específica dos poros interconectados (m^2/g)	230	230
Permeabilidade (mdarcy)	11,4	0,207

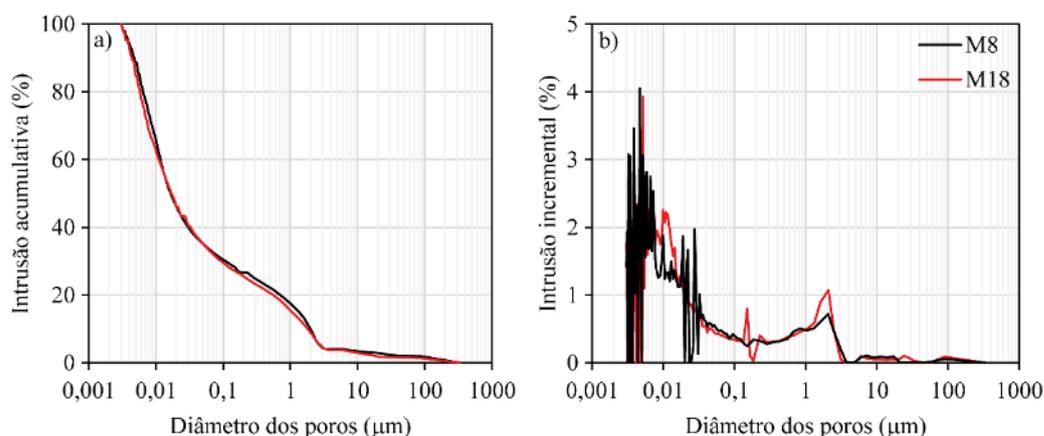


Figura 5.6 – Resultado dos ensaios de porosimetria de mercúrio: (a) Intrusão acumulativa de mercúrio. (b) Intrusão incremental de mercúrio.

A permeabilidade intrínseca (K) obtida dos ensaios de injeção de mercúrio ficou no intervalo típico dos arenitos, com um valor desde semipermeável até impermeável (Bear, 1972). Por meio deste resultado definiu-se um intervalo de variação do parâmetro de permeabilidade efetiva (k) da matriz do conglomerado que fica entre 1×10^{-5} cm/s e 1×10^{-8} cm/s. O intervalo do parâmetro de permeabilidade efetiva obtida através dos ensaios de injeção de mercúrio apresenta uma boa correlação com os resultados dos ensaios de permeabilidade tipo Lugeon realizados no conglomerado no local da barragem, onde foram em geral obtidos valores menores que 5 unidades Lugeon (ICE, 2009b), valor associado com uma permeabilidade efetiva menor de 6×10^{-5} cm/s.

5.1.1.4. Velocidade de onda sônica

Foram realizados ensaios para medir a velocidade de propagação das ondas compressoriais (V_p) e cisalhantes (V_s) em corpos de prova de matriz recuperados nas sondagens realizadas no local da barragem. No total foram realizadas 37 medições da velocidade de onda compressional e 9 medições da velocidade de onda cisalhante. Utilizando a velocidade de propagação das ondas e a massa específica da rocha foi possível estimar os parâmetros elásticos em condição dinâmica da matriz do conglomerado adotando a metodologia proposta na norma ASTM 2845-08 (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Estatística descritiva dos ensaios de propagação de velocidade de onda sônica realizados na matriz do conglomerado.

Estatística	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ν	E_{din} (GPa)
Número de dados	37	9	9	9
Mínimo	2,35	1,53	0,2	12,8
Máximo	3,65	1,93	0,24	21,9
Intervalo	1,3	0,4	0,04	9,1
Primeiro quartil	2,7	1,72	0,22	17
Terceiro quartil	3,27	1,9	0,23	21,4
Mediana	3,07	1,87	0,23	19,9
Média	3,04	1,79	0,22	18,9
Desvio padrão	0,35	0,16	0,01	3,69
Coefficiente de variação (%)	11,7	8,7	5,67	19,5

Segundo a data apresentada em González *et al.* (2002), os valores de velocidade de onda compressional obtidos dos ensaios ficaram na faixa inferior do intervalo típico esperado para os conglomerados ($V_p=2,5-5$ km/s).

Além dos ensaios de laboratório, foram desenvolvidos no local da barragem ensaios de refração sísmica, onde foram reportados valores de velocidade da onda compressional do conglomerado no intervalo entre 2 km/s e 3,5 km/s, com valores típicos no intervalo entre 2,3 km/s até 2,9 km/s (ICE, 2010).

5.1.1.5.

Resistência e deformabilidade

A resistência da matriz da rocha foi estudada utilizando ensaios de compressão uniaxial, ensaio de compressão diametral e ensaios de compressão triaxial. Dos ensaios de compressão uniaxial foi obtido o valor da resistência à compressão uniaxial (UCS) e o módulo de deformabilidade (E), enquanto que dos ensaios de compressão diametral foi determinada a resistência à tração (σ_t). A estatística descritiva dos parâmetros obtidos nos ensaios é apresentada na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Estatística descritiva da resistência à compressão uniaxial, módulo de deformabilidade, e resistência à tração da matriz.

Estatística	UCS (MPa)	E (GPa)	σ_t (MPa)
Número de dados	257	257	31
Mínimo	1,50	0,15	0,20
Máximo	27,7	4,55	3,62
Intervalo	26,2	4,40	3,42
Primeiro quartil	5,97	0,87	1,12
Terceiro quartil	13,5	1,91	2,18
Mediana	9,34	1,39	1,46
Média	10,3	1,52	1,67
Desvio padrão	5,27	0,84	0,78
Coefficiente de variação (%)	51	55	46

O coeficiente de variação maior que 35% indica que a resistência à compressão uniaxial do conglomerado é multimodal (Bewick *et al.*, 2015). O resultado anterior pode ser explicado pela grande heterogeneidade do depósito analisado, onde cada camada individual do conglomerado possui diferentes características, além de ter variações dos parâmetros analisados no interior das camadas.

Em geral, a matriz do conglomerado pode ser classificada por sua resistência à compressão uniaxial como uma rocha branda até muito branda (Tabela 5.7). Utilizando a classificação de Deere & Miller (1966), modificada por Ramamurthy (2004), a matriz do conglomerado é classificada uma rocha com um módulo relativo ($MR=E/UCS$) médio-baixo (Figura 5.7).

Tabela 5.7 – Classificação da rocha segundo sua resistência à compressão uniaxial (Ramamurthy, 2004).

Classe	Descrição	UCS (MPa)
A	Resistência muito alta	> 250
B	Resistência alta	100-250
C	Resistência moderada	50-100
D	Resistência média	25-50
E	Resistência baixa	5-25
F	Resistência muito baixa	< 5

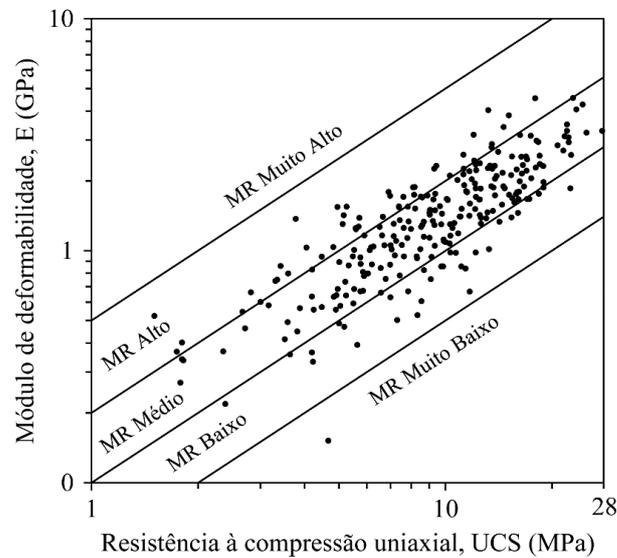


Figura 5.7 – Módulo relativo da matriz do conglomerado segundo a classificação proposta por Ramamurthy (2004).

Dos testes de compressão diametral foi obtida a resistência à tração da matriz do conglomerado. Nos ensaios de compressão diametral foram observadas superfícies de falha através da matriz e rodeando os blocos de maior diâmetro (Figura 5.8), semelhantes às observadas por Afifipour & Moarefvand (2013b) em ensaios físicos de compressão diametral em amostras tipo *bimrock*. A propagação da ruptura observada nas amostras corresponde ao modo 1 (Tabela 2.6) descrito por Xu *et al.* (2008).

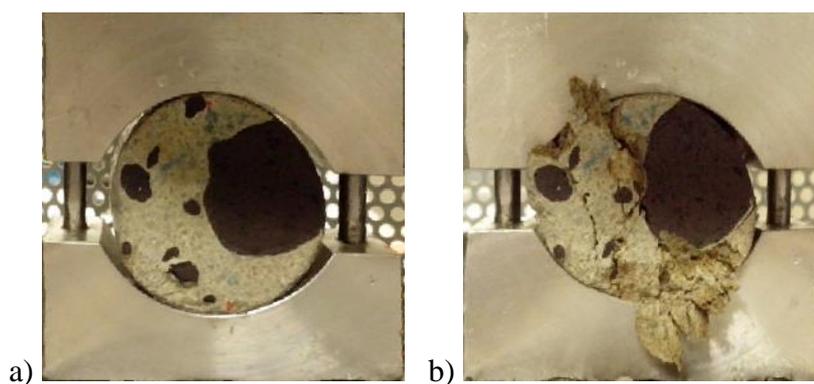


Figura 5.8 – Ensaio de compressão diametral (ensaio brasileiro) na matriz do conglomerado: (a) Corpo de prova antes da aplicação da carga. (b) Corpo de prova ao final do ensaio.

Nas análises dos dados foi obtida a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão uniaxial (σ_t/UCS) da matriz do conglomerado, sendo obtidos valores que ficam entre 0,09 e 0,26, com um valor médio de 0,14 (Figura 5.9).

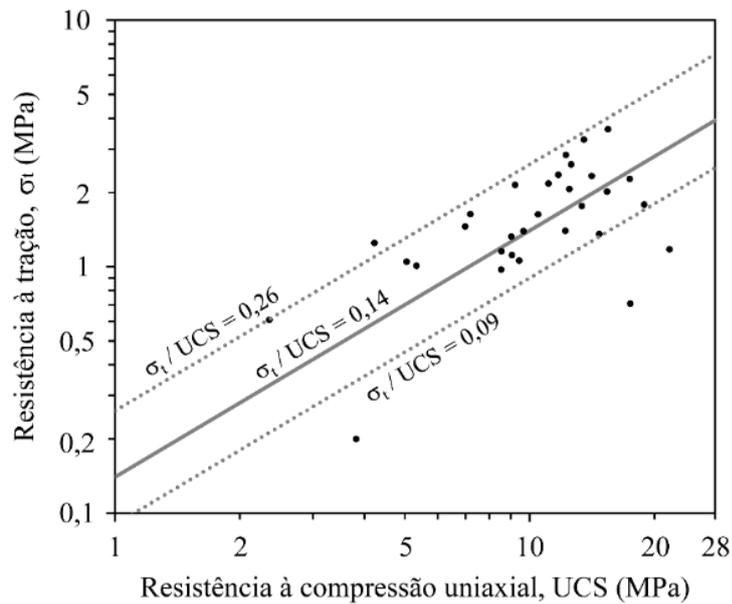


Figura 5.9 – Variação da resistência à tração em função da resistência à compressão uniaxial da matriz do conglomerado.

No estudo da resistência da matriz rochosa também foram realizados ensaios de compressão triaxial, utilizando tensões de confinamento de 0,5 MPa, 1 MPa, 1,5 MPa, 2 MPa, 2,5 MPa, 3 MPa, 4 MPa, 6 MPa e 8 MPa (Figura 5.10). A análise dos dados para obter os parâmetros de resistência do critério de ruptura de Mohr-Coulomb foi realizada segundo o método sugerido pela ISRM (1978). No total foram testados 21 corpos de prova, interpretados como 4 diferentes tipos de matriz de acordo com as suas propriedades de resistência (Tabela 5.8).

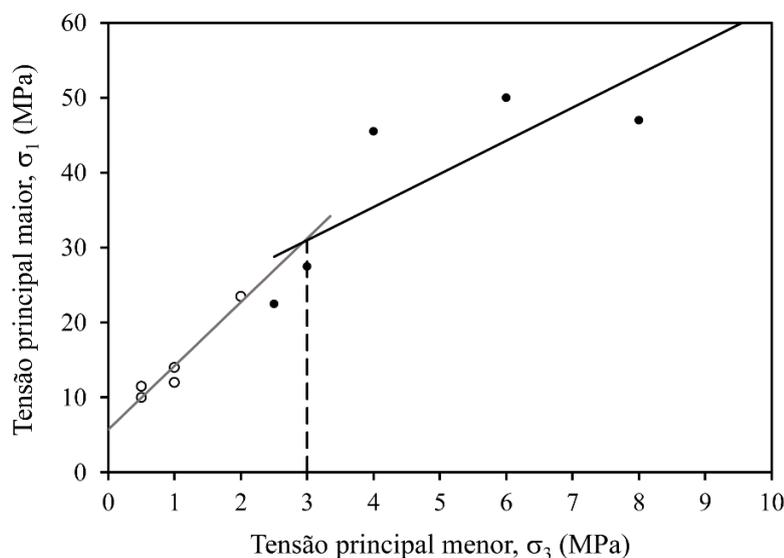


Figura 5.10 – Exemplo de envoltória do critério de ruptura de Mohr-Coulomb no espaço σ_1 - σ_3 (Ensaio No. 1).

Tabela 5.8 – Interpretação dos ensaios triaxiais utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Num. Ensaio	Num. Amostras	Intervalo das tensões	c (MPa)	ϕ (graus)
1	10	0 MPa - 2 MPa	0,94	52,7
		2 MPa - 8 MPa	4,2	39,1
2	3	0 MPa - 2 MPa	1,3	40,9
3	4	0 MPa - 3 MPa	4,8	46,6

5.1.2. Blocos

5.1.2.1. Análise granulométrica

Na estimativa da distribuição do tamanho dos blocos do conglomerado foram utilizadas as seguintes técnicas: (a) granulometrias por peso, realizadas em campo e laboratório, (b) medições lineares realizadas em campo, e (c) medições de área realizadas com base no processamento de imagens digitais.

A distribuição das frequências dos tamanhos dos blocos no local da barragem foi realizada com base em medições por peso executadas em campo e laboratório. Na construção da curva granulométrica foram utilizadas unicamente as partículas menores de 300 mm (Figura 5.11). Ficaram fora do intervalo da análise dez blocos com um diâmetro entre 1.024 mm e 512 mm, e um bloco com um diâmetro de

1.500 mm (diâmetro máximo observado no local da barragem, d_{max}). A moda das frequências por peso dos blocos observada no local da barragem ficou no intervalo entre 64 mm e 32 mm.

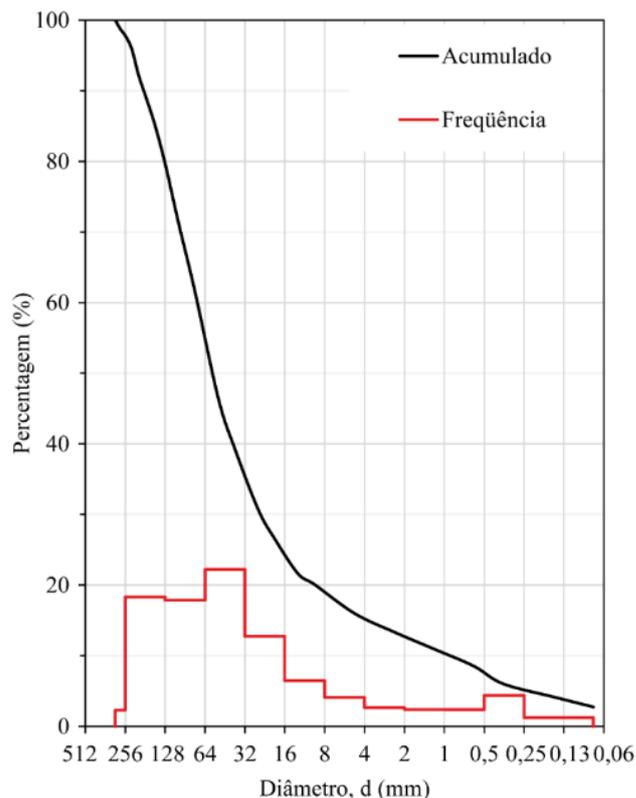


Figura 5.11 – Distribuição granulométrica (em peso) das partículas menores de 304,8 mm (12 polegadas) no local da barragem.

No local do afloramento, o estudo da distribuição das frequências dos tamanhos dos blocos foi realizado através de medições lineares executadas em campo e medições de área efetuadas do processamento de imagens do afloramento. As curvas granulométricas no local do afloramento foram desenhadas para um tamanho máximo de partícula de 512 mm. Unicamente um bloco de 600 mm (d_{max} no local do afloramento) ficou fora do intervalo da análise. A moda das frequências dos blocos observados no local do afloramento ficou no intervalo entre 256 mm e 128 mm.

A proporção volumétrica de blocos (PVB) no local da barragem foi estimada através do resultado das granulometrias e das densidades dos blocos ($25,7 \text{ kN/m}^3$) e da matriz (21 kN/m^3), sendo assim calculada uma PVB de 60,4%. Enquanto que a PVB no local do afloramento foi calculada através das proporções de área de

blocos e longitude linear de blocos, e obtidos valores de *PVB* entre 48,9% e 52,5%, resultado que indica que a *PVB* é aproximadamente 10% maior no local da barragem.

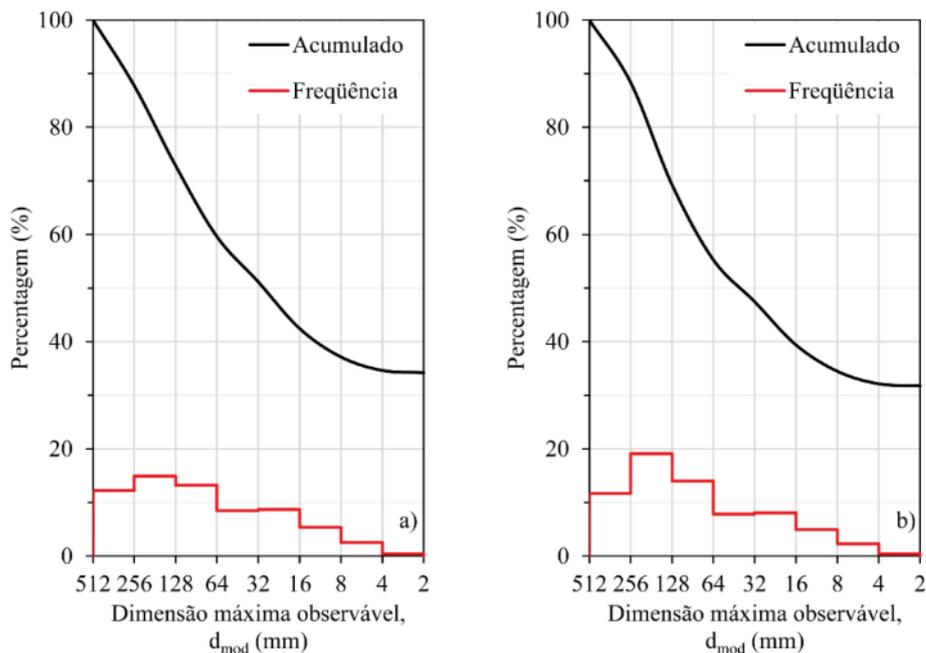


Figura 5.12 – Distribuição granulométrica das partículas no local do afloramento: (a) em área, e (b) em longitude.

5.1.2.2. Análise petrológica

Através da análise petrográfica apresentada no item 5.1.1.2 e da análise petrológica de amostras de mão obtidas dos furos de sondagem e afloramentos, foi possível definir que os blocos do conglomerado são formados por rochas ígneas de origem vulcânica. Especificamente, os principais tipos de rochas que formam o conglomerado são andesitos basálticos com textura fanerítica ou fanerítica porfirítica e basaltos andesíticos de textura afanítica (Figura 5.13).

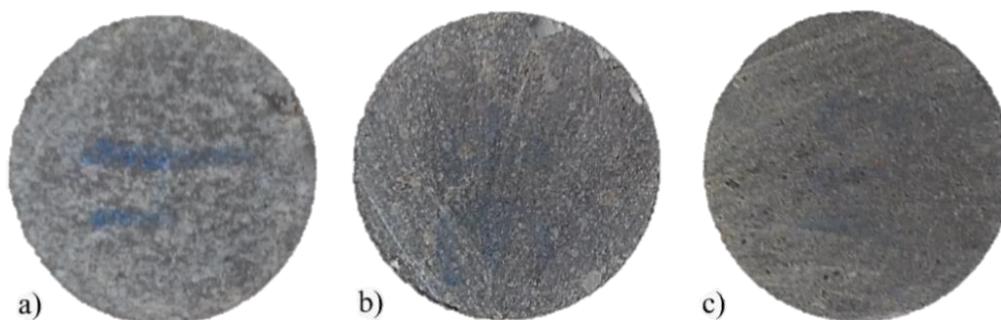


Figura 5.13 – Amostras dos diferentes tipos de rochas que formam os blocos do conglomerado: (a) andesito basáltico com textura fanerítica porfirítica, (b) andesito basáltico com textura fanerítica, (c) basalto andesítico com textura afanítica.

5.1.2.3.

Peso específico seco, Absorção e Porosidade interconectada

O peso específico seco (γ_d), a absorção (Abs) e a porosidade interconectada (n_e) dos blocos do conglomerado apresentam valores típicos de rochas vulcânicas, resultado esperado segundo o observado na análise petrológica dos diferentes tipos de rocha encontrados (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 – Estatística descritiva do peso específico seco, absorção e porosidade interconectada dos blocos do conglomerado.

Estatística	γ_d (kN/m ³)	Abs (%)	n_e (%)
Número de dados	23	23	9
Mínimo	23,4	0,21	1,99
Máximo	27,1	4,42	11,5
Intervalo	3,7	4,21	9,55
Primeiro quartil	24,9	0,81	-
Terceiro quartil	26,6	1,07	-
Mediana	26	1,93	-
Média	25,7	1,54	-
Desvio padrão	1,06	1,21	-
Coefficiente de variação (%)	4,11	78,7	-

Segundo González *et al.* (2002), tanto o peso específico seco e a porosidade apresentam valores dentro do intervalo típicos dos andesitos ($\gamma_d = 21,6-23,1$ kN/m³; $n_e = 10-15\%$) e dos basaltos ($\gamma_d = 26,5-28,5$ kN/m³; $n_e = 0,1-2\%$).

5.1.2.4. Velocidade de onda sônica

Foram realizados ensaios para medir a velocidade de propagação das ondas compressoriais (V_p) e cisalhantes (V_s) em amostras de blocos recuperados nas sondagens a rotação realizadas no local da barragem. No total foram realizadas 8 medições das velocidades de onda compressional e cisalhante. Utilizando a velocidade de propagação das ondas e a massa específica da rocha foi possível estimar os parâmetros elásticos em condição dinâmica dos blocos do conglomerado utilizando a metodologia proposta na norma ASTM 2845-08 (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 – Resultado dos ensaios de velocidade de onda realizados nos blocos do conglomerado.

Estatística	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ν	E_{din} (GPa)
Número de dados	8	8	8	8
Mínimo	4,95	2,75	0,26	49,5
Máximo	5,51	3,07	0,3	64,7
Intervalo	0,56	0,32	0,04	15,2
Primeiro quartil	5,07	2,79	0,27	51,3
Terceiro quartil	5,43	3,01	0,28	62,6
Mediana	5,3	2,95	0,28	60,3
Média	5,28	2,94	0,28	58,9
Desvio padrão	0,19	0,12	0,01	5,64
Coefficiente de variação (%)	3,66	4	4,2	9,59

Segundo González *et al.* (2002) e Barton (2007), os valores de velocidade de onda compressional e cisalhante obtidos dos ensaios ficaram no intervalo típico dos basaltos ($V_p=4,5-6$ km/s; $V_s=2,7-3,2$ km/s).

5.1.2.5. Resistência e deformabilidade

A resistência e deformabilidade dos blocos do conglomerado foram estudadas utilizando ensaios de compressão uniaxial a apresentam um intervalo amplo de valores, resultado esperado devido à grande variedade dos tipos de rocha presentes nos blocos (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 – Estatística descritiva da resistência à compressão uniaxial e módulo de deformabilidade dos blocos.

Estatística	UCS (MPa)	E (GPa)
Número de dados	19	18
Mínimo	42,0	5,4
Máximo	211,0	13,5
Intervalo	169,0	8,1
Primeiro quartil	68,0	7,0
Terceiro quartil	118,0	9,8
Mediana	79,5	8,5
Média	94,5	8,7
Desvio padrão	44,7	1,8
Coefficiente de variação (%)	47,1	20,8

Além dos ensaios de compressão uniaxial, foram realizados ensaios de carga pontual para determinar o índice da resistência de carga pontual ($I_{s(50)}$) e testes com o martelo Schmidt para obter o valor de rebote R (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 – Estatística descritiva do índice da resistência da carga pontual e o valor do rebote do martelo Schmidt dos blocos do conglomerado.

Estatística	$I_{s(50)}$ (MPa)	R
Número de dados	20	6
Mínimo	2,26	37
Máximo	33,3	46
Intervalo	31,0	9
Média	7,91	-
Desvio padrão	6,81	-
Coefficiente de variação (%)	86,2	-

Através dos ensaios de resistência, e utilizando a classificação de Deere & Miller (1966) modificada por Ramamurthy (2004), é possível classificar os blocos do conglomerado como rochas de resistência médio-alta, e com um módulo relativo médio. Empregando o índice da resistência da carga pontual, as rochas dos blocos podem ser classificadas como muito resistentes segundo a classificação proposta por Bieniawski (1974). Geralmente, os resultados obtidos da caracterização do conglomerado confirmam a grande diferença entre as propriedades mecânicas dos blocos e da matriz.

5.2. Classificação do conglomerado

5.2.1. Classificação geológica

O conglomerado meio-grosso da Fm. Paso Real é de tipo terrígeno, intraformacional, oligomítico, composto por blocos subarredondados de esfericidade média. Usualmente, os conglomerados são suportados pela matriz (paraconglomerado) e ocasionalmente suportados pelos blocos (ortoconglomerado). Seu mergulho é sub-horizontal (aproximadamente de 10 graus), com uma direção de mergulho média de N15°E.

5.2.2. Classificação segundo o sistema da JGS

Na classificação segundo o sistema da JGS foram utilizadas as informações recopiladas nos levantamentos de campo, furos de sondagem e galerias de investigação. O resultado da classificação é apresentado em seguida para cada um dos locais estudados.

5.2.2.1. Local da barragem

No local da barragem o maciço rochoso é classificado como brando, de tipo rudítico, com uma percentagem de blocos maior que 50% (blocos maiores de 2 mm). A matriz apresenta-se sã, com uma resistência típica no intervalo entre 5 MPa e 10 MPa (ocasionalmente no intervalo de 1-5 MPa), e o tamanho dominante das suas partículas fica entre 0,063 mm e 2 mm. Os blocos possuem uma resistência típica entre 50 MPa e 100 MPa (ocasionalmente maior que 100 MPa), seu tamanho dominante fica entre 63 mm e 200 mm, e a percentagem de blocos de grande porte é menor ao 10%. O símbolo da classificação para o conglomerado no local da barragem é *SR-E₁/w₁p₂b₂g₂h₂*.

5.2.2.2.

Local do afloramento

No local do afloramento o maciço rochoso é classificado como brando, de tipo rudítico, com uma percentagem de blocos maior que 50% (blocos maiores a 2 mm). A matriz apresenta-se sã, com uma resistência típica no intervalo entre 5 MPa e 10 MPa (ocasionalmente no intervalo de 1-5 MPa), e o tamanho dominante das suas partículas fica entre 0,002 mm e 0,063 mm. Os blocos possuem uma resistência típica entre 50 MPa e 100 MPa (ocasionalmente maior que 100 MPa), seu tamanho dominante fica entre 63 mm e 200 mm, e a percentagem de blocos de grande porte é menor que 10%. O símbolo da classificação para o conglomerado no local do afloramento é *SR-E₁/w₁p₃b₂g₂h₂*.

5.2.3.

Classificação segundo o sistema *RMi*

A resistência à compressão uniaxial (σ_c) foi estimada com base em testes de compressão uniaxial realizados em amostras recuperadas no local da barragem. Apresenta um intervalo de variação entre 1,5 MPa e 27,7 MPa, porém a maior parte dos dados (75% dos dados) estão no intervalo entre 1,5 MPa até 13,5 MPa (Tabela 5.6).

Utilizando um $f_\sigma = 0,5$ e o intervalo de variação da resistência à compressão uniaxial, foi determinado que o *RMi* do conglomerado varia entre 0,7 MPa e 6,8 MPa, que corresponde a um maciço rochoso *moderadamente forte a forte*.

5.2.4.

Classificação segundo o Índice de Velocidade

O índice de velocidade do conglomerado no local da barragem do PHED foi calculado utilizando a velocidade de propagação da onda compressional da matriz do conglomerado obtida dos ensaios de laboratório (V_L) e o valor da velocidade de propagação da onda compressional obtido dos ensaios de refração sísmica no local da barragem (V_F). Foi determinada uma variação do índice de velocidade entre 0,7 e 0,9, com um valor típico de $(V_F/V_L)^2 = 0,72$. Assim, segundo o índice de velocidade o conglomerado no local da barragem pode ser classificado como uma *rocha de boa qualidade*.

5.3. Modelagem numérica do conglomerado

Através da caracterização geotécnica e das observações geológicas de campo foi possível definir que a matriz do conglomerado é de tipo não soldada. Segundo a metodologia apresentada no capítulo 3, neste tipo de conglomerados é necessário utilizar um material de interface ao redor dos blocos na sua modelagem numérica.

Na escala de campo, a espessura da zona de interface foi determinada com base em observações de afloramentos, sendo definidas três classes dependentes do diâmetro dos blocos. Na escala de laboratório foi utilizada uma espessura constante da interface igual a 1 mm (Tabela 5.13).

Tabela 5.13 – Espessura da interface ao redor dos blocos na escala de campo.

Tamanho de bloco, d_{mod} (mm)	Espessura da interface, e_{int} (mm)
< 32	1,0
32 – 100	3,0 – 6,0
100 – 450	9,0 – 12
> 450	15

Todas as modelagens numéricas apresentadas neste trabalho (na escala de campo e laboratório) foram realizadas através do método dos elementos finitos em duas dimensões, usado o *software* PLAXIS 2D v2014. As análises foram de tipo deformações planas, empregando uma malha constituída por elementos triangulares de seis nós, gerada de forma automática pelo malhador incluído no *software*. O modelo constitutivo de todos os materiais foi o elástico linear perfeitamente plástico com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (PLAXIS, 2014), que utiliza uma lei de fluxo não associada. Na modelagem de todos os casos foi usado um ângulo de dilatância $\psi=0$ graus.

5.3.1. Modelagem numérica da matriz do conglomerado (escala de laboratório)

Como discutido, todas as partículas menores de 32 mm compõem a matriz do conglomerado, portanto, esta é constituída por um conglomerado de grão fino, onde as partículas menores de 2 mm (areias, silte e argila) formam a matriz e as partículas de maior diâmetro (entre 2 mm até 32 mm) são considerados blocos.

Os ensaios numéricos realizados nas amostras na escala de laboratório foram de tipo compressão biaxial com controle dos deslocamentos. Foi selecionado um tamanho dos corpos de prova virtuais de 50 mm de largura e 150 mm de altura (relação $altura/largura=3$), para conseguir da modelagem numérica resultados representativos dos obtidos nas amostras cilíndricas reais ensaiadas no laboratório (diâmetro $NQ=47,6$ mm, relação de $altura/largura$ entre 2 e 3). A geometria das amostras (Figura 5.14) e os diâmetros mínimo e máximo dos blocos foram definidos através de fotografias do afloramento e dos testemunhos de rocha dos furos de sondagem do local da barragem.

As amostras na escala de laboratório possuem blocos com um diâmetro entre 4% até 64,4% da largura e uma proporção volumétrica de blocos entre 26,7% e 40,4% (Tabela 5.14). A espessura da interface ao redor dos blocos de todas as amostras virtuais na escala de laboratório foi fixada em 1 mm (Tabela 5.13). As condições de contorno utilizadas nos ensaios biaxiais na escala de laboratório são apresentadas na Figura 5.15.

O principal objetivo dos testes numéricos na escala de laboratório foi definir o intervalo de valores possíveis dos parâmetros de resistência da matriz na escala analisada (partículas menores de 2 mm), comparando a resposta obtida do ensaio numérico com os valores dos ensaios reais feitos no laboratório (item 5.1.1.5).

Nos ensaios foram analisados três valores de resistência da matriz na escala de laboratório (Tabela 5.15). Cada tipo de matriz na escala de laboratório foi testado com dois diferentes valores de resistência da interface nesta mesma escala: a) mesmo ângulo de atrito da matriz e uma coesão equivalente a 75% da coesão da matriz, e b) cinco graus a mais de ângulo de atrito da matriz e uma coesão equivalente a 25% da coesão da matriz (Tabela 5.15).

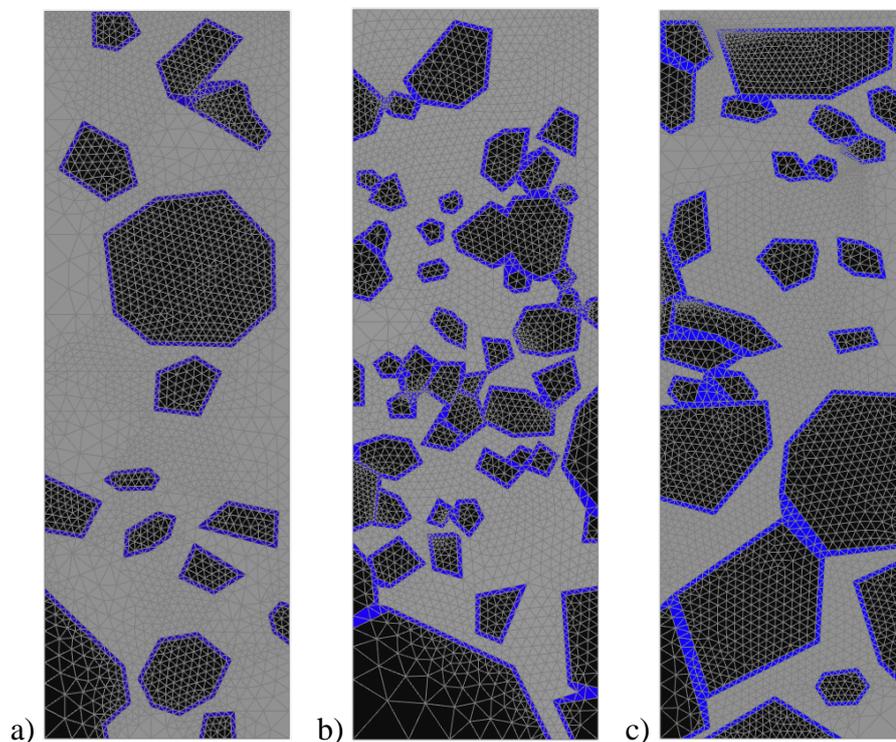


Figura 5.14 – Amostras virtuais para ensaios biaxiais na escala de laboratório ($50 \times 150 \text{ mm}^2$): (a) amostra B1_50, (b) amostra B2_50, e (c) Amostra B3_50. Preto: blocos, Cinza: matriz, Azul: interface.

Tabela 5.14 – Detalhe das amostras virtuais utilizadas nos ensaios biaxiais na escala de laboratório.

Amostra	PVB (%)	d_{min} (mm)	d_{max} (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Num. Nós	Num. Elementos
B1_50	26,7	32,2	4,1	50	150	10350	5091
B2_50	32,5	30,4	2,1	50	150	12967	6382
B3_50	40,4	28,6	3,5	50	150	13772	6771

Por outro lado, os parâmetros de resistência dos blocos ficaram constantes em todos os testes (Tabela 5.15). Do mesmo modo, os parâmetros de deformabilidade e o peso específico de todos os materiais que compõem o modelo foram considerados constantes em todas as análises realizadas para estudar a resistência na escala de laboratório (Tabela 5.16).

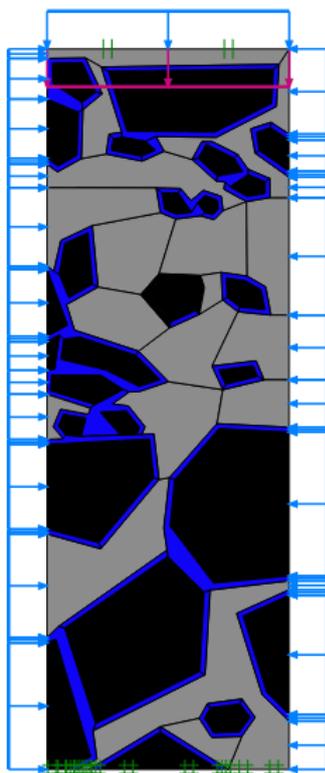


Figura 5.15 – Condições de contorno utilizadas nos testes biaxiais na escala de laboratório. Face superior: deslocamento horizontal nulo, deslocamento vertical uniforme, carregamento vertical uniforme. Face inferior: deslocamento nulo nos eixos horizontal e vertical. Faces laterais: deslocamento livre nos eixos horizontal e vertical, carregamento horizontal uniforme. As mesmas condições de contorno foram também aplicadas nos testes biaxiais na escala de campo.

Tabela 5.15 – Parâmetros de resistência dos materiais utilizados nos testes numéricos na escala de laboratório.

Caso	Blocos				Matriz - escala de laboratório				Interface - escala de laboratório			
	c (MPa)	ϕ (graus)	UCS (MPa)	σ_i (MPa)	c (MPa)	ϕ (graus)	UCS (MPa)	σ_i (MPa)	c (MPa)	ϕ (graus)	UCS (MPa)	σ_i (MPa)
1	9,5	55	60	6,0	2,07	45	10	1,0	1,55	45	7,5	0,7
2	9,5	55	60	6,0	2,07	45	10	1,0	0,50	50	2,8	0,25
3	9,5	55	60	6,0	1,0	50	5,5	0,55	0,75	50	4,1	0,4
4	9,5	55	60	6,0	1,0	50	5,5	0,55	0,25	55	1,6	0,15
5	9,5	55	60	6,0	0,5	55	3,2	0,3	0,38	55	2,4	0,2
6	9,5	55	60	6,0	0,5	55	3,2	0,3	0,13	60	1,0	0,1

Tabela 5.16 – Parâmetros de deformabilidade e peso específico dos materiais utilizados nos testes numéricos realizado para estudar a resistência da matriz na escala de laboratório.

Material	ν	γ_d (MN/m ³)	E (MPa)
Matriz - escala de laboratório	0,23	0,021	850
Interface - escala de laboratório	0,23	0,021	635
Blocos	0,28	0,027	5000

Nas análises observou-se que a plastificação nos corpos de prova se iniciou na zona da interface (Figura 5.16a), para logo aumentar até atingir a matriz com o acréscimo da tensão desviadora (Figura 5.16b e Figura 5.16c). Semelhante comportamento foi reportado por Coli *et al.* (2012) em ensaios numéricos de compressão triaxial em amostras virtuais de *bimrock*.

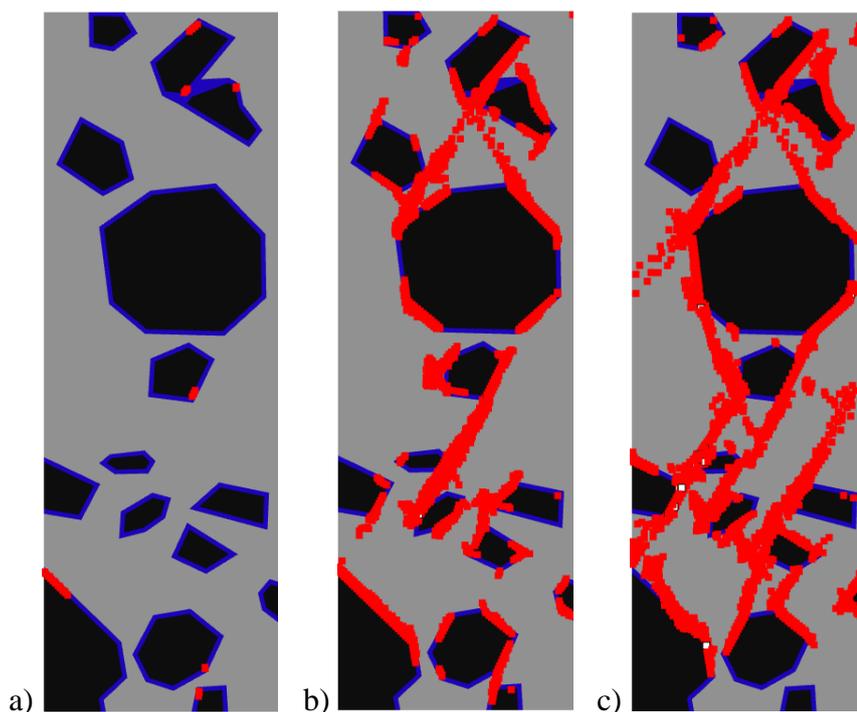


Figura 5.16 – Ensaio de compressão biaxial ($\sigma_3=8$ MPa), executado na amostra B1_50, com os parâmetros de resistência do Caso 1: (a) primeiros pontos plásticos no corpo de prova ($\varepsilon_a=0,01$), (b) ponto plásticos no final do trecho elástico ($\varepsilon_a=0,03$), e (c) pontos plásticos no final do ensaio numérico ($\varepsilon_a=0,045$). Branco: pontos plásticos por falha a tração. Vermelho: pontos plásticos por falha por cisalhamento.

Verificou-se uma mudança no padrão das deformações nos corpos de prova com o acréscimo da tensão de confinamento (σ_3). Nos ensaios de compressão uniaxial ($\sigma_3=0$ MPa), as amostras apresentam dilatância e pontos plásticos associados a falhas de tração na matriz e na interface (Figura 5.17). Por outro lado, a dilatância nos corpos de prova diminuiu com o acréscimo da tensão de confinamento, e a presença de pontos plásticos por tração é baixa, comportamento associado a uma falha por cisalhamento do corpo de prova (Figura 5.18).

Geralmente, o comportamento reportado nos ensaios virtuais é interpretado como uma diminuição nas deformações volumétricas no corpo de prova com o acréscimo da tensão de confinamento, semelhante ao descrito por Medhurst & Brown (1998) em ensaios triaxiais executados em amostras de carvão.

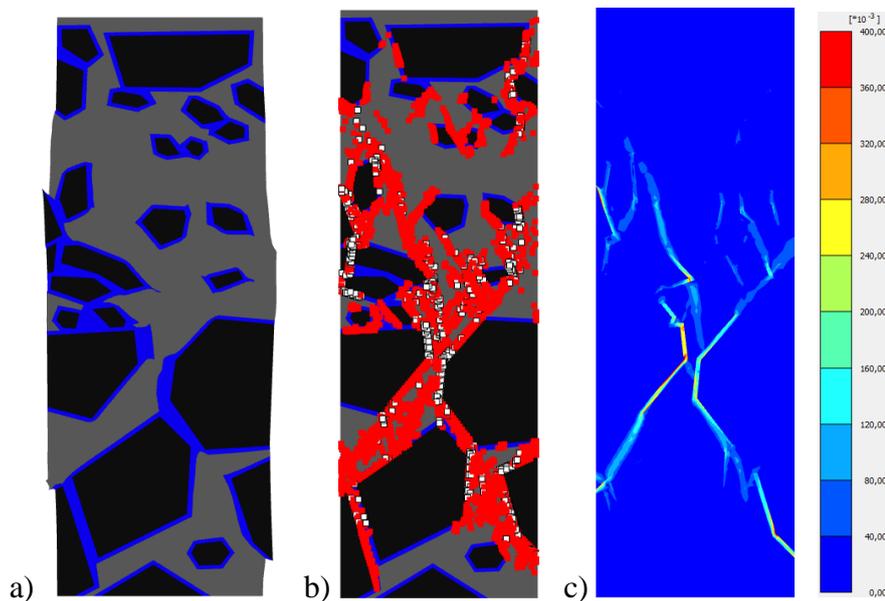


Figura 5.17 – Ensaio de compressão uniaxial ($\sigma_3=0$ MPa) em amostras virtuais na escala de laboratório (Amostra B3_50, Caso 6): (a) amostra deformada no final do teste, (b) pontos plásticos no corpo de prova, e (c) deformação desviadora (γ_s). Branco: pontos plásticos por falha a tração. Vermelho: pontos plásticos por falha por cisalhamento.

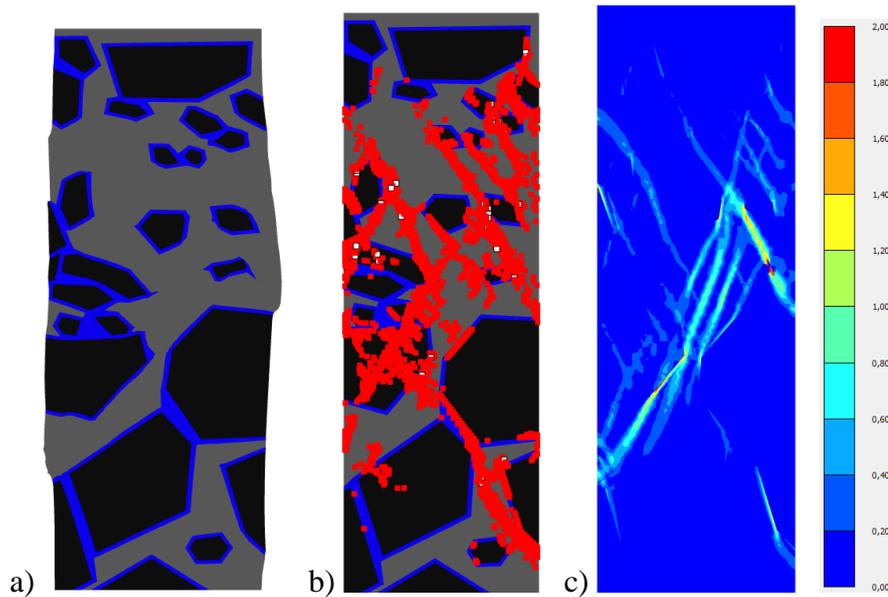


Figura 5.18 – Ensaio de compressão biaxial em amostras virtuais na escala de laboratório (Amostra B3_50, Caso 6, $\sigma_3=8$ MPa): (a) amostra deformada no final do teste, (b) pontos plásticos no corpo de prova, e (c) deformação desviadora (γ_s). Branco: pontos plásticos por falha a tração. Vermelho: pontos plásticos por falha de cisalhamento.

Os parâmetros de resistência ao pico da matriz do conglomerado foram obtidos dos ensaios numéricos de compressão biaxial na escala de laboratório. Foram desenhadas as curvas tensão-deformação de cada um dos testes de compressão e delas obtidas as tensões de pico (Figura 5.19a). Na interpretação dos ensaios numéricos de compressão na escala de laboratório foi utilizada a metodologia apresentada nos itens 3.3.1 e 3.3.2. As envoltórias obtidas no estudo da resistência da matriz foram de tipo bilinear, com uma mudança na inclinação dos trechos retos para tensões de confinamento entre 1 MPa e 2 MPa (Figura 5.19b).

No intervalo das baixas tensões de confinamento ($0 \text{ MPa} < \sigma_3 < 2 \text{ MPa}$) foi observada uma tendência crescente unidirecional no ângulo de atrito com o aumento na proporção volumétrica de blocos (Figura 5.20c). Além disso, verificou-se uma relação monotônica decrescente no parâmetro da coesão (Figura 5.20b) e na resistência à compressão uniaxial (Figura 5.20a) com o acréscimo na proporção volumétrica de blocos. Este comportamento é semelhante ao reportado por Linqsidt (1994) em modelos físicos em *bimrocks* não soldados testados em compressão triaxial no laboratório, e também é semelhante ao relatado por Coli *et al.* (2012) em ensaios numéricos realizados em amostras virtuais de

bimrocks não soldados. Porém, o valor do ângulo de atrito do conglomerado foi igual ou menor ao ângulo de atrito da matriz em todos os casos.

No intervalo das tensões de confinamento maiores a 2 MPa observou-se o comportamento inverso no valor dos parâmetros de resistência, apresentando-se uma tendência crescente na coesão e uma diminuição do ângulo de atrito com o acréscimo da proporção de blocos (Figura 5.20d e Figura 5.20e).

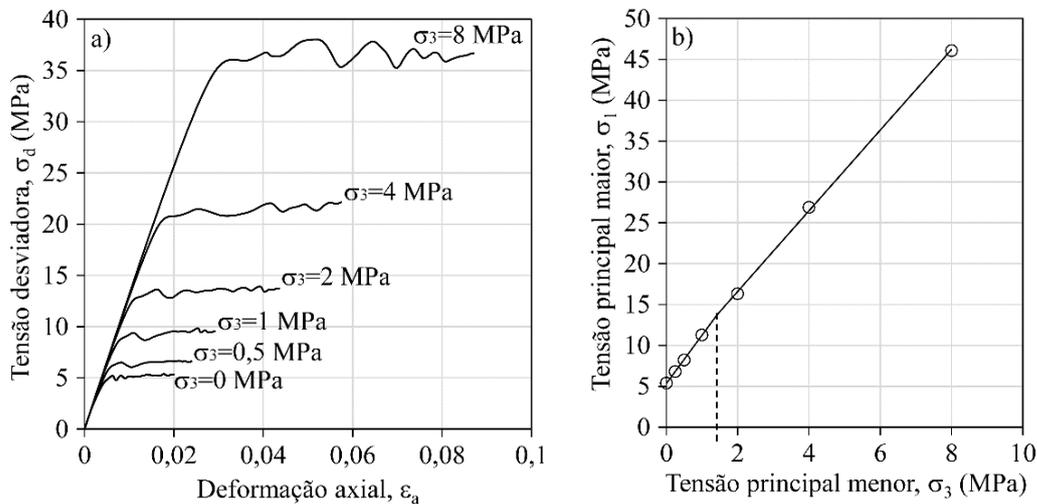


Figura 5.19 – Resultado dos ensaios numéricos de compressão biaxial nas amostras virtuais na escala de laboratório, Amostra B2_50, Caso 2: (a) curvas tensão-deformação, e (b) envoltória de resistência bilinear no espectro das tensões confinantes analisadas.

A deformabilidade das amostras na escala de laboratório foi estudada mediante a variação do módulo de deformabilidade (E) dos diferentes materiais. No total foram analisados quatro casos (Tabela 5.17), onde os parâmetros de resistência foram considerados constantes (foram utilizados os parâmetros do Caso 1, Tabela 5.15). Nas análises foi possível observar como o módulo de deformabilidade aumenta unidirecionalmente com o acréscimo na proporção volumétrica de blocos. Além disso, observou-se como a variação do módulo de deformabilidade da matriz possui maior influência na deformabilidade do conjunto.

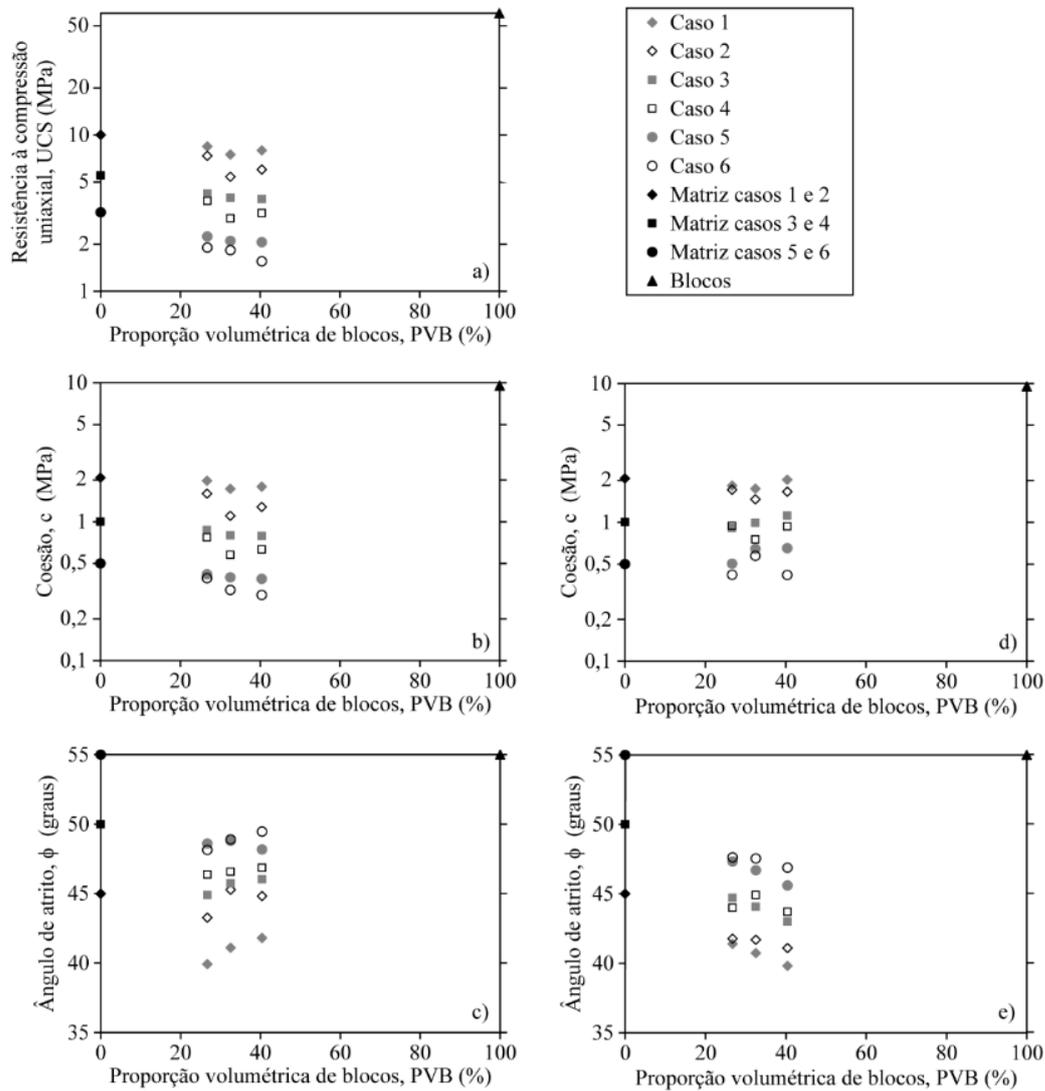


Figura 5.20 – Resultados dos testes numéricos de compressão biaxial na escala de laboratório: (a) Resistência à compressão uniaxial, (b) coesão no intervalo das tensões $\sigma_3=0-2$ MPa, (c) ângulo de atrito no intervalo das tensões de $\sigma_3=0-2$ MPa, d) coesão no intervalo das tensões $\sigma_3=2-8$ MPa, e) ângulo de atrito no intervalo das tensões de $\sigma_3=2-8$ MPa.

Tabela 5.17 – Módulo de deformabilidade, E (MPa) de cada material e resultado das análises realizadas na escala de laboratório.

Caso	Módulo de deformabilidade, E (MPa)					
	Matriz	Interface	Blocos	Conglomerado		
				$PVB=26,7$	$PVB=32,5$	$PVB=40,4$
A	600	500	5000	950	970	1060
B	850	635	5000	1235	1310	1430
C	1500	1200	5000	2040	2120	2270
D	850	675	10000	1290	1375	1510

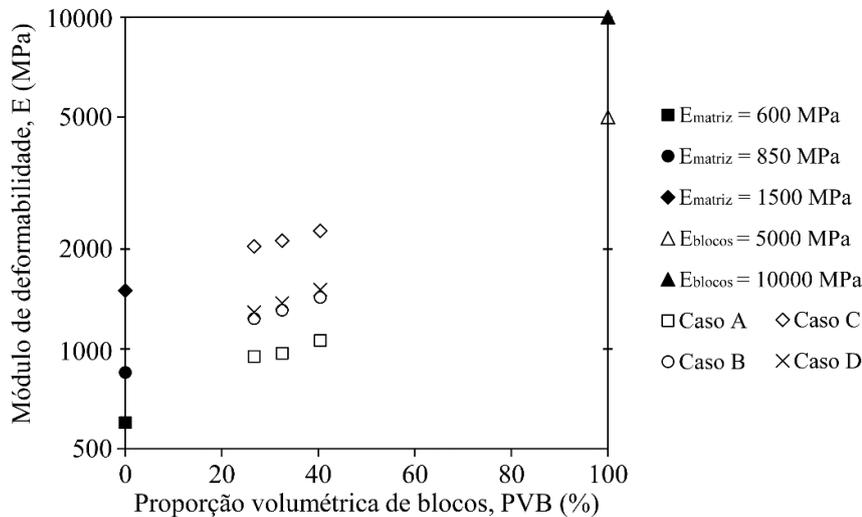


Figura 5.21 – Resultados dos testes numéricos de compressão biaxial, realizados para estudar a deformabilidade das amostras virtuais da matriz do conglomerado.

5.3.2. Modelagem numérica do conglomerado na escala de campo

Na escala de campo foram realizados ensaios numéricos de compressão biaxial, cisalhamento direto e placa. Os resultados dos ensaios numéricos e a comparação com os resultados dos ensaios de campo reais feitos no local da barragem são apresentados em seguida.

5.3.2.1. Ensaios de compressão biaxial

A influência da escala na resistência do conglomerado foi estudada através de testes numéricos de compressão biaxial. No estudo foram utilizados corpos de prova retangulares, com uma relação *altura/largura*=3, e larguras de 300 mm (Figura 5.22), 600 mm (Figura 5.23) e 900 mm (Figura 5.24).

As amostras utilizadas têm uma proporção volumétrica de blocos (*PVB*) entre 43,7% e 51,3% (Tabela 5.18). Ao ter uma variação da *PVB* menor que 8% nas amostras testadas considerou-se válido fazer comparações entre os resultados obtidos dos ensaios realizados nelas. A espessura do material da interface ao redor dos blocos foi definida segundo o critério apresentado na Tabela 5.13. As condições de contorno empregadas nos ensaios de compressão biaxial na escala de campo

foram as mesmas usadas nos testes de compressão biaxial na escala de laboratório (Figura 5.15).

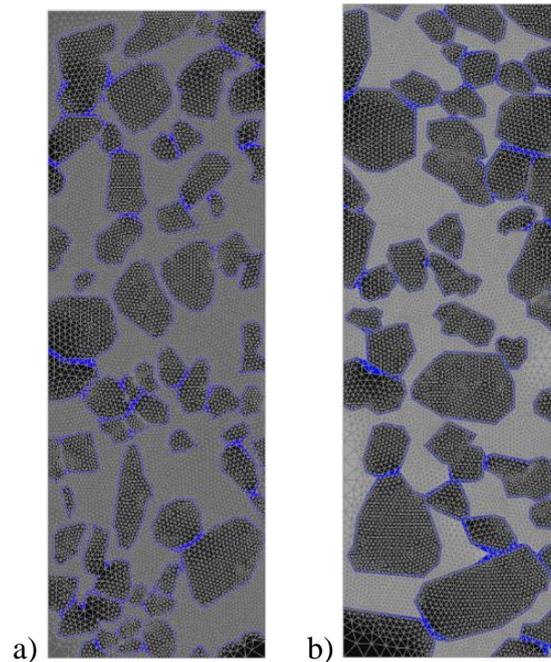


Figura 5.22 – Amostras virtuais para ensaios biaxiais na escala de campo ($300 \times 900 \text{ mm}^2$): (a) amostra B1_300, e (b) amostra B2_300.

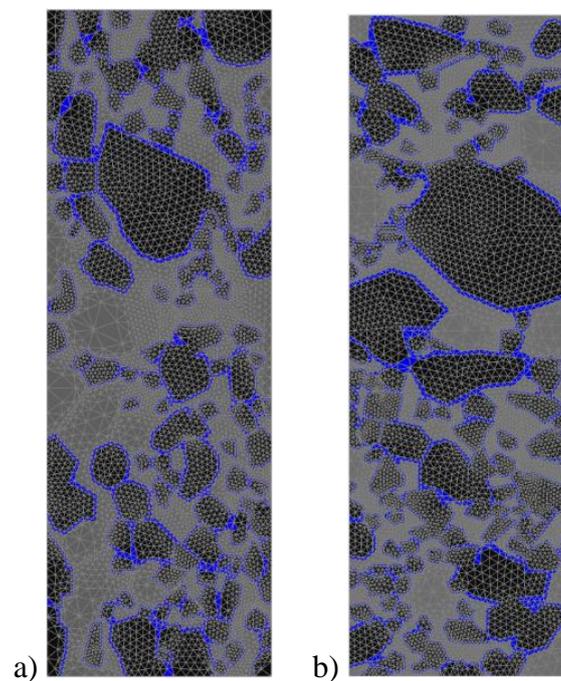


Figura 5.23 – Amostras virtuais para ensaios biaxiais na escala de campo ($600 \times 1800 \text{ mm}^2$): (a) amostra B1_600, e (b) amostra B2_600.

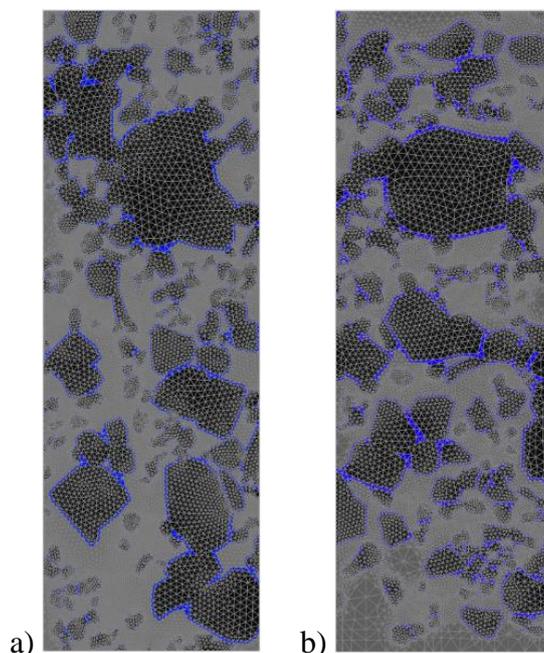


Figura 5.24 – Amostras virtuais para ensaios biaxiais na escala de campo (900×2700 mm²): (a) amostra B1_900, e (b) amostra B2_900.

Tabela 5.18 – Detalhe das amostras virtuais utilizadas nos ensaios de compressão biaxial na escala de campo.

Amostra	PVB (%)	Eixo da Amostra	Largura (mm)	Altura (mm)	Num. Nós	Num. Elementos
B1_300	46,3	Horizontal	300	900	48892	24165
B2_300	51,3	Vertical	300	900	45874	22651
B1_600	43,7	Horizontal	600	1800	34249	16802
B2_600	50,2	Vertical	600	1800	33785	16503
B1_900	47,5	Horizontal	900	2700	63813	31196
B2_900	51,2	Vertical	900	2700	57907	28381

Nos ensaios para estudar a resistência do conglomerado foram analisados três diferentes casos, variando os parâmetros de resistência da matriz (Tabela 5.19) e da interface (Tabela 5.20). Porém, os parâmetros de resistência dos blocos (Tabela 5.21) e os parâmetros de deformabilidade de todos os materiais foram considerados constantes nas análises da resistência do conglomerado.

Nas análises na escala de campo observou-se idêntico comportamento relatado para os corpos de prova na escala de laboratório: (a) diminuição nas deformações volumétricas no corpo de prova com o acréscimo da tensão de confinamento, e (b) início da plastificação nos corpos de prova na zona da interface.

Foram desenhadas as curvas tensão-deformação (Figura 5.25a) e obtidos os valores de resistência ao pico de cada ensaio de compressão biaxial. Na interpretação dos ensaios numéricos de compressão na escala de campo foi utilizada a metodologia apresentada nos itens 3.3.1 e 3.3.2. Da mesma forma que nos ensaios na escala de laboratório, todos os casos analisados na escala de campo apresentaram uma envoltória de resistência bilinear, com uma mudança na inclinação dos trechos retos para tensões de confinamento entre 1 MPa e 2 MPa (Figura 5.25b).

A resistência à compressão uniaxial apresentou valores menores nos corpos de prova com largura de 300 mm, para depois aumentar e ficar com um valor semelhante ao valor da resistência da matriz nos corpos de prova de 600 mm e 900 mm de largura (Figura 5.26).

Tabela 5.19 – Parâmetros de resistência e deformabilidade da matriz do conglomerado utilizados na análise da resistência na escala de campo.

Caso	c (MPa)	ϕ (graus)	UCS (MPa)	σ_r (MPa)	E (MPa)	ν	γ_d (MN/m ³)
1	2	41,5	8,9	0,9	1280	0,23	0,021
2	0,8	45	3,9	0,4	1280	0,23	0,021
3	0,35	49	1,9	0,2	1280	0,23	0,021

Tabela 5.20 – Parâmetros de resistência e deformabilidade da interface do conglomerado utilizados na análise da resistência na escala de campo.

Caso	c (MPa)	ϕ (graus)	UCS (MPa)	σ_r (MPa)	E (MPa)	ν	γ_d (MN/m ³)
1	1,5	41,5	6,7	0,6	960	0,23	0,021
2	0,4	45	1,9	0,2	960	0,23	0,021
3	0,12	54	0,8	0,08	960	0,23	0,021

Tabela 5.21 – Parâmetros de resistência e deformabilidade dos blocos do conglomerado utilizados na análise da resistência na escala de campo.

c (MPa)	ϕ (graus)	UCS (MPa)	σ_r (MPa)	E (MPa)	ν	γ_d (MN/m ³)
9,5	55	60	6,0	5000	0,28	0,027

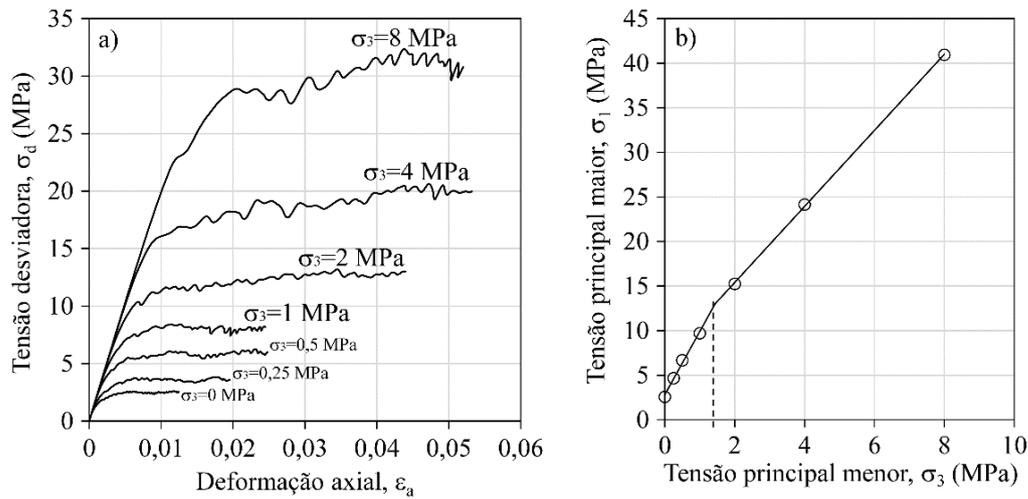


Figura 5.25 – Resultado dos ensaios numéricos de compressão biaxial nas amostras virtuais na escala de campo, Amostra B2_600, Caso 3: (a) curva tensão-deformação, e (b) envoltória de resistência bilinear no espectro das tensões confinantes analisadas, típico para todos os testes biaxiais na escala de campo.

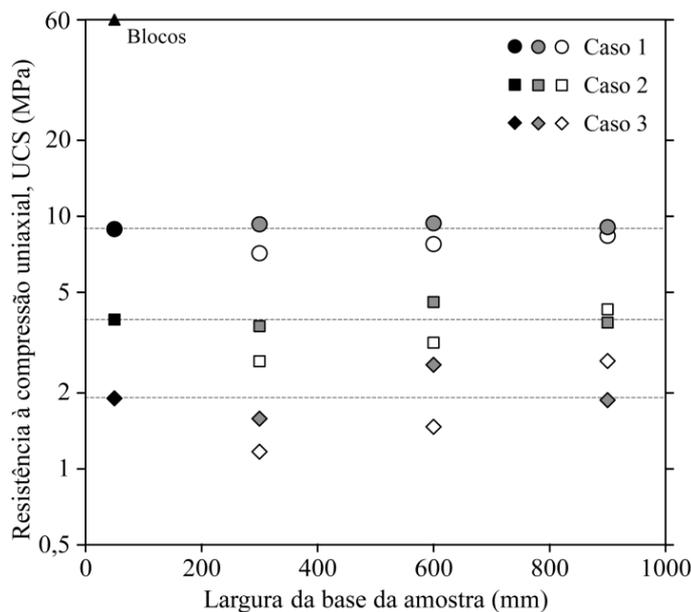


Figura 5.26 – Resistência à compressão uniaxial nas amostras virtuais na escala de campo. Preto: matriz. Branco: amostra horizontal. Cinza: amostra vertical.

Geralmente, os resultados obtidos diferem do comportamento típico observado em maciços rochosos fraturados, como os descritos por Bieniawski & van Heerden (1975) ou Pratt *et al.* (1972), onde usualmente é relatado um decréscimo monotônico na resistência como o aumento do tamanho da amostra.

O parâmetro da coesão no intervalo de tensões de confinamento entre 0-2 MPa apresentou o mesmo comportamento da resistência à compressão uniaxial, com um decréscimo nos corpos de prova com largura de 300 mm, para depois aumentar até atingir um valor igual ou maior que o da coesão da matriz para os corpos de prova de 600 mm e 900 mm (Figura 5.27a). O aumento na coesão com o tamanho da amostra foi maior nos corpos de prova testados com uma menor coesão da matriz (casos 2 e 3).

No intervalo das tensões confinantes entre 2-8 MPa, a coesão ficou constante com o acréscimo do tamanho do corpo de prova. Em todos os casos estudados no intervalo de 2-8 MPa, a coesão do conglomerado na escala de campo foi superior à coesão da matriz (Figura 5.27b).

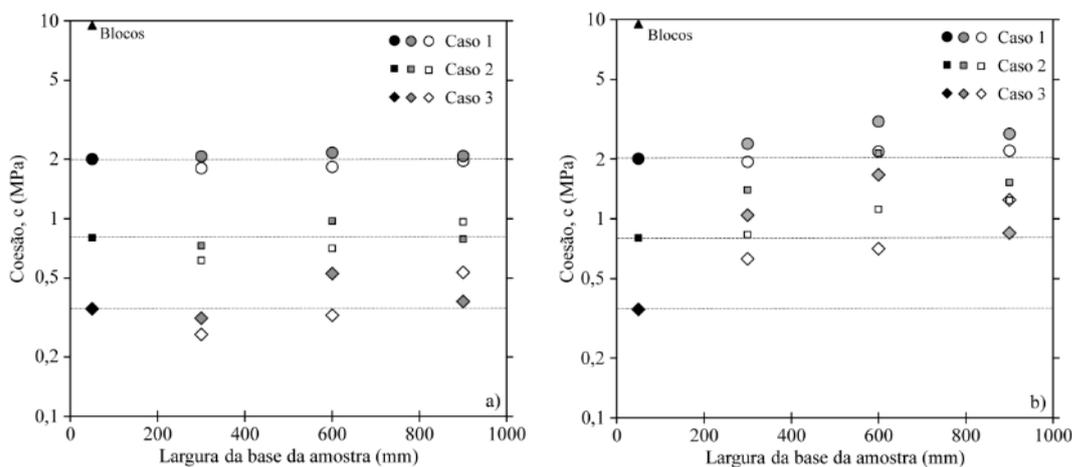


Figura 5.27 – Coesão nas amostras virtuais na escala de campo, obtida através da interpretação dos ensaios de compressão biaxial: (a) intervalo das tensões de confinamento $\sigma_3=0-2$ MPa, (b) intervalo das tensões de confinamento $\sigma_3=2-8$ MPa. Preto: matriz. Branco: amostra horizontal. Cinza: amostra vertical.

O ângulo de atrito no intervalo de tensões de confinamento entre 0-2 MPa apresentou grande dispersão nos ensaios realizados nas amostras de 300 mm. Nos testes efetuados nos corpos de prova de 600 mm e 900 mm a dispersão diminuiu, além disso, foi observado um ângulo de atrito do conglomerado levemente inferior ao ângulo de atrito da matriz. Geralmente, esta diferença foi menor que três graus (Figura 5.28a).

No intervalo das tensões confinantes entre 2-8 MPa, o ângulo de atrito do conglomerado apresentou uma diminuição ainda maior, de entre 5 a 9 graus em comparação com o ângulo de atrito da matriz. (Figura 5.28b).

Geralmente, os valores dos parâmetros de resistência obtidos da interpretação dos ensaios biaxiais no intervalo de tensões de confinamento de 0-2 MPa são semelhantes aos parâmetros obtidos dos ensaios de cisalhamento direto *in situ* no intervalo das tensões normais de 0-1 MPa. Só a coesão no Caso 1 apresenta valores maiores que o intervalo de valores obtidos dos ensaios de campo (Tabela 5.22).

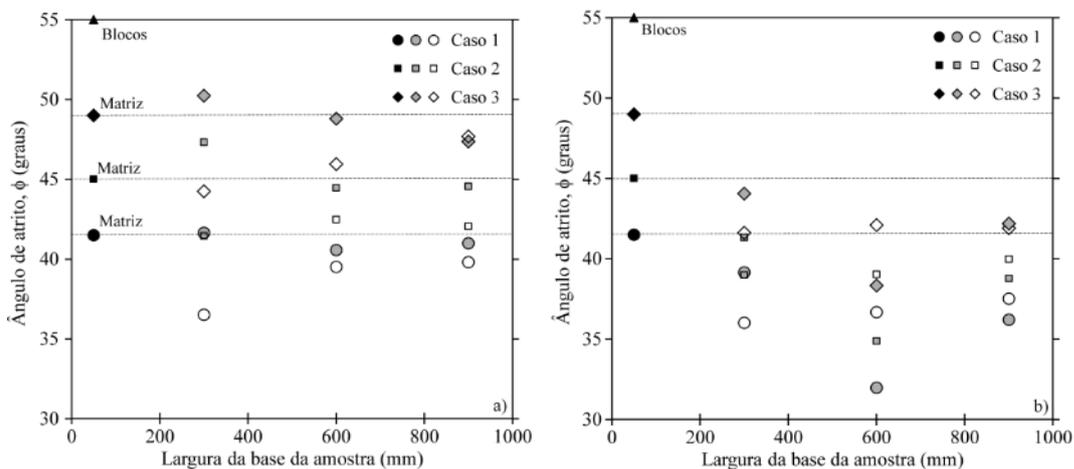


Figura 5.28 – Ângulo de atrito nas amostras virtuais na escala de campo, obtida através da interpretação dos ensaios de compressão biaxial: (a) intervalo das tensões de confinamento $\sigma_3=0-2$ MPa, (b) intervalo das tensões de confinamento $\sigma_3=2-8$ MPa. Preto: matriz. Branco: amostra horizontal. Cinza: amostra vertical.

O intervalo de valores da resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso obtido da modelagem numérica foi sempre maior que o calculado segundo o índice RMi (Tabela 5.23). Esta diferença pode ser explicada na utilização do valor genérico para o parâmetro de ajuste $f_\sigma=0,5$. Este resultado indica que o parâmetro de ajuste f_σ deve ter um valor maior que 0,75 no conglomerado estudado.

Por outro lado, os valores de resistência à compressão uniaxial e a coesão do maciço rochoso estimados utilizando o critério de resistência empírico proposto por Kalender *et al.* (2014) estão sempre no intervalo de valores estimados na modelagem numérica. Porém, o valor do ângulo de atrito é sempre menor que o determinado na modelagem numérica (Tabela 5.23). Geralmente, o critério de resistência de Kalender *et al.* (2014) aporta bons resultados e poderia ser utilizado

para obter de forma conservadora as propriedades de resistência dos conglomerados nas etapas iniciais de projeto.

Tabela 5.22 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos da interpretação dos ensaios numéricos biaxiais realizados nas amostras virtuais do conglomerado na escala de campo.

Caso	Amostra	UCS (MPa)	$\sigma_3 = 0-2$ MPa		$\sigma_3 = 2-8$ MPa	
			c (MPa)	ϕ (graus)	c (MPa)	ϕ (graus)
1	B1_300	7,13	1,80	36,5	1,93	36,0
1	B2_300	9,30	2,06	41,6	2,38	39,2
1	B1_600	7,76	1,83	39,5	2,17	36,7
1	B2_600	9,38	2,16	40,6	3,07	32,0
1	B1_900	8,53	2,00	39,8	2,20	37,5
1	B2_900	9,06	2,08	41,0	2,67	36,2
2	B1_300	2,67	0,62	41,4	0,83	39,0
2	B2_300	3,67	0,73	47,3	1,39	41,3
2	B1_600	3,15	0,71	42,5	1,12	39,0
2	B2_600	4,58	0,97	44,5	2,13	34,9
2	B1_900	4,28	0,96	42,1	1,24	40,0
2	B2_900	3,79	0,79	44,6	1,52	38,8
3	B1_300	1,17	0,26	44,2	0,63	41,6
3	B2_300	1,58	0,31	50,2	1,04	44,1
3	B1_600	1,46	0,32	46,0	0,71	42,1
3	B2_600	2,58	0,53	48,8	1,66	38,3
3	B1_900	2,67	0,53	47,7	1,24	41,9
3	B2_900	1,87	0,38	47,4	0,85	42,2
*ECDM	G1-3	–	1,01	57,8	–	–
ECDM	G2-3	–	0,77	35,4	–	–
ECDM	G2-4	–	0,62	44,1	–	–
ECDM	G3-1	–	0,04	58,1	–	–
ECDM	G3-2	–	0,52	48,3	–	–

*ECDM: Ensaio de cisalhamento direto multi-estagio *in situ* realizados no local da barragem do PHED

A deformabilidade das amostras na escala de campo foi estudada mediante a variação do módulo de deformabilidade (E) dos diferentes materiais que compõem o modelo do conglomerado. No total foram analisados quatro casos (Tabela 5.24), onde os parâmetros de resistência foram considerados constantes (parâmetros do Caso 1, Tabela 5.19 e Tabela 5.20).

Tabela 5.23 – Comparação dos parâmetros de resistência obtidos dos testes numéricos de compressão biaxial na escala de campo com os valores calculados por meio de métodos empíricos (intervalo de tensões de confinamento $\sigma_3 = 0-2$ MPa).

Parâmetro	Ensaio / Critério	Caso 1	Caso 2	Caso 3
UCS (MPa)	Compressão biaxial – numérico	7,13 – 9,38	2,67 – 4,58	1,17 – 2,67
	<i>Bim strength criterion</i>	7,93 – 8,22	3,46 – 3,59	1,66 – 1,73
	Índice RMi	4,45	1,95	0,95
c (MPa)	Compressão biaxial – numérico	1,8 – 2,16	0,62 – 0,97	0,26 – 0,53
	<i>Bim strength criterion</i>	1,94 – 2,09	0,84 – 0,89	0,41 – 0,42
	Cisalhamento direto - <i>in situ</i>	0,52 – 1,01	0,52 – 1,01	0,52 – 1,01
ϕ (graus)	Compressão biaxial – numérico	36,5 – 41,6	41,4 – 47,3	44,2 – 50,2
	<i>Bim strength criterion</i>	34,9 – 36,1	35,1 – 37,1	35,4 – 38,2
	Cisalhamento direto - <i>in situ</i>	35,4 – 57,8	35,4 – 57,8	35,4 – 57,8

Nas análises foi observado que o módulo de deformabilidade do conglomerado possui um valor intermédio entre os módulos de deformabilidade da matriz e dos blocos. Além disso, pode observar-se como a variação do módulo de deformabilidade é relativamente pequena no intervalo de tamanhos das amostras analisadas (300 mm até 900 mm), apresentando uma tendência quase constante (Tabela 5.25 e Figura 5.29). O resultado obtido é distinto ao relatado por Zhang *et al.* (2015) que propõem uma variação linear monotônica crescente do módulo de deformabilidade com o tamanho da amostra, independentemente da *PVB* utilizada. Também foi verificado como o módulo de deformabilidade da matriz tem maior influência no valor do módulo de deformabilidade do conglomerado quando comparada com a influência do módulo de deformabilidade dos blocos, semelhante resultado relatado para as amostras na escala de laboratório nesta mesma pesquisa (item 5.3.1).

Tabela 5.24 – Módulo de deformabilidade, E (MPa) dos materiais utilizados nas análises do conglomerado na escala de campo.

Caso	Matriz	Interface	Blocos
A	1280	960	5000
B	800	600	5000
C	2000	1500	5000
D	1280	960	10000

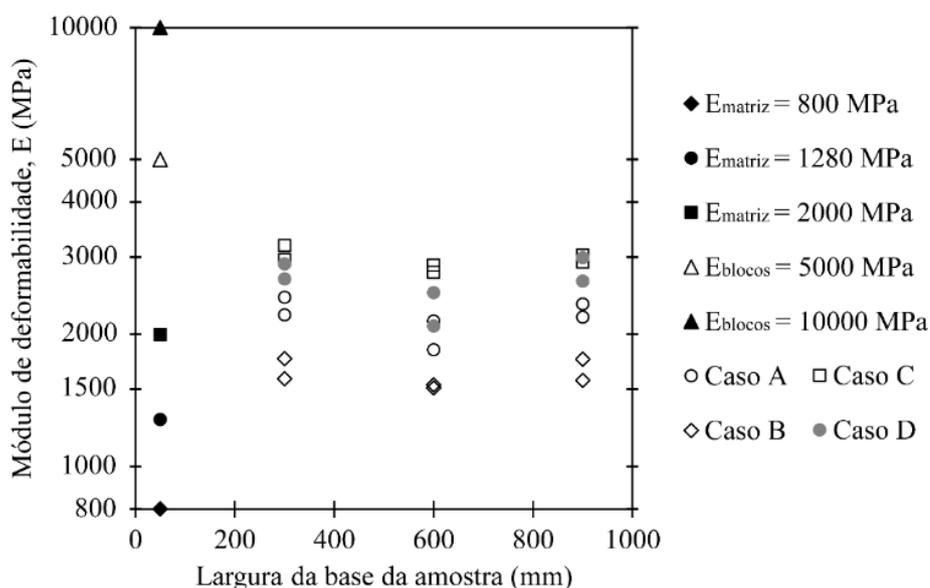


Figura 5.29 – Resultados dos testes numéricos de compressão biaxial, realizados para estudar a deformabilidade das amostras virtuais do conglomerado na escala de campo.

Tabela 5.25 – Resultados dos testes numéricos de compressão biaxial, realizados para estudar a deformabilidade das amostras virtuais do conglomerado na escala de campo.

Amostra	Módulo de deformabilidade, E (MPa)			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
B1_300	2215	1585	2960	2675
B2_300	2430	1760	3190	2895
B1_600	2145	1535	2880	2490
B2_600	1845	1510	2770	2090
B1_900	2345	1755	3030	2990
B2_900	2190	1570	2920	2645
Intervalo dos ensaios <i>in situ</i>	800 – 3500			

5.3.2.2. Ensaio de cisalhamento direto

A resistência do conglomerado também foi estudada através de ensaios de cisalhamento direto, realizados em quatro corpos de prova quadrados, com um comprimento de 700 mm (Figura 5.30 e Tabela 5.26). A espessura do material da interface ao redor dos blocos foi definida segundo o critério demonstrado na Tabela 5.13, e as condições de contorno empregadas nos ensaios de cisalhamento direto são apresentadas na Figura 5.31.

Nos ensaios de cisalhamento direto foram analisados os mesmos três casos estudados nos testes de compressão biaxial na escala de campo (item 5.3.1), variando os parâmetros de resistência da matriz (Tabela 5.19) e da interface (Tabela 5.20). Porém, os parâmetros de resistência dos blocos (Tabela 5.21) e os parâmetros de deformabilidade de todos os materiais foram considerados constantes.

Nos ensaios realizados foi possível observar como a plastificação nos corpos de prova iniciou-se na zona de interface, para logo se propagar pela matriz, idêntico comportamento verificado nos ensaios de compressão biaxial nas escalas de campo e laboratório (Figura 5.32a e Figura 5.32b). As zonas de interface, além de terem uma menor resistência são regiões associadas com altas concentrações de tensões, isto explica o motivo de ocorrer primeiro ali a plastificação.

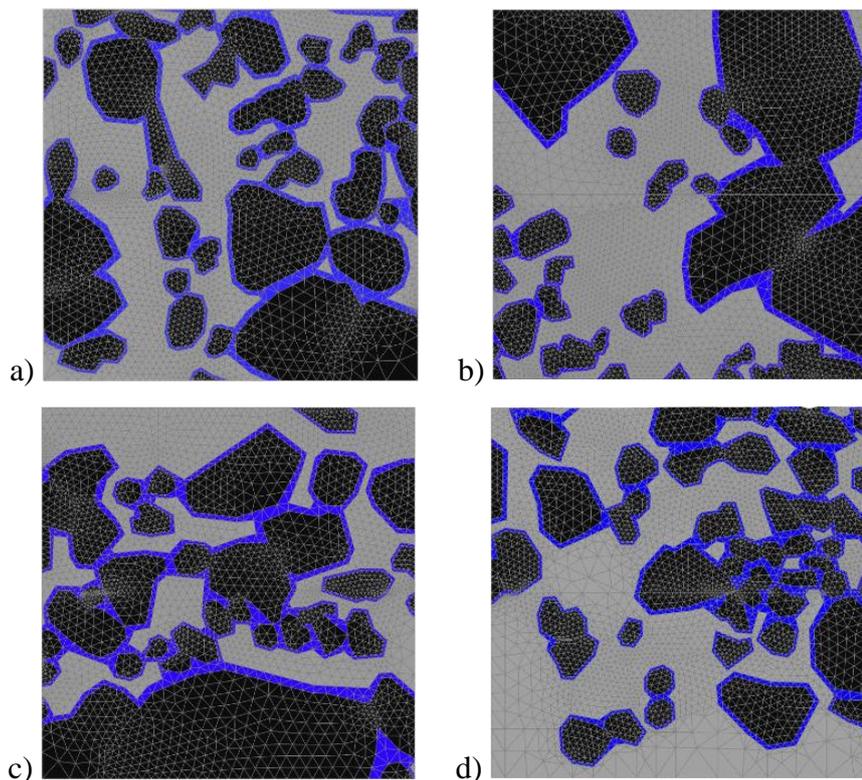


Figura 5.30 – Amostras virtuais para ensaios de cisalhamento direto na escala de campo ($700 \times 700 \text{ mm}^2$): (a) amostra C1_700, (b) amostra C2_700, (c) amostra C3_700, e (d) amostra C4_700. Preto: blocos, Cinza: matriz, Azul: interface.

Tabela 5.26 – Detalhe das amostras virtuais para ensaios de cisalhamento direto na escala de campo.

Amostra	Largura (mm)	Num. Nós	Num. Elementos
C1_700	700	16923	8231
C2_700	700	14833	7224
C3_700	700	11926	5799
C4_700	700	15453	7573

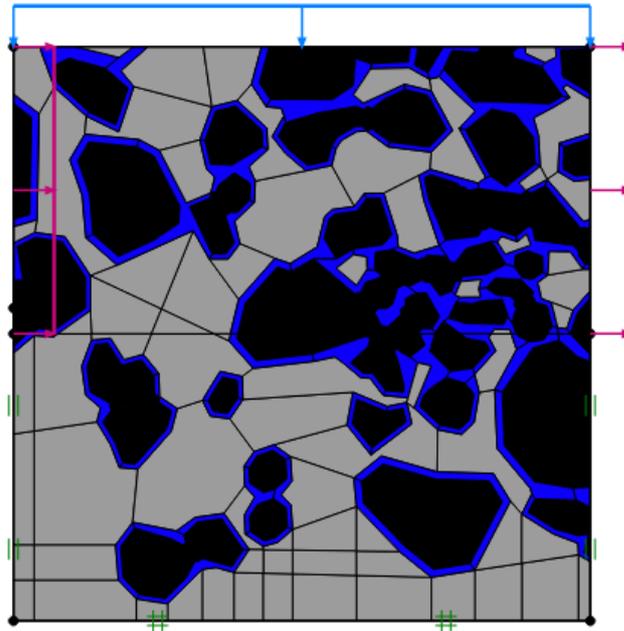


Figura 5.31 – Condições de contorno utilizadas nos testes de cisalhamento direto na escala de campo. Face inferior: deslocamento nulo nos eixos horizontal e vertical. Face superior: deslocamento livre nos eixos horizontal e vertical, carregamento vertical uniforme. Lados inferiores: deslocamento horizontal nulo, deslocamento vertical livre. Lados superiores: deslocamento horizontal prescrito, deslocamento vertical livre.

Da análise das deformações no corpo de prova ao final no ensaio pode-se observar como a propagação do dano associado com a plastificação da amostra apresenta um comportamento tortuoso, como superfícies de falha contínuas ou discretas, claramente influenciadas pela presença dos blocos e semelhante à descrita por Medley (1994a), Lindquist (1994) e Afifpour & Moarefvand (2013b). Além disso, foram identificados os modos de propagação da ruptura 1 e 2 (Tabela 2.6) relatados por Xu *et al.* (2008) em misturas de solo e blocos de rocha (Figura 5.32d).

Foi observado um comportamento dilatante em todos os testes numéricos de cisalhamento direto realizados nas amostras virtuais de conglomerado (Figura 5.32c e Figura 5.33), comportamento semelhante ao observado nos ensaios de cisalhamento direto multiestágio *in situ* executados no conglomerado no local da barragem do PHED (Figura 4.9).

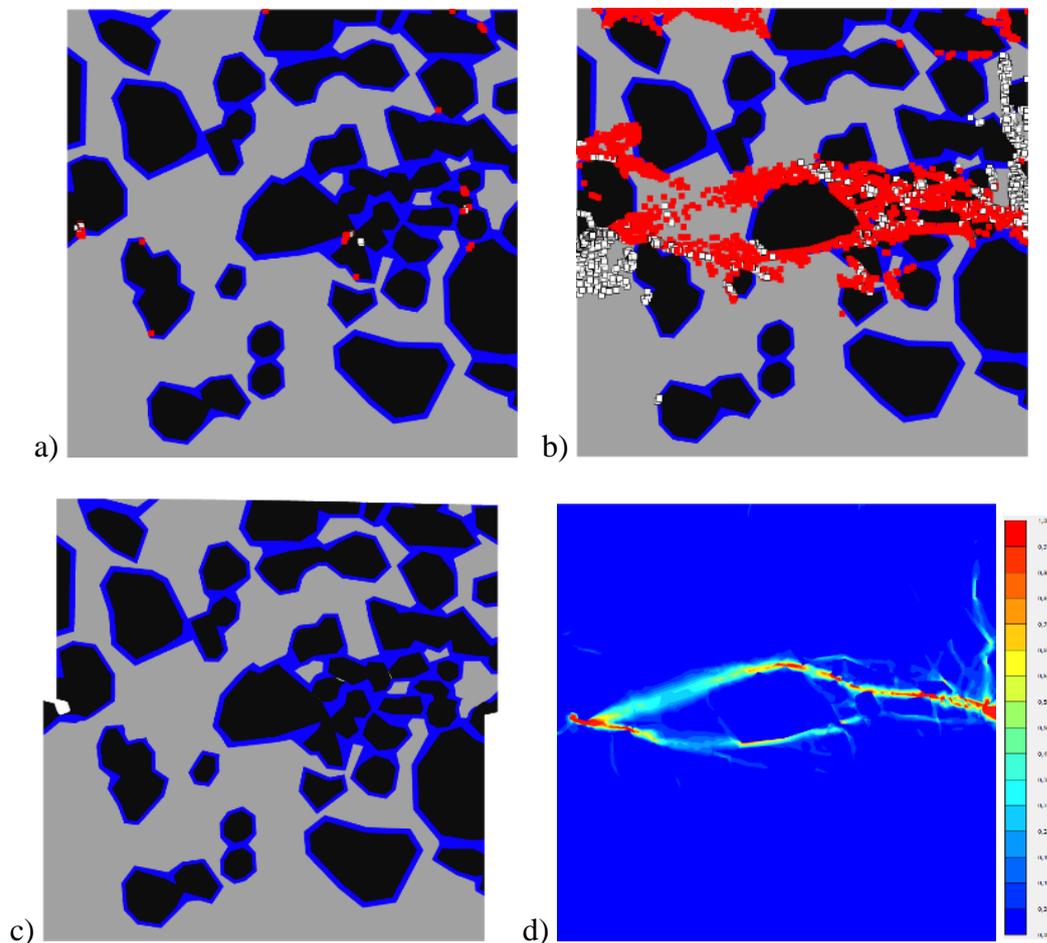


Figura 5.32 – Ensaio de cisalhamento direto realizado na amostra C4_700, com os parâmetros de resistência do Caso 1 e uma tensão de confinamento $\sigma_n=8$ MPa: (a) primeiros pontos plásticos no corpo de prova, (b) pontos plásticos ao final do ensaio numérico, (c) amostra deformada ao final do teste, e (d) deformação desviadora (γ_s). Branco: pontos plásticos por falha a tração. Vermelho: pontos plásticos por falha por cisalhamento.

Foram desenhadas as curvas tensão-deslocamento (Figura 5.34a) e delas obtidos os valores de resistência de pico de cada ensaio de cisalhamento direto. Na interpretação dos ensaios numéricos de cisalhamento direto foi utilizada a

metodologia abordada no item 3.3.3. Todos os casos analisados apresentaram uma envoltória de resistência bilinear, com uma mudança na inclinação dos trechos retos para tensões normais entre 1 MPa e 2 MPa (Figura 5.34b).

Os valores dos parâmetros de resistência obtidos da interpretação dos ensaios numéricos de cisalhamento direto no intervalo de tensões normais de 0-2 MPa são semelhantes aos parâmetros obtidos dos ensaios de cisalhamento direto *in situ* no intervalo das tensões normais de 0-1 MPa. Só a coesão no Caso 1 apresenta valores maiores que o intervalo de valores obtidos dos ensaios de campo (Tabela 5.22). Geralmente, este é o mesmo comportamento observado nos ensaios numéricos de compressão biaxial (item 5.3.2.1).

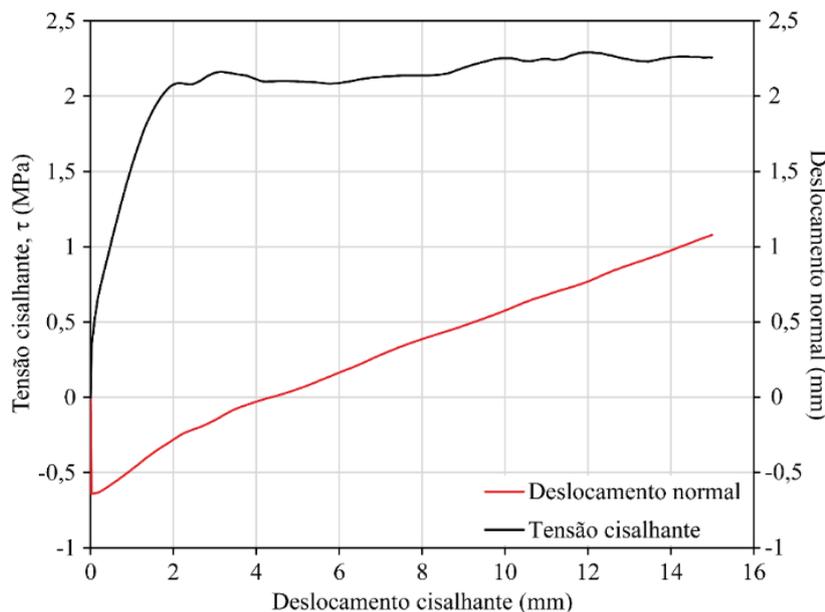


Figura 5.33 – Ensaio numérico de cisalhamento direto realizados no conglomerado, amostra C2_700, Caso 2, $\sigma_n=2$ MPa.

Comparando os resultados obtidos dos ensaios numéricos de cisalhamento direto com os resultados dos testes numéricos de compressão biaxial pode observar-se como usualmente a coesão é semelhante para qualquer dos casos analisados. O ângulo de atrito no intervalo das tensões de confinamento de 2-8 MPa apresenta também valores muito semelhantes nos dois tipos de testes. Porém, no intervalo de tensões de confinamento de 0-2 MPa o ângulo de atrito obtido dos ensaios de cisalhamento direto apresenta valores maiores (Tabela 5.28).

A coesão do maciço rochoso estimada utilizando o critério de resistência empírico proposto por Kalender *et al.* (2014) fica próxima ou dentro do intervalo

de valores estimados dos ensaios numéricos de cisalhamento direto. Porém, o valor do ângulo de atrito é sempre menor que o determinado pela modelagem numérica (Tabela 5.29). O comportamento relatado é semelhante ao reportado nos testes numéricos de compressão biaxial (item 5.3.2.1).

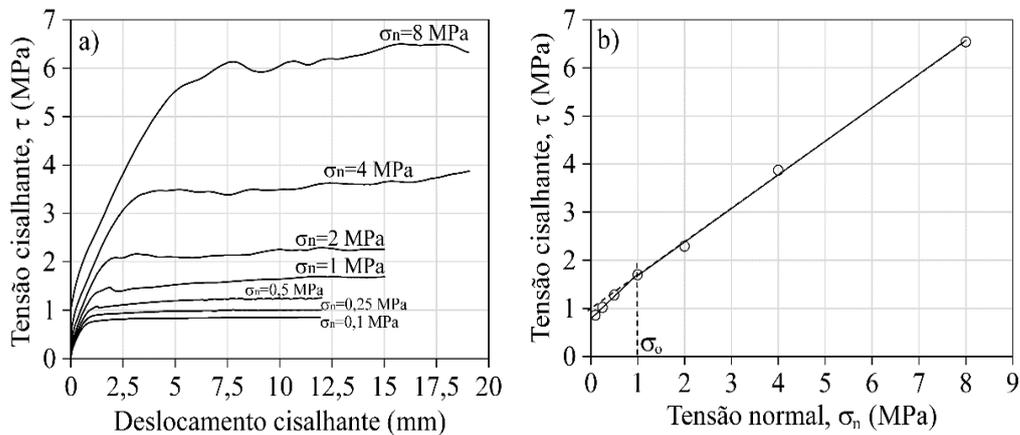


Figura 5.34 – Resultados dos ensaios numéricos de cisalhamento direto nas amostras virtuais na escala de campo, amostra C2_700, Caso 2, Caso 1: (a) curvas tensão-deslocamento, e (b) envoltória de resistência bilinear no espectro das tensões normais analisadas, típico para todos os ensaios cisalhantes na escala de campo.

Tabela 5.27 – Resultados dos ensaios numéricos de cisalhamento direto realizado nas amostras virtuais do conglomerado.

Caso	Amostra	$\sigma_n = 0-1$ MPa		$\sigma_n = 1-8$ MPa	
		c (MPa)	ϕ (graus)	c (MPa)	ϕ (graus)
1	C1_700	2,23	42,5	2,58	35,3
1	C2_700	1,94	39,1	2,27	33,7
1	C3_700	1,92	52,4	2,83	39,5
1	C4_700	2,14	48,8	2,62	40,4
2	C1_700	0,88	46,5	1,36	36,2
2	C2_700	0,78	42,9	0,96	35,1
2	C3_700	0,64	57	1,63	41,2
2	C4_700	0,82	51,2	1,27	42,2
3	C1_700	0,46	46,7	0,81	40,1
3	C2_700	0,42	43,1	0,41	39,5
3	C3_700	0,40	57,7	1,35	43,4
3	C4_700	0,46	52,8	0,92	44,5
*ECDM	G1-3	1,01	57,8	–	–
ECDM	G2-3	0,77	35,4	–	–
ECDM	G2-4	0,62	44,1	–	–
ECDM	G3-1	0,04	58,1	–	–
ECDM	G3-2	0,52	48,3	–	–

*ECDM: Ensaio de cisalhamento direto multi-estágio *in situ* realizados no local da barragem do PHED

Tabela 5.28 – Comparação dos parâmetros de resistência obtidos dos testes numéricos de compressão biaxial e dos ensaios numéricos de cisalhamento direto na escala de campo.

Parâmetro	Intervalo das tensões normais	Tipo de ensaio	Caso 1	Caso 2	Caso 3
C (MPa)	$\sigma_n = 0-1$ MPa	Compressão biaxial	1,8 – 2,16	0,62 – 0,97	0,26 – 0,53
		Cisalhamento direto	1,92 – 2,23	0,64 – 0,88	0,4 – 0,46
	$\sigma_n = 1-8$ MPa	Compressão biaxial	1,93 – 3,07	0,83 – 2,13	0,63 – 1,66
		Cisalhamento direto	2,27 – 2,83	0,96 – 1,63	0,41 – 1,35
ϕ (graus)	$\sigma_n = 0-1$ MPa	Compressão biaxial	36,5 – 41,6	41,4 – 47,3	44,2 – 50,2
		Cisalhamento direto	39,1 – 52,4	42,9 – 57	43,1 – 57,7
	$\sigma_n = 1-8$ MPa	Compressão biaxial	32 – 39,2	34,9 – 41,3	38,3 – 44,1
		Cisalhamento direto	33,7 – 40,4	35,1 – 42,2	39,5 – 44,5

Tabela 5.29 – Comparação dos parâmetros de resistência obtidos dos ensaios de cisalhamento direto na escala de campo com os valores calculados por meio de métodos empíricos (intervalo de tensões normais $\sigma_n = 0-1$ MPa).

Parâmetro	Ensaio / Critério	Caso 1	Caso 2	Caso 3
C (MPa)	Cisalhamento direto – numérico	1,92 – 2,23	0,64 – 0,88	0,4 – 0,46
	<i>Bim strength criterion</i>	1,94 – 2,09	0,84 – 0,89	0,41 – 0,41
	Cisalhamento direto - <i>in situ</i>	0,52 – 1,01	0,52 – 1,01	0,52 – 1,01
ϕ (graus)	Cisalhamento direto – numérico	36,5 – 41,6	41,4 – 47,3	44,2 – 50,2
	<i>Bim strength criterion</i>	34,9 – 36,1	35,1 – 37,1	35,4 – 38,2
	Cisalhamento direto - <i>in situ</i>	35,4 – 57,8	35,4 – 57,8	35,4 – 57,8

5.3.2.3. Ensaio de placa

A deformabilidade do conglomerado na escala de campo também foi estudada mediante ensaios numéricos de placa. No total foram analisados os mesmos quatro casos estudados nos ensaios biaxiais, variando os parâmetros de deformabilidade dos diferentes materiais do conglomerado (Tabela 5.24). Os parâmetros de resistência de todos os materiais foram considerados constantes nos ensaios de placa realizados (parâmetros de resistência da matriz e da interface do Caso 1: Tabela 5.19 e Tabela 5.20; parâmetros de resistência dos blocos: Tabela 5.21).

Nos ensaios numéricos de placa foi utilizada uma amostra virtual quadrada, com uma largura de 2.700 mm, 88.611 nós e 43.854 elementos (Figura 5.35a).

As condições de contorno impostas na modelagem numérica são apresentadas na Figura 5.35b.

Na interpretação dos ensaios numéricos de placa foi utilizada a metodologia apresentada no item 3.3.4. Foi utilizado no cálculo do módulo de deformabilidade um parâmetro elástico de Poisson $\nu=0,25$ (valor médio do coeficiente de Poisson dos blocos e da matriz). Nos ensaios de placa foi observado novamente que a matriz tem uma influência maior que os blocos na deformabilidade do conglomerado (Tabela 5.30), resultado relatado também dos ensaios numéricos de compressão na escala de campo e de laboratório.

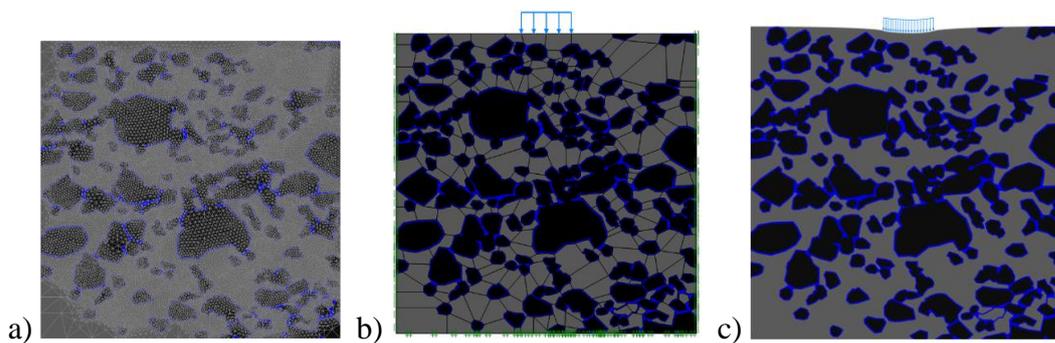


Figura 5.35 – Ensaio virtual de placa: (a) amostra virtual para ensaios de placa na escala de laboratório, (b) condições de contorno impostas na amostra virtual para os ensaios numéricos de placa: Face inferior: deslocamento nulo nos eixos horizontal e vertical. Lados: deslocamento horizontal nulo, deslocamento vertical livre. Face superior: deslocamento livre nos eixos horizontal e vertical, carregamento vertical uniforme de 45 cm de largura simulando a placa, (c) amostra virtual do conglomerado deformada ao final do ensaio numérico de placa (deslocamento $\times 20$). Preto: blocos, Cinza: matriz, Azul: interface.

Tabela 5.30 – Resultados dos ensaios numéricos de placa realizados na amostra virtual do conglomerado.

Caso	Módulo de deformabilidade, E (MPa)
A	2290
B	1545
C	3260
D	2550

Os resultados de todos os ensaios numéricos de placa ficaram no intervalo de valores reportados nos ensaios de placa *in situ* e no intervalo obtido dos ensaios numéricos de compressão (Tabela 5.31).

Tabela 5.31 – Comparação do módulo de deformabilidade obtido dos ensaios numéricos de compressão biaxial e dos testes numéricos de placa, ambos na escala de campo.

Ensaio	Módulo de deformabilidade, E (MPa)			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
Compressão biaxial – numérico	1845 – 2430	1510 – 1760	2770 – 3190	2090 – 2990
Placa – numérico	2290	1545	3260	2550
Placa – <i>in situ</i>	800 – 3500	800 – 3500	800 – 3500	800 – 3500