5. Análise dos resultados

Este capítulo apresenta uma análise comparativa dos resultados dos ensaios realizados em laboratório e campo, apresentados anteriormente. O objetivo principal reside na tentativa de associar o comportamento de resistência dos grampos no campo aos parâmetros de resistência do solo e da interface solo/nata de cimento obtidos em laboratório.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto em solo e na interface solo/nata de cimento, dos ensaios de caracterizição dos solos e as informações do relatório de sondagem indicam que a campanha experimental de campo e laboratório foi realizada em dois solos diferentes. Desta forma, pode-se definir para o estudo apresentado neste capítulo, o solo 1 correspondendo à argila-arenosa (solo residual maduro) dos ensaios da cota de 35m, e como solo 2 referente à areia-argilosa (solo residual jovem) das demais cotas de estudo (27, 21 e 17,5m).

A Figura 1 apresenta um esquema de locação dos ensaios ao longo do talude com identificação dos solos 1 (argila-arenosa) e 2 (areia-argilosa).



Figura 1 – Perfil da escavação grampeada com as posições de arrancamento e amostragem.

5.1. Ensaios de cisalhamento direto

Para realização da análise comparativa entre os ensaios de campo e de laboratório, avaliou-se que os ensaios de cisalhamento direto nas condições naturais eram os que mais representavam as características reais de campo.

Da Figura 1 nota-se que o solo 1 é representado pelos ensaios realizados no bloco 1, enquanto que os parâmetros de resistência do solo 2 podem ser definidos através dos ensaios realizados nos blocos B02, B03 e B04. Assim, pode se definir a envoltória média de resistência do solo 2 baseando-se nos ensaios realizados nestes blocos, enquanto que para o solo 1 segue-se com os mesmos parâmetros apresentados no capítulo 4 equivalentes aos ensaios realizados no bloco 1.

As Figuras 65 e 66 apresentam as envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo e da interface solo/nata de cimento para os solos 1 e 2.



Figura 2 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo 1.



Figura 3 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo 2.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros de resistência de pico dos solos 1 e 2.

Amostra	Tipo de	Solo	/solo	Interface sol	o/nata (pico)		
741105114	solo	c' (kPa)	φ'	c _a ' (kPa)	δ'		
Solo 1	Argila- arenosa	36,4	29,6°	39,1	35,8°		
Solo 2	Areia- argilosa	59,0	36,4°	30,6	37,9°		
onde: c' = coesão do solo; \u00f6' = \u00e5ngulo de atrito do solo; ca' = adesão solo/nata							
de cimento; δ' = ângulo de atrito da interface solo/nata de cimento							

Tabela 1 - Parâmetros de resistência dos solos 1 e 2.

Da Tabela 1 observa-se que, para o solo 1, os parâmetros de resistência ao cisalhamento da interface solo/nata de cimento são superiores aos parâmetros de resistência do solo. Entretanto, para o solo 2, esta condição se inverte, sendo os parâmetros de resistência do solo superiores aos da interface solo/nata. Este comportamento foi comentado no Capítulo 4.

5.1.1. Coeficiente de interface

A interação solo/nata de cimento depende basicamente das características do solo que envolve o grampo e das características do contato entre o solo e a nata de cimento. A resistência da interface pode ser representada pela seguinte equação:

$$\tau = c_a + \sigma_v tg\delta' \tag{5.1}$$

onde: τ = resistência ao cisalhamento na interface; c_a ' = adesão solo/nata de cimento; σ_n = tensão normal aplicada à interface; δ ' = ângulo de atrito na interface solo/nata de cimento.

Pode-se expressar os parâmetros de resistência da interface em função dos parâmetros de resistência do solo (c' e ϕ '). Para isso, utilizou-se um coeficiente de interface (α) que pode ser definido como:

$$\alpha = \frac{c_a' + \sigma_n tg\delta'}{c' + \sigma_n tg\phi'}$$
(5.2)

onde: α = coeficiente de interface; c_a' = adesão solo/nata de cimento; σ_n = tensão normal; δ' = ângulo de atrito na interface solo/nata de cimento; c' = coesão do solo; ϕ' = ângulo de atrito do solo.

Da Equação (5.2), pode-se definir as curvas de variação do coeficiente de interface em função de σ_n Estas curvas estão apresentadas na Figura 4.



Figura 4 – Variação do coeficiente de interface em função da tensão normal.

Observa-se que o coeficiente de interface é mais sensível à variação da tensão normal no solo 2. No solo 1, o valor de α é praticamente constante com o aumento da tensão normal, ou seja, os parâmetros c' e c_a' são dominantes.

Determinado o coeficiente de interface, pode-se obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento da interface solo/nata diretamente a partir dos parâmetros de resistência do solo, expressando a Equação (5.1) da seguinte forma:

$$\tau = \alpha.(c + \sigma_n.tg\phi)$$
(5.3)

onde: α = coeficiente de interface: σ_n = tensão normal aplicada; c' = coesão do

solo; $\phi' = \hat{a}$ ngulo de atrito do solo.

5.2. Resistência ao arrancamento

No Capítulo 3 foram apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento realizados ao longo da encosta em estudo. Para se comparar a resistência ao arrancamento dos grampos com os ensaios de cisalhamento direto em laboratório, foram avaliadas as tensões atuantes nos grampos.

5.2.1.

Avaliação das tensões atuantes nos grampos

Na Figura 1 pode-se observar que as tensões atuantes nos grampos não são idênticas para cada cota de ensaios de arrancamento. A determinação das tensões normais nos grampos foi realizada através do programa computacional de elementos finitos *Geoslope*, comumente utilizado pela comunidade geotécnica.

O programa fornece, entre outras coisas, as tensões atuantes nos planos horizontal e vertical para cada ponto da malha pré-definida, bem como as tensões principais atuantes nestes pontos. A Tabela 2 apresenta os dados de saída do programa para cada cota de estudo. Foi utilizada a convenção de sinais usual em geotecnia, sendo consideradas como positivas as tensões normais de compressão, as tensões de cisalhamento no sentido anti-horário e os ângulos no sentido horário.

Os grampos são inseridos no maciço com uma inclinação de 11,3º em relação ao plano horizontal e perpendiculares à face do talude (Figura 1). Sendo assim, para se determinar as tensões normais aos grampos, utilizou-se o círculo de Mohr, que é a representação gráfica do estado de tensões atuantes em todos os planos passando por um ponto. A Figura 5 representa como foram determinadas as tensões normais ao longo dos grampos.

Considerando o estado de tensões a cada metro de comprimento correspondente às tensões principais ($\sigma_1 e \sigma_3$) e tensões normal e de cisalhamento nos planos horizontal e vertical (Tabela 2), pode-se representar o círculo de Mohr correspondente para estes pontos. Traçando-se um plano horizontal passando pelo ponto do círculo que representa a tensão vertical e um plano vertical pelo ponto que representa a tensão horizontal, pode-se definir o pólo do círculo de Mohr.

Tabela 2 – Valores da tensões nos grampos de arrancamento.

Encaioc	Cota	Distância da	σ ₁	σ_3	σν	σ_{h}	τ_{hv}
LIISalos	(m)	cabeça (m)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
		1m	35,1	3,2	26,2	5,7	-16,2
AB01	35.0	2m	88,0	8,6	79,5	17,3	-24,6
74101	00,0	3m	99,0	13,5	95,4	17,1	-17,3
		4m	98,4	16,0	97,2	17,2	-9,8
AR02		1m	50,4	5,6	36,5	8,3	-24,2
	27,0	2m	133,6	6,2	116,8	23,5	-48,0
		3m	159,4	12,2	148,4	23,2	-38,7
		4m	163,8	16,9	157,2	23,5	-30,6
		1m	222,0	4,5	200,5	26,1	-65,0
AB03	21.0	2m	229,3	27,6	207,7	49,2	-62,4
71100	21,0	3m	236,3	32,2	217,7	50,8	-58,8
		4m	246,1	35,2	229,7	51,5	-56,4
		1m	75,6	10,5	49,0	16,2	-39,8
	175	2m	210,6	10,9	177,1	44,4	-74,6
/ 110-7	17,5	3m	249,1	21,5	227,6	47,0	-71,8
		4m	254,7	31,1	234,4	51,3	-64,2



Figura 5 - Círculo de Mohr para determinação das tensões normais aos grampos.

A característica do pólo é que todos os planos que passam por ele interceptam o circulo de Mohr no ponto correspondente à tensão normal e cisalhante que age sobre este mesmo plano.

Sabe-se que grampos estão inseridos no maciço com uma inclinação de 78,7°. Então, passando-se um plano pelo pólo com esta inclinação, pode-se determinar as tensões normal e cisalhante atuantes no grampo.

Por outro lado, determinada a tensão cisalhante no plano normal ao grampo, sabe-se que a tensão cisalhante no plano perpendicular ao grampo tem a mesma magnitude, porém com sentido contrário. Com isso, pode-se determinar a tensão normal ao plano perpendicular ao grampo.

Porém, a tensão que atua no plano perpendicular ao grampo, é muito menor que a tensão normal, podendo, portanto, ser desprezada na análise de tensões ao longo do grampo.

Desta forma, as Figura 69 a 72 apresentam aproximadamente as distribuições das tensões normais e cisalhantes ao longo dos grampos, originadas pelo peso próprio do material no talude (tensões gravitacionais).



Figura 6 - Distribuição das tensões ao longo do grampo AR01.



Figura 7 - Distribuição das tensões ao longo do grampo AR02.



Figura 8 - Distribuição das tensões ao longo do grampo AR03.



Figura 9 - Distribuição das tensões ao longo do grampo AR04.

Analisando a distribuição das tensões ao longo dos grampos (Figuras 69 a 72) observa-se uma grande semelhança nos grampos AR01, AR02 e AR04, imposta pelas condições geométricas do talude. Nota-se que estes grampos são posicionados nas proximidades das bermas de escavação, o que provoca uma variação significativa da tensão normal ao longo do grampo. Os pontos de maior inflexão na curva de distribuição de tensões ao longo dos grampos coincidem com a extremidade das bermas que apresentam largura de 2m (Figura 64).

A distribuição de carregamento ao longo do grampo AR03 ocorre de uma forma linear, ao contrário dos outros grampos. Nota-se que este grampo está inserido em uma cota muito mais profunda que a cota da berma. Isto não ocorre para os grampos AR01, AR02 e AR04. Neste caso, as condições de geometria do talude não interferem na distribuição das tensões ao longo do grampo AR03.

Devido ao ângulo de inserção dos grampos no maciço de terra, a tensão normal aos grampos tem valor próximo ao da tensão σ_1 , onde a tensão cisalhante é nula. Desta forma, os valores de tensão cisalhante nos grampos são muito reduzidos quando comparados aos da tensão normal (Figuras 69 a 72). Conseqüentemente, considerou-se desprezível a contribuição da tensão cisalhante na análise da resistência ao arrancamento dos grampos em função da tensão atuante.

O valor médio da tensão normal atuante no grampo, a qual é variável por condições geométricas do maciço, foi determinada pela média ponderada entre os valores pontuais de σ_n ao longo dos grampos.

A Tabela 3 apresenta o valor destas tensões normais médias atuantes nos grampos nas cotas de ensaio, bem como o valor da resistência ao arrancamento determinada no Capítulo 3. A Figura 10 ilustra a condição de carregamento nos grampos adotada.

Ensaio	Cota (m)	Tensão normal (kPa)	Resistência ao arrancamento (kPa)
AR01	35,0	75,1	166
AR02	27,0	120,3	227
AR03	21,0	223,0	275
AR04	17,5	188,3	260

Tabela 3 – Tensão normal atuante nos grampos.



Figura 10 - Esquema da distribuição da tensão normal ao longo dos grampos.

5.3. Estimativa da resistência ao arrancamento

Com o objetivo de se determinar a resistência ao arrancamento em função dos parâmetros de resistência da interação solo/nata de cimento, admite-se que o mecanismo de transferência de carga na interação solo/grampo se dá pelo deslizamento da nata de cimento no contato com o solo.

Assim, pode-se considerar que a resistência ao arrancamento (q_s) obtida nos ensaios de campo é igual à resistência ao cisalhamento na interface solo/grampo, definida em laboratório pelos ensaios de cisalhamento direto na interface solo/nata de cimento:

$$q_s = \tau \tag{5.4}$$

$$q_s = \tau = \lambda_1 . (c_a + \sigma_n . tg\delta)$$
(5.5)

onde: q_s = resistência ao arrancamento; τ = resistência ao cisalhamento; λ_1 = fator de carga; σ_n = tensão normal aplicada ao grampo; c_a ' = adesão da interface; δ ' = ângulo de atrito da interface.

Na Equação (5.5) é introduzido um fator de carga (λ_1) que envolve um conjunto de condicionantes de interação solo/grampo, tais como:

(i) Fator de escala;

(ii) Interação física entre a nata de cimento e o solo;

(iii) Sucção dos solos não saturados;

(iv) Efeito tridimensional do grampo;

(v) Condicionantes de projeto (espaçamento entre os grampos);

(vi) Efeitos da re-injeção dos grampos estudados.

A determinação do fator de carga através de análises matemáticas pode ser muito complexa ou impossível. Portanto, uma alternativa seria a determinação experimental através de um maior número de ensaios que considerassem os efeitos de interação. O fator de carga assim determinado consideraria todos estes efeitos de interação para a determinação da resistência ao arrancamento, através de ensaios de laboratório.

A fim de se propor um fator de carga (λ_1) para os solos em estudo, fez uma análise considerando o solo 1 e o solo 2 isoladamente. Vale ressaltar que a quantidade de ensaios para as duas amostras é limitada, porém colaboram para o desenvolvimento de uma análise baseada nesta proposição.

Pode-se expressar a Equação (5.5) em função dos parâmetros de resistência do solo, utilizando o coeficiente de interface (α) determinado na Equação (5.3), obtendo-se a seguinte equação:

$$q_s = \lambda_1 . \alpha . (c + \sigma_n . tg\phi)$$
(5.6)

onde: q_s = resistência ao arrancamento; λ_1 = fator de carga; α = coeficiente de interface; c' = coesão do solo; ϕ ' = ângulo de atrito do solo; σ_n = tensão normal aplicada ao grampo

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de laboratório e de campo para os solos 1 e 2 em estudo.

A Equação (5.6) pode ser reescrita de forma a avaliar a variação do coeficiente de carga (λ_1) em função da tensão normal atuante nos grampos (σ_n):

$$\lambda_1 = \frac{q_s}{\alpha(c' + \sigma_n t g \varphi')} \tag{5.7}$$

Considerando os parâmetros de resistência do solo e da interface solo/nata de cimento (Tabela 1) e os valores de resistência ao arrancamento dos grampos dos solos 1 e 2 (Tabela 3), resumidos na Tabela 4, é possível determinar o fator de carga (Equação 5.7) dos dois tipos de solos estudados.

	Parâm	netros de	e laborató	rio		Parâme	tros de o	campo	
Amostra	Tipo de	Solo-solo		Interf solo/r	ace nata	Ensaio	σ _n	q _s	
	solo	c' (kPa)	φ'	c _a ' (kPa)	δ'	Lilouio	(kPa)	(kPa)	
Solo 1	Argila- arenosa	36,4	29,6°	39,1	35,8°	AR01	75,1	166	
	Areia-					AR02	120,3	227	
Solo 2	argilosa	59,0	36,4°	30,6	37,9°	AR03	223,0	275	
	argiloba					AR04	188,3	260	
Onde: c' =	Onde: c' = coesão do solo; \u03c6' = \u00e0ngulo de atrito do solo; ca' = adesão solo/nata								
de cimento; δ' = ângulo de atrito da interface solo/nata de cimento; σ_{n} = tensão									
normal ao	grampo; q	s = resist	ência ao	arrancame	ento				

Tabela 4 – Resumo dos resultados de ensaios de laboratório e campo.

A Tabela 5 apresenta os valores do fator de carga (λ_1) em função da tensão normal (σ_n) nos grampos para os solos 1 (argila-arenosa) e 2 (areia-argilosa).

Ensaio	Solo	q₅ (kPa)	σ _n (kPa)	c' (kPa)	φ'	α	λ1	
AR01	Argila- arenosa	166	75,1	36,4	29,6°	1,19	1,92	
AR02	Areia -	227	120,3			0,84	1,83	
AR03	argilosa	275	223,0	59,0	36,4°	0,91	1,35	
AR04	argnood	260	188,3			0,90	1,47	
onde: λ_1	= fator de d	carga; q _s = re	esistência a	o arrancame	nto; $\alpha =$	coeficier	nte de	
interface; c' = coesão do solo; ϕ ' = ângulo de atrito do solo; σ_n = tensão normal								
aplicada	ao grampo)						

Tabela 5 - Fatores de carga λ_1 para os solos 1 e 2.

A Figura 11 apresenta a variação do fator de carga (λ_1) com o aumento da tensão vertical do solo 2. Observa-se que este fator tem um comportamento linear com o aumento da tensão normal. Isto demonstra que este parâmetro é determinável, desde que se consiga ter um controle das condições de contorno que envolvem os ensaios realizados em campo. Uma alternativa seria executar um ensaio de arrancamento em pequena escala com solo homogêneo de propriedades micro-estruturais conhecidas e avaliar o desempenho dos grampos com exumação posterior aos ensaios.



Figura 11 – Fator de carga λ_1 em função da tensão normal nos grampos para o solo 2.

Pode-se fazer o mesmo tipo de análise para o solo 1, porém, tem-se um ensaio para uma tensão confinante apenas.

Desta forma, o valor de λ_1 correspondente ao solo 1 foi associado aos do solo 2 na Figura 12, correspondendo ao fator de carga do solo residual de gnaisse do perfil em estudo (λ_1^*), independente do grau de intemperismo.



Figura 12 – Fator de carga λ_1^* em função da tensão nominal para solo residual de gnaisse.

Apesar da quantidade limitada de valores para se definir o fator de carga representativo de um tipo de solo, pode-se notar um comportamento linear para este parâmetro, mesmo quando utilizados solos diferentes dom mesmo perfil de intemperismo.

Em conseqüência, a determinação do fator de carga de solo residual de gnaisse permite definir uma expressão para avaliação da resistência ao arrancamento do grampo (q_s) em função dos parâmetros de resistência do solo e do coeficiente de interface, a saber:

$$q_s = \lambda_1^* \cdot \alpha \cdot (c + \sigma_n \cdot tg\phi)$$
(5.8)

onde: λ_1^* = fator de carga para solo residual de gnaisse; q_s = resistência ao arrancamento; α = coeficiente de interface; c' = coesão do solo; ϕ' = ângulo de atrito do solo; σ_n = tensão normal aplicada ao grampo.

5.4. Avaliação da relação proposta para estimativa da resistência ao arrancamento

A fim de se avaliar a relação proposta para a estimativa de q_s, optou-se por comparar resultados experimentais de resistência ao arrancamento obtidos por diferentes autores em solo residual de gnaisse com os valores calculados através da Equação (5.8).

Springer (2005) realizou ensaios de arrancamento em diferentes encostas de solo residual de gnaisse do município de Niterói. A Tabela 6 apresenta alguns resultados obtidos pela autora em ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto dos solos cirundantes aos grampos.

Ensaio	Solo	q₅ (kPa)	σ _n (kPa)	c' (kPa)	φ'			
1	Argila-	130	46.3	37.5	30.6°			
2	arenosa	169		01,0				
3	SBM	204	121.5	19.1	32.7º			
4		214		,.	02,7			
onde: q_s = resistência ao arrancamento; c' = coesão do solo; ϕ ' = ângulo de atrito								
do solo; σ_n = tensão normal aplicada ao grampo; SRM = solo residual maduro								

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de arrancamento de Springer (2005).

Os valores de q_s de Springer (2005) podem ser comparados com os previstos pela Equação (5.8). Para se determinar o coeficiente de interface (α) para os casos apresentados por Springer (2005), utilizou-se a curva apresentada na Figura 4 para o solo 1. Os solos estudados pela autora são residuais maduros e devem apresentar comportamento semelhante ao obtido no solo 1 em ensaios de cisalhamento na interface solo/nata de cimento.

O fator de carga λ_1^* pode ser determinado através da Figura 12. A

Tabela **7** apresenta os valores da resistência ao arrancamento estimados pela relação proposta.

Na Tabela 20 pode-se observar que a estimativa da resistência ao arrancamento através da Equação (5.8) é muito próxima dos valores médios da resistência ao arrancamento obtidos por ensaios de campo (Tabela 6). Nos ensaios 1 e 2 realizados por Springer (2005) tem-se um valor médio da resistência ao arrancamento de 150kPa enquanto que o valor estimado é de

153kPa. Para os ensaios 3 e 4, o valor médio experimental é de 209 kPa e o valor estimado é de 210kPa.

Solo	σ _n (kPa)	c' (kPa)	¢'	α	λ_1^*	q₅* (kPa)				
Argila-	46.3	37	30.0°	1.17	2.05	153				
arenosa	,0	0.	00,0	.,	2,00	100				
SRM	121,5	19,1	32,7	1,21	1,79	210				
onde: $\sigma_n =$	onde: σ_n = tensão normal aplicada ao grampo; c' = coesão do solo; ϕ ' = ângulo									
de atrito do solo; α = coeficiente de interface; λ_1^* = fator de carga; q_s^* =										
resistência	resistência ao arrancamento estimada; SRM = Solo Residual Maduro.									

Tabela 7 – Estimativa da resistência ao arrancamento dos grampos de Springer (2005).

Magalhães (2005) realizou ensaios de arrancamento em grampos convencionais e grampos com fibras de polipropileno na mesma encosta estudada neste trabalho. O local de ensaio utilizado pelo autor era caracterizado pela presença de um solo residual jovem areno-argiloso denominado na presente pesquisa de solo 2. Os resultados obtidos para o ensaio realizado com grampo convencional são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados de ensaios de arrancamento de Magalhães (2005).

Ensaio	Solo	q₅ (kPa)	σ _n (kPa)	c' (kPa)	φ'			
1	Areia- argilosa	144	58,5	59,0	36,4°			
onde: q_s = resistência ao arrancamento; c' = coesão do solo; ϕ ' = ângulo de atrito								
do solo; σ_n = tensão normal aplicada ao grampo								

Para se estimar a resistência ao arrancamento neste caso, utilizou-se os ensaios de interface do solo 2 (Figura 4) e o fator de carga (λ_1^{*}) da Figura 12. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Ensaio	Solo	σ _n (kPa)	c' (kPa)	φ'	α	λ1 [*]	q₅* (kPa)		
1	Areia- argilosa	58,5	59	36,4°	0,75	2,02	153		
onde: σ_n = tensão normal aplicada ao grampo; c' = coesão do solo; ϕ ' = ângulo									
de atrito do solo; α = coeficiente de interface; λ_1^* = fator de carga; q_s^* =									
resistência ao arrancamento obtida.									

Tabela 9 - Estimativa da resistência ao arrancamento do grampo de Magalhães (2005)

Novamente nota-se a semelhança do valor de resistência ao arrancamento estimada (q_s^*) pela Equação (5.8) e igual a 153kPa com o valor obtido no ensaio de arrancamento, igual a 144kPa. Porém, vale ressaltar que este ensaio foi realizado no mesmo solo utilizado no desenvolvimento da equação, e o parâmetro de interface (α) é conhecido.

Feijó e Ehrlich (2001) reportaram ensaios de arrancamento ao longo de uma encosta de solo residual de gnaisse do Rio de Janeiro. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos, bem como as características dos solos estudados por estes autores.

Cota (m)	Ensaio	Solo	q₅ (kPa)	σ _n (kPa)	c' (kPa)	φ'		
-5	1	SB.I	80	69.5	87 0	39,0°		
	2	Crito	140		07,0			
-10	1	SBJ	100	123.0	60.0	31,0°		
-10	2	0.10	195	,.	00,0			
-15	1	SBJ	220	158.0	39.0	45,0°		
	2	er le	295	100,0	00,0			
onde: q_s = resistência ao arrancamento; c' = coesão do solo; ϕ ' = ângulo de atrito								
do solo; σ_n	= tensão no	ormal aplica	da ao grampo;	SRJ = solo	residual jove	əm		

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de arrancamento de Feijó e Ehrlich (2001).

De forma análoga aos casos anteriores, pode-se fazer a estimativa da resistência ao arrancamento dos grampos obtida por estes autores. Porém, é importante ressaltar que as características físicas dos materiais estudados pelos autores são diferentes das características dos solos da presente pesquisa.

O coeficiente de interface (α) foi determinado através da curva do solo 2 apresentada na Figura 4, por se tratar de um solo residual jovem.

Da Figura 12, determinou-se o fator de carga λ_1^* para as diferentes tensões normais atuantes nos grampos. A Tabela 11 apresenta os valores estimados da resistência ao arrancamento utilizando-se a Equação (5.8).

Tabela 11 Estimativa da resistência ao arrancamento dos grampos de Feijó e Ehrlich (2001).

Cota (m)	Solo	σ _n (kPa)	c' (kPa)	φ'	α	λ1 [*]	q₅* (kPa)				
-5	SRJ	69,5	87,0	39,0°	0,77	1,97	217				
-10	SRJ	123,0	60,0	31,0°	0,81	1,71	184				
-15	SRJ	158,0	39,0	45,0°	0,88	1,59	276				
onde: $\sigma_n =$	onde: σ_n = tensão normal aplicada ao grampo; c' = coesão do solo; ϕ ' = ângulo										
de atrito do solo; α = coeficiente de interface; λ_1^* = fator de carga; q_s^* =											
resistência	resistência ao arrancamento obtida; SRJ = solo residual jovem										

Os valores estimados de q_s da Tabela 11 são semelhantes aos valores médios dos ensaios de arrancamento, realizados nas cotas -10 e -15m (Tabela 2). Entretanto, para os ensaios realizados na cota -5m, o valor estimado (q_s*) é muito superior ao valor médio obtido em campo. É interessante observar que o ensaio 1 desta cota mostra resistência ao arrancamento (80kPa) inferior à coesão do solo (87kPa). Ressalta-se que nos ensaios de cisalhamento direto reportados por aqueles autores foram utilizados corpos-de-prova de 5cm de lado. Vale lembrar que amostras de solos residuais jovens, dependendo da granulometria, podem ter grãos e/ou minerais de tamanho não desprezível quando comparado com o tamanho da amostra. Quando estes grãos coincidem com o plano de ruptura imposto pelo ensaio de cisalhamento direto, pode-se obter parâmetros de resistência elevados.

Na Tabela 10 também se observa uma grande dispersão dos resultados de ensaios de arrancamento realizados na mesma cota. Segundo Feijó e Ehrlich (2001), isso acontece devido à heterogeneidade do perfil de solo residual da região. Apesar destes fatores, ainda se constata um bom desempenho da Equação (5.8) proposta para a estimativa da resistência ao arrancamento correspondente.

A Figura 13 apresenta a relação entre o fator de carga para solos residuais de gnaisse e a tensão normal, considerando todos os resultados de ensaios de arrancamento analisados anteriormente, associados aos da presente pesquisa. Apesar dos diferentes tipos de solos, os coeficientes de interface foram estimados através dos ensaios realizados para os solos 1 e 2 deste estudo.

Apesar disto, observa-se uma relação linear com coeficiente de correlação $R^2 = 0,904$ mostrando uma dispersão reduzida.



Figura 13 – Fator de carga (λ_1^*) estimado para solos residuais de gnaisse

5.5. Consideração do efeito da sucção na análise dos resultados

A sucção tem um efeito considerável nos parâmetros de resistência, quando se trata de solos residuais encontrados em ambientes tropicais. A consideração do efeito da sucção na resistência ao cisalhamento da interface solo-grampo exige o conhecimento da curva característica do solo.

A literatura reporta diversas investigações sobre valores representativos de sucção para solos residuais de gnaisse.

Curvas características de solos residuais de gnaisse propostas por Delgado (1993), Coutinho et al. (1997) e Gerscovich e Sayão (2002) sugerem que a sucção varia entre 10 e 90kPa para solos com umidade entre 15 e 17%. Nota-se que este valor é muito variável e extremamente sensível a pequenas variações do teor de umidade e das características físicas do material. Desta forma, tendo por finalidade destacar um possível efeito da sucção na resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo, adotou-se um valor médio de sucção de 50kPa para os solos residuais deste estudo. A resistência ao cisalhamento de solos não saturados pode ser calculada através da seguinte expressão (Fredlund et al., 1978):

$$\tau_{in} = c' + (\sigma_n - u_a) tg \phi' + (u_a - u_w) tg \phi^b$$
(5.9)

Onde: τ_{in} = tensão de cisalhamento no plano de ruptura; c' = coesão efetiva do solo; (σ_n - u_a) = estado de tensão normal no plano de ruptura na ruptura; ϕ '= ângulo de atrito do solo ; ($u_a - u_w$) = sucção mátrica; ϕ^b = ângulo indicativo do incremento de resistência cisalhante relativa à sucção mátrica.

Através da Equação (5.9), é possível expressar a Equação (5.8) considerando o solo não saturado, em função do coeficiente de interface (Figura 4) e de um fator de carga λ_2 para o caso de solos residuais de gnaisse não saturados:

$$\tau_{in} = \alpha . \lambda_2 . (c + (\sigma_n - u_a) . tg \phi + (u_a - u_w) . tg \phi^b)$$
(5.10)

A fim de se estimar o fator de carga λ_2 para solos não saturados, pode-se fazer uma análise similar à do item 5.3. Necessita-se, porém, estimar um valor para o ângulo ϕ^{b} . Este parâmetro pode ser determinado através de ensaios especiais de cisalhamento com sucção controlada. Adotou-se, no presente trabalho, a alternativa de se avaliar este parâmetro através da seguinte expressão:

$$\dot{c}_{nat} = \dot{c}_{sub} + (u_a - u_w) tg\phi^b$$
 (5.11)

Onde: c'_{nat} = coesão efetiva em ensaios de cisalhamento direto com o solo na umidade natural; c'_{sub} = coesão efetiva em ensaios de cisalhamento direto com o solo submerso; $(u_a - u_w)$ = sucção mátrica.

A Tabela 12 apresenta os valores para a estimativa do fator de carga λ_2 de solos residuais de gnaisse baseados nos resultados obtidos na presente pesquisa e em parâmetros específicos de solos não saturados retirados da literatura.

Ensaio	Solo	q₅ (kPa)	σ _n (kPa)	c' _{nat} (kPa)	φ'	c' _{sub} (kPa)	(u _a - u _w) _f	ф' ^ь	α	λ_2
AR01	1	166	75,1	36,4	29,6°	22,3	50	15,8	1,19	1,62
AR02		227	120,3						0,84	1,49
AR03	2	275	223,0	59,0	36,4°	25,5	50	33,8°	0,91	1,18
AR04		260	188,3						0,90	1,25
onde: 1 :	= Argila	arenosa	a; 2 = ar	eia argil	osa; λ ₁ =	= fator d	e carg	a; q _s = 1	resistên	cia ao

Tabela 12 – Estimativa do fator de carga λ_2 para os solos 1 e 2.

onde: 1 = Argila arenosa; 2 = areia argilosa; λ_1 = fator de carga; q_s = resistência ao arrancamento; α = coeficiente de interface; c'_{nat} = coesão do solo na umidade natural; ϕ' = ângulo de atrito do solo na umidade natural; σ_n = tensão normal aplicada ao grampo; c'_{sub} = coesão efetiva para o ensaio de cisalhamento direto submerso; (u_a – u_w)_f = sucção mátrica na ruptura; ϕ^b = ângulo indicativo do incremento de resistência cisalhante relativa à sucção mátrica.

A partir dos valores apresentados na Tabela 12, pode-se traçar a curva do fator de carga (λ_2) em função da tensão normal (σ_n), apresentada na Figura 14.



Figura 14 – Fator de carga (λ_2) em função da tensão normal atuante nos grampos.

Nota-se na Figura 14, que o fator de carga diminui quando se considera o efeito de sucção no solo. Porém, ressalta-se que a sucção mátrica nos solos é muito variável e ela foi considerada constante nesta análise simplificada.

Outro fator importante a ser destacado refere-se ao efeito da sucção mátrica na interface solo/grampo.

Mascarenha (2003) realizou ensaios de curvas características em corposde-prova de interface solo/microconcreto para avaliar o efeito da sucção. A autora analisou a sucção mátrica nas duas faces dos corpos-de-prova, observando que a equalização da sucção só ocorre após 60 dias do início da cura do concreto. Isto indica que a sucção é função do tempo de cura da nata de cimento, ressaltando a dificuldade de consideração deste efeito na previsão da resistência ao arrancamento de grampos.

O processo executivo de grampos forma uma zona de maior rigidez no entorno dos furos (Figura 15). O diâmetro desta região pode ser função da sucção mátrica dos solos, pois a capilaridade afeta a distância percorrida pela nata de cimento no interior dos vazios do solo.



Figura 15 – Zona de rigidez no entorno do furo resultante da execução do grampo.

A Figura 15 destaca uma das dificuldades de se avaliar o efeito da sucção mátrica em análises semi-empíricas para determinação da resistência ao arrancamento. Sabe-se da ocorrência desta zona de maior rigidez, mas a determinação do diâmetro efetivo desta zona é muito difícil. Uma possibilidade seria o emprego de ferramentas numéricas e o desenvolvimento de um programa de análise de fluxo que considerasse as 4 componentes envolvidas nesta interação (solo, água, ar e nata de cimento).