

AVALIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO SOLO-MURO E DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CONTATO

EVALUATION OF THE FRICTION ANGLE SOIL-WALL AND THE ROUGHNESS OF THE SURFACE OF CONTACT

Silvio Romero de Melo Ferreira¹, Joaquim Teodoro Romão de Oliveira², Stela Paulino Fucale³, Wallace Borges de Sá⁴ e Sidney Fernandes de Andrade Moura⁵

¹Universidade Federal de Pernambuco, Universidade de Pernambuco e Universidade Católica de Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, CEP 50740-530, Recife, PE, Brasil, Telefone: (81) 2129-8222
E-mail: sr.mf@hotmail.com

²Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe, 526, Boa Vista, CEP 50050-900, Recife, PE, Brasil, Telefone: (81) 2116-4019, E-mail: jtrdo@uol.com.br

³Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Rua Benfica 455, Madalena, CEP 50720-001, Recife, PE, Brasil, Telefone: (81) 3184-5000
E-mail: sfucale@yahoo.com.br

⁴Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe 526, Boa Vista, CEP 50050-900, Recife, PE, Brasil, Telefone: (81) 2116-4019 E-mail: walmir@ig.com.br,

⁵Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Rua Benfica 455, Madalena, 50720-001 Recife, Brasil, Telefone: (81) 3184-5000
E-mail: sidneyfam@hotmail.com

RESUMO

O ângulo de atrito solo-muro é um parâmetro fundamental para o dimensionamento de um muro de arrimo. A prática em projetos considera o valor do ângulo de atrito solo-muro igual a uma parcela do ângulo de atrito interno do solo. Valores experimentais para solos brasileiros não estão disponíveis na literatura. O presente artigo apresenta resultados de ensaios de cisalhamento direto, realizados em corpos de prova de solo, em contato com outro material representativo de muros de arrimo (concreto convencional, concreto com agregado de Resíduos de Construção e Demolição – RCD, rocha e pneus), com o objetivo de obter os ângulos de atrito solo-muro. Foram utilizadas dezoito superfícies de rugosidade e dois solos das encostas do Recife, PE: uma areia argilosa (SC) e uma argila de baixa compressibilidade (CL). Foram avaliadas as rugosidades das superfícies em contato com os solos. A relação entre o ângulo de atrito solo-muro e o ângulo de atrito do solo (δ/ϕ) varia de 3/4 a 1 na areia argilosa e de 1/3 a 1 na argila de baixa compressibilidade, em função da rugosidade da superfície de contato.

Palavras-chave: Atrito solo-muro, muro de arrimo de concreto e resíduos de construção e demolição.

ABSTRACT

The friction angle soil-wall is a basic parameter for the design of the retained wall. The common sense uses the value of the friction angle soil-wall equal to a parcel of the internal friction angle of the ground. Experimental values for Brazilian soil are not available in literature. The present paper presents results of tests of direct shear carried through in test bodies of soil in contact with another representative material of retained walls (conventional concrete, concrete with recycled aggregate of construction and demolition waste – CDW, rock and tires), with the objective of getting the friction angles soil-wall. Eighteen roughness surfaces and two Recife's hillsides soils, one sand clayey (SC) and other clay of low compressibility (CL) have been used. The roughness of the surfaces in contact with the ground had been evaluated. The relation between the ground-wall angle friction and the soil friction angle varies from 3/4 to 1 for the clayey sand and from 1/3 to 1 for the clayey soil, in the function of roughness of contact surface.

Keywords: Friction angle soil-wall, retained walls of conventional concrete and concrete with recycled aggregate of construction and demolition waste.

1 – INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas nas encostas da Região Metropolitana do Recife (RMR) é a ocupação antrópica desordenada, aumentando o número de moradias, em áreas de risco. Uma das soluções para a estabilização das encostas é construir uma estrutura de contenção como muro de arrimo.

O ângulo de atrito solo-muro é um parâmetro fundamental para o dimensionamento de estruturas de contenção. O valor é utilizado na avaliação dos empuxos ativo e passivo, na análise de estabilidade do muro em relação ao tombamento, deslizamento e ruptura do terreno de fundação. A prática atual de projetos considera o valor do ângulo de atrito solo-muro (δ) como sendo igual ao ângulo de atrito do solo, uma parcela dele ou mesmo nulo,

a depender do caso (Terzaghi e Peck, 1967; Caputo, 1986; Moliterno, 1994 e Das 2007) como mostra a Tabela 1.

Valores experimentais do ângulo de atrito solo-muro de solos brasileiros, em contato com superfícies usuais, utilizadas na prática construtiva de obras de contenção, não estão disponíveis na literatura. O estudo da influência do tipo de solo no atrito solo-muro é geralmente realizado considerando os dois extremos, solos arenosos e argilosos que na maioria dos casos práticos não ocorre. Devem ser consideradas as propriedades de ambos os tipos de solos, diferenciando-se pela ponderação dos constituintes de uma ou outra fração granulométrica.

A rugosidade da superfície de contato entre o solo e o muro é um dos fatores que mais influencia a interação entre os dois materiais. Os trabalhos em geotecnia que

avaliam o ângulo de atrito do solo-muro (δ) não quantifica a rugosidade da superfície de contato, apenas qualifica como lisa, parcialmente rugosa, rugosa ou paredes normais, sem mensurar e classificar as superfícies, Tabela 1.

DeJong e Westgate (2009) analisaram a interação solo-estrutura localizada por meio de uma série de ensaios de cisalhamento. Foram investigados a densidade relativa, a dureza e angulosidade das partículas, rugosidade da superfície, stress normal, e rigidez normal. Concluem que os fatores mais influentes na interação solo-estrutura são a densidade relativa do solo, a angulosidade das partículas e a rugosidade superficial.

Tabela 1 – Valores do ângulo de atrito solo-muro (δ) em função do tipo de solo e superfície de contato.

Solo	Rugosidade da superfície de contato	Valores do Ângulo de atrito solo-muro (δ)	Referência	
Não definido	-----	$\phi/3 < \delta < 2\phi/3$	Terzaghi (1943)	
Areia	Concreto liso	$\delta/\phi = 0,84$ seco $\delta/\phi = 0,84$ saturado	Potyondy (1961)	
	Concreto rugoso	$\delta/\phi = 0,98$ seco $\delta/\phi = 0,90$ saturado		
	Silte	Concreto liso		$\delta/\phi = 0,99$ seco $\delta/\phi = 0,95$ saturado
				Argila (mistura)
Areia pura e pedregulho	-----	29°	Terzaghi e Peck (1967)	
Areia Siltosa	-----	24°		
Silte	-----	19°		
Areia grossa pura	-----	30°	Caputo (1986)	
Areia grossa argilosa ou siltosa	-----	25°		
Não define o tipo de solo	Paramento do muro liso (cimentado ou pintado com pixe)	0	Moliterno (1994)	
	Paramento do muro parcialmente rugoso	$\phi/2$		
	Paramento do muro rugoso	ϕ		
Argila saturada	-----	0	Marzionna <i>et al.</i> (1998)	
Demais solos	-----	$2\phi/3$		
Areia compacta	Concreto	$\delta/\phi = 0,86$ (Pico) $\delta/\phi = 0,82$ (Residual)	Gómez <i>et al.</i> (2008)	
		Areia medianamente compacta		Concreto
Solo granular fofo	-----	ϕ		
Solo granular compacto	-----	$\phi/3 < \delta < 2\phi/3$		Das (2007)

O aproveitamento de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como agregado de concreto é de grande interesse do ponto de vista ambiental, pois reduz o volume de entulho produzido em uma grande cidade, além de minimizar o impacto ambiental. Por outro lado, o reaproveitamento de pneus usados é um desafio e entre as alternativas para a utilização encontra-se o aproveitamento em Construção Civil como estrutura em contenção de encostas. Nessa perspectiva, o presente artigo analisa a interação solo-muro, em 18 (dezoito) superfícies de contato, com diferentes rugosidades, considerando-se 04 (quatro) tipos de materiais (concreto com agregado

convencional e com agregado de RCD, rocha e pneu), em contato com 2 (dois) solos, um arenoso argiloso e outro argiloso, coletados de encostas do Recife, sendo um no Bairro Ibura e o outro de Nova Descoberta.

2 – MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para se obter os ângulos de atrito do solo e da interação solo-muro, foram coletados dois solos da Formação Barreiras, na cidade do Recife-PE, um da Zona Norte (Nova Descoberta) e outro da Zona Oeste da cidade (Ibura). De cada solo foi coletado aproximadamente 250

kgf, acondicionados em sacos plásticos para não haver perda de material fino e, posteriormente, foram colocados em sacos de rafia para o transporte.

Dezoito superfícies de contato foram preparadas, sendo nove de dimensões 50 mm x 50 mm x 20 mm e nove de 100 mm x 100 mm x 20 mm. De cada dimensão, foram consideradas superfícies de diferentes rugosidades, sendo três de concreto convencional, duas de concreto utilizando agregado de Resíduo da Construção e Demolição (RCD), uma de rocha e três de pneus.

Para se avaliar a rugosidade das superfícies de contato solo-muro utilizou-se conceitos e métodos aplicados para superfícies de peças metálicas, e aqui, utilizados para aferirem a rugosidade de superfícies de contato do solo com os materiais.

2.1 Solo

A preparação das amostras dos solos foi realizada segundo a norma ABNT NBR 6457:1986a. Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: Limite de Liquidez, ABNT NBR 6459:1984a; Massa Específica dos Grãos do Solo, ABNT NBR 6508:1984b; Limite de Plasticidade, ABNT NBR 7180:1984c; Análise granulométrica, ABNT NBR 7181:1984d; Compactação, ABNT NBR 7182:1986b.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em amostras dos solos compactados na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo. Os corpos de prova tinham formatos prismáticos com dimensões 50 mm x 50 mm x 40 mm e 100 mm x 100 mm x 40 mm. Para cada dimensão foram moldados quatro corpos de prova e consolidados, nas tensões verticais de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa. Após estabilização das deformações, as amostras foram levadas à ruptura com velocidade de 0,018mm/s e medidos os deslocamentos horizontais e verticais com extensômetros de sensibilidade de 0,001mm/div. As forças cisalhantes foram avaliadas com um anel dinamométrico, com constante de 0,16 kgf/div. As deformações horizontais últimas atingidas nos ensaios, foram de 15%, nos corpos de prova de lado 100 mm e de 20%, nos corpos de prova de lado 50 mm.

2.2 Concreto convencional e com agregado de RCD

As superfícies de concreto com agregado convencional foram obtidas a partir do substrato padrão, elaborado com cimento Portland CP – Z II 32 no traço 1:2,58:1,26, seguindo a norma padrão ABNT NBR 14082:2003, com fator água:cimento de 0,50 e serradas nas dimensões desejadas.

O entulho utilizado na moldagem dos corpos de prova de concreto com agregado de Resíduos de Construção e Demolição – RCD foi coletado segundo as prescrições da norma ABNT NBR 10007:1987 e representa o resíduo gerado em uma obra vertical na cidade de Recife, Pernambuco, na fase intermediária entre a elevação de alvenaria, nos pavimentos e término de aplicação do acabamento externo. O material coletado foi triturado, utilizando um britador de mandíbulas. A partir dos

agregados reciclados dos RCD, foi elaborado um concreto com traço 1:2,17:3,16 e fator água cimento de 0,57, com uso de cimento Portland, CP – II Z 32. Foi montada uma forma de madeira, com capacidade de moldar 04 (quatro) corpos de prova de concreto, nas dimensões de 100 mm x 100 mm x 20 mm, tendo sido uma delas cortada, na dimensão de 50 mm x 50 mm x 20 mm. Na Figura 1 é apresentada ilustração de um corpo de prova, utilizados na avaliação do atrito solo-muro.

As superfícies de contato entre os dois materiais eram ajustadas, durante a moldagem, para coincidirem com o plano médio de cisalhamento, conforme Sá (2006). O procedimento dos ensaios foi similar ao utilizado no cisalhamento direto com o solo.

Figura 1 – Corpo de prova de concreto com agregado de RCD – solo após ter sido submetido ao ensaio de cisalhamento.



2.3 Rocha

A superfície de rocha utilizada foi obtida a partir de uma Biotita Gnaiss Branda, tipo de rocha muito utilizada em alvenarias de pedra de obras de contenção. As placas foram cortadas nas dimensões desejadas deixando intacta a superfície de contato com o solo. O procedimento dos ensaios foi similar ao utilizado no cisalhamento direto com o solo.

2.4 Pneus

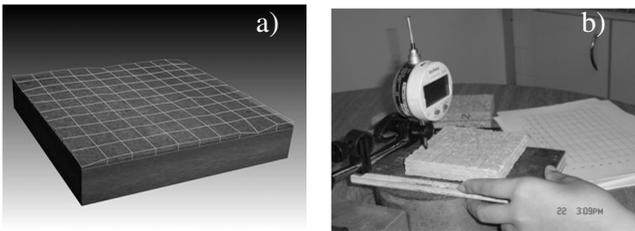
As amostras de pneus inservíveis foram obtidas em borracharias da região. Como não era conhecido o tempo de utilização dos mesmos, foi feita uma análise visual para a escolha de três tipos, sendo em estágios diferentes de utilização: seminovo, mediano e usado. No momento da coleta dos pneus foram anotadas as referências quanto ao tamanho e fabricante, para futuras análises. Inicialmente, os pneus foram limpos com uma escova de cerdas de Nylon e água, sendo em seguida cortados manualmente com uma serra de arco própria para metal devido à malha de aço presente no interior dos pneumáticos. Foram tomadas 06 (seis) amostras de pneus, dois para cada nível de utilização do pneumático, sendo um com dimensões de 50 mm x 50 mm e o outro com 100 mm x 100 mm. Para reduzir ao máximo o deslocamento vertical devido à curvatura da superfície do pneu, o conjunto caixa-pneu recebeu um acréscimo de carga na prensa de compactação estática antes de ser posicionada a amostra de solo sobre o

conjunto e aferidas as rugosidades. O procedimento dos ensaios foi similar ao utilizado no cisalhamento direto com o solo.

2.5 Avaliação da rugosidade das superfícies de contato solo-muro

A avaliação da rugosidade das superfícies foi dividida em duas etapas. A primeira consistia em marcar, com grafite, quadrículas de lado 10 mm, em toda a superfície de observação, totalizando 121 vértices e 22 linhas, nos corpos de prova de 100 mm x 100 mm x 20 mm (Figura 2a) e, nos corpos de prova de 50 mm x 50 mm x 20 mm, 36 vértices e 12 linhas. Em cada um dos vértices das quadrículas, mediam-se as reentrâncias e saliências com um deflectômetro digital de 0,001mm de sensibilidade com capacidade de 12,5 mm, Figura 2b.

Figura 2 – Medidas da rugosidade, (a) rocha (b) concreto com agregado de RCD.



Na segunda etapa, foram obtidas as Rugosidades Médias (Ra), Totais (Rt) e Médias Quadrática (Rq) de cada superfície, seguindo a metodologia da ABNT NBR 6405:1988 e Palma (2006), aplicado a metais e aqui adaptado para os materiais utilizados. A Rugosidade Média de cada superfície foi avaliada, utilizando a Equação 1, calculando-se a altura média, definindo assim, o plano médio de cada linha de observação. Foram obtidas as diferenças de altura entre cada profundidade medida e a altura média, como ilustrado na Figura 3a. A Rugosidade Total de cada superfície foi avaliada, calculando, inicialmente, a diferença entre o maior valor e o menor valor da profundidade de cada linha de observação (Figura 3b e Equação 2), e, posteriormente, obteve-se a média de todas as determinações. A Rugosidade Média Quadrática de cada superfície foi calculada, utilizando a Equação 3, para cada linha de observação e obtendo-se a média de todas as linhas.

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1)$$

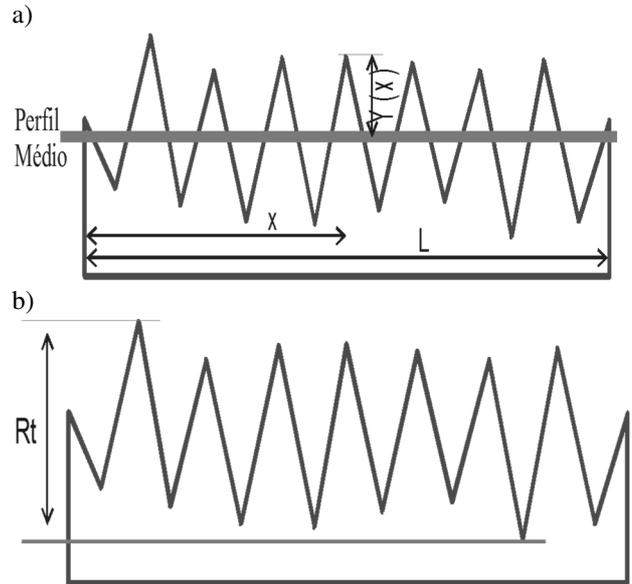
$$Rt = Y_{\max} - Y_{\min} \quad (2)$$

$$Rq = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad (3)$$

Em que:

Ra = Rugosidade Média, Rt = Rugosidade Total, Rq = Rugosidade Média Quadrática, y ou Y diferenças de altura entre cada profundidade medida e a altura média, n = número de observações medidas.

Figura 3 – (a) Rugosidade Média; (b) Rugosidade Total ABNT NBR 6405:1988.



Os valores de Rugosidade Equivalente, publicados por Tullis (1989) empregados na fabricação de tubos para diferentes materiais, foram utilizados como referência para classificar qualitativamente as rugosidades das superfícies dos materiais utilizados, Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da rugosidade das superfícies de contato do solo com os materiais com base na proposta de Tullis (1989).

Rugosidade (Ra, Rt e Rq)	Classificação
0,1 mm a 0,5 mm	Lisa (L)
0,5 mm a 2 mm	Rugosa (R)
> 2 mm	Muito Rugosa (MR)

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

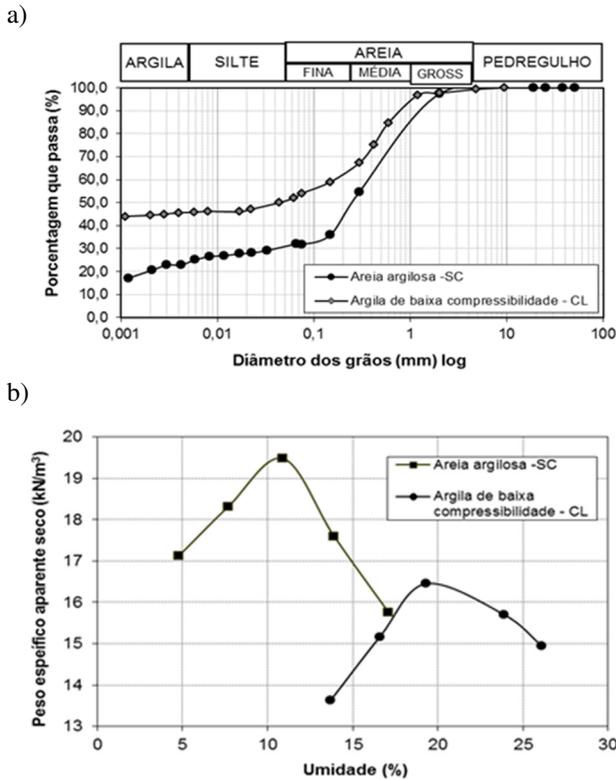
As características físicas do solo, a avaliação quantitativa da rugosidade da superfície de contato entre o solo e muro e o comportamento geomecânico do solo são fatores importantes para a análise da interação entre o solo e muro.

3.1 Caracterização física dos solos

O solo localizado no Iburá é uma areia argilosa (SC) segundo a Classificação Unificada, com 1% de pedregulho, 69% de areia, 5% de silte e 25% de argila. Apresenta Limite de Liquidez de 23% e Limite de Plasticidade de 15%. O solo é inativo ($I_a = 0,38$) e tem um peso específico aparente seco máximo de 19,50 kN/m³ e umidade ótima de 10,70%. O solo, localizado em Nova Descoberta, é argila de baixa compressibilidade (CL), com 1% de pedregulho, 47% de areia, 6% de silte e 46% de argila. Apresenta Limite de Liquidez de 28% e Limite de Plasticidade de

12%. O solo é inativo ($I_a = 0,36$) e apresenta um peso específico aparente seco máximo de $16,50 \text{ kN/m}^3$ e umidade ótima de 19,30%. Na Figura 4a são apresentadas as curvas granulométricas e na Figura 4b são mostradas as curvas de compactação dos solos estudados.

Figura 4 – Caracterização física: (a) Curvas granulométricas; (b) Curvas de compactação.



Embora seja uma argila de baixa compressibilidade (CL) na Classificação Unificada, a fração argila desse solo é similar quanto a mineralogia fração argila da areia argilosa (SC).

3.2 Avaliação das rugosidades das superfícies de contato

Os valores obtidos das Rugosidades Médias, Totais e Médias Quadráticas para os materiais utilizados são apresentados na Tabela 2. Considerando os valores da Rugosidade Média obtidas e as faixas de variação indicadas na Tabela 1, das dezoito superfícies avaliadas, 11 % são muito rugosas, 22 % são rugosas e 67 % são lisas.

3.3 Resistência ao cisalhamento dos solos

A areia argilosa (SC), localizada no Iburá, tem um intercepto de coesão que varia de 14 a 32 kPa e ângulo de atrito que varia de 36° a 39° para corpos de prova de lados 50 mm e 100 mm respectivamente. O valor médio de 38° foi considerado para relacionar com o ângulo de atrito solo muro (δ).

A argila de baixa compressibilidade (CL), localizada em Nova Descoberta, tem um intercepto de coesão que varia de 12 a 127 kPa e o ângulo de atrito de 29° a 33° , a depender da dimensão do corpo de prova. Lafayette (2000) obteve, para este mesmo solo, em condição natural, coesão que variou de 13 a 70 kPa e ângulo de atrito que variou de 24° a 32° em função da sucção inicial do solo. O valor médio de 31° foi considerado para relacionar com o ângulo de atrito solo-muro (δ).

3.4 Resistência ao cisalhamento do solo-muro

Curvas típicas $\tau \times \epsilon_a$ (tensão cisalhante x deformação horizontal) e a envoltória de Mohr-Coulomb (tensão cisalhante x tensão normal) são apresentadas, na Figura 5, para a Areia Argilosa (SC) do Iburá em contato solo-concreto com agregado convencional. Resultados dos ensaios de cisalhamento direto, realizados em corpos de provas, constituídos de dois materiais: solo-concreto (com agregado convencional e com agregado do RCD), solo-rocha e solo-pneu são apresentados na Tabela 3.

Na areia argilosa (SC) compactada, o ângulo de atrito solo-muro (δ) variou de 28° a 39° e na argila de baixa compressibilidade (CL) compactada, o ângulo (δ) variou de 10° a 32° , em ambos os solos a interação depende da superfície de rugosidade e do material. Terzaghi e Peck (1967) encontraram o ângulo (δ) de 29° para areia pura e pedregulho, 24° para areia siltosa e 19° para siltes. Caputo (1986) indica 30° para areia grossa pura e 25° para areia grossa argilosa ou siltosa. Nos dois trabalhos citados os autores não fazem indicação do tipo de rugosidade da superfície de contato nem se o solo é compactado. Em solo granular fofo, Das (2007) indica que o ângulo de atrito solo-muro (δ) é igual ao ângulo de atrito do solo (ϕ) e em solo granular compactado o ângulo de atrito solo-muro (δ) varia de $\phi/3 < \delta < 2\phi/3$.

Tabela 2 – Valores de rugosidade das superfícies de contato solo-muro.

Dimensões dos corpos de prova mm	Material	Superfície	Rugosidade* (mm)			Classificação da rugosidade**		
			Rt	Ra	Rq	Rt	Ra	Rq
50 mm x 50 mm x 40 mm	Concreto com agregado convencional	S1	0,901	0,274	0,328	R	L	L
		S2	0,519	0,147	0,179	R	L	L
		S3	0,433	0,134	0,162	L	L	L
	Concreto com agregado RCD	S4	1,46	0,439	0,524	R	L	R
		S5	1,260	0,392	0,449	R	L	L
		Rocha	S6	1,083	0,391	0,509	R	L
	Pneu	S7	12,38	2,620	-	MR	MR	-
		S8	9,020	1,510	-	MR	R	-
		S9	2,700	0,450	-	MR	L	-
100 mm x 100 mm x 40 mm	Concreto com agregado convencional	S10	1,229	0,274	0,356	R	L	L
		S11	0,779	0,206	0,247	R	L	L
		S12	0,634	0,147	0,185	R	L	L
	Concreto com agregado RCD	S13	2,682	0,718	0,847	MR	R	R
		S14	1,507	0,385	0,467	R	L	L
		Rocha	S15	2,336	0,601	0,723	MR	R
	Pneu	S16	14,280	2,450	-	MR	MR	-
		S17	10,410	1,280	-	MR	R	-
		S18	1,770	0,170	-	R	L	-

* Rt = Rugosidade Total, Ra = Rugosidade Média e Rq = Rugosidade Média Quadrática.

** L = Superfície Lisa, R = Superfície Rugosa e MR = Superfície Muito Rugosa.

Figura 5 – Ensaio de cisalhamento direto solo-concreto convencional – Solo do Ibura (SC) em corpos de prova com lado 100 mm – superfície S10: a) Curvas tensão cisalhante x deformação horizontal, b) Envoltória de Mohr-Coulomb.

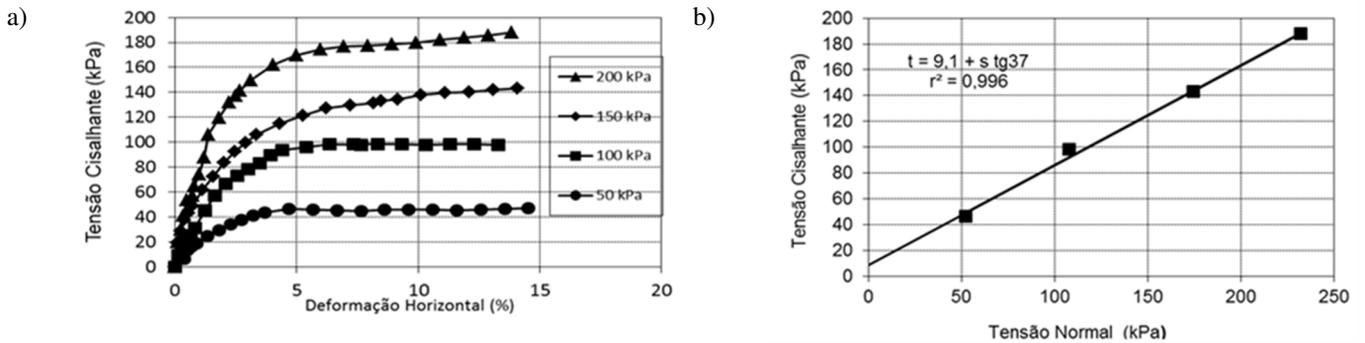


Tabela 3 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento: interação solo-muro.

Solo/Material	Dimensões dos corpos de prova						
	50 mm X 50 mm X 40 mm			100 mm X 100 mm X 40 mm			
	Superfície de contato	Adesão (kPa)	Ângulo de atrito ϕ (°)	Superfície de contato	Adesão (kPa)	Ângulo de atrito ϕ (°)	
SC	Concreto com agregado convencional	S1	18	34	S10	09	37
		S2	05	37	S11	17	28
		S3	09	38	S12	20	36
	Rocha	S6	14	39	S15	0	33
CL	Concreto com agregado convencional	S1	0	19	S10	5	20
		S2	0	11	S11	0	25
	S3	0	12	S12	0	18	
	Concreto com agregado RCD	S4	0	20	S13	0	23
		S5	0	10	S14	7	22
Rocha	S6	05	10	S15	0	20	
Pneu	S7	0	32	S16	0	31	
	S8	0	27	S17	0	27	

S9	0	26	S18	0	26
----	---	----	-----	---	----

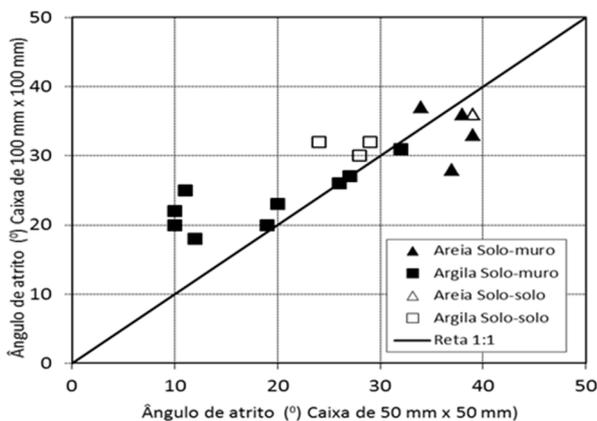
3.5 Fatores influentes na avaliação da interação solo-muro

O tamanho do corpo de prova, a granulometria e ângulo de atrito do solo, a rugosidade das superfícies de contato entre o solo e muro em diferentes materiais são fatores que são avaliados na interação solo-muro.

3.5.1 Influência do tamanho do corpo de prova no ângulo de atrito do solo e solo-muro

Na areia argilosa (SC) do Ibura, os ângulos de atrito interno do solo e do atrito solo-muro obtidos a partir de corpos de prova de lado 50 mm (valor médio = 37°) são ligeiramente superiores aos obtidos com corpos de prova de lado 100 mm (valor médio = 34°). Na argila de baixa compressibilidade (CL) de Nova Descoberta, os resultados são inferiores, apresentando valor médio de 19° para os ângulos obtidos em corpos de prova de lado 50 mm e valor médio de 24° para ângulos obtidos em corpos de prova de lado 100 mm, Figura 6.

Figura 6 – Relação entre valores dos ângulos de atrito, resultantes de corpos de prova de lado 50 mm e de lado 100 mm, em diferentes superfícies de contato.



3.5.2 Influência do material de contato no ângulo de atrito solo-muro

O tipo de material de contato (concreto convencional ou rocha) na areia argilosa (SC) teve pequena influência no ângulo de atrito solo-muro, variando de 35° ± 3° independente do tipo de material. Na argila de baixa compressibilidade (CL), o ângulo de atrito médio do solo-muro foi maior quando o solo estava em contato com o pneu (28°) e menor com a rocha (15°); com o concreto com agregado convencional ou com agregado de RCD praticamente apresentaram os mesmos valores médios (18°) e (19°), respectivamente, Figura 7

3.5.3 Relação do ângulo de atrito solo-muro com a Rugosidade Média

As avaliações dos ângulos de atrito dos solos e dos solos com os materiais dos muros foram obtidas nos planos de

cisalhamento (superfícies de ruptura) representando um comportamento médio. Assim na análise a relação (δ/ϕ) será considerada os valores da Rugosidade Média

Na areia argilosa (SC) o ângulo de atrito solo-muro tem pequena variação no tocante à rugosidade da superfície, considerando qualquer um dos índices de rugosidade (Total, Média e Média Quadrática). O valor médio do ângulo de atrito solo-muro ($\delta = 35^\circ$) para os diferentes materiais e superfícies de contato é próximo ao valor médio do ângulo de atrito interno do solo ($\phi = 37^\circ$), exceto para a superfície de contato lisa do concreto, com agregado convencional, que é de ($\delta = 28^\circ$), Figura 8.

Figura 7 – Ângulo de atrito solo-muro para diferentes materiais de contato:

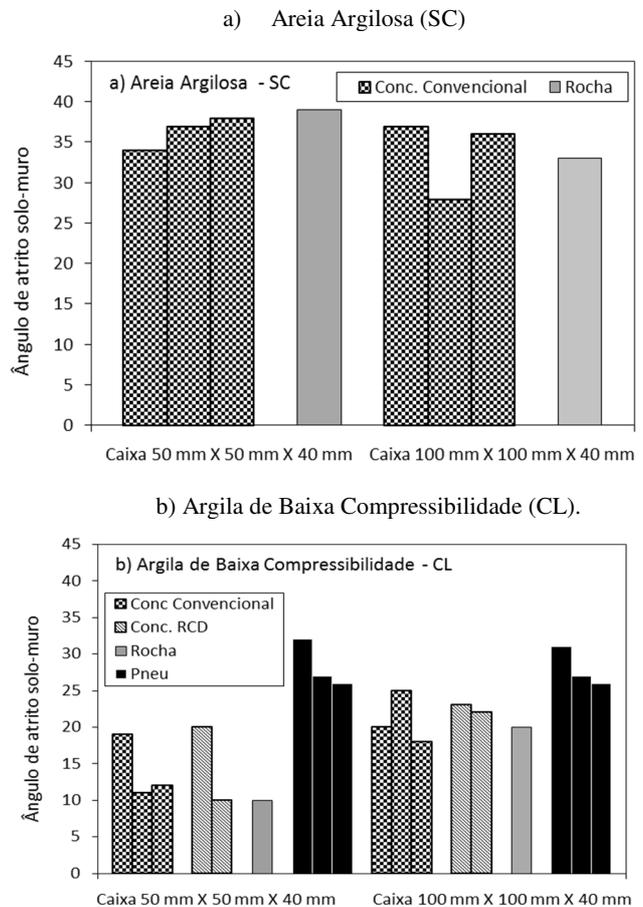
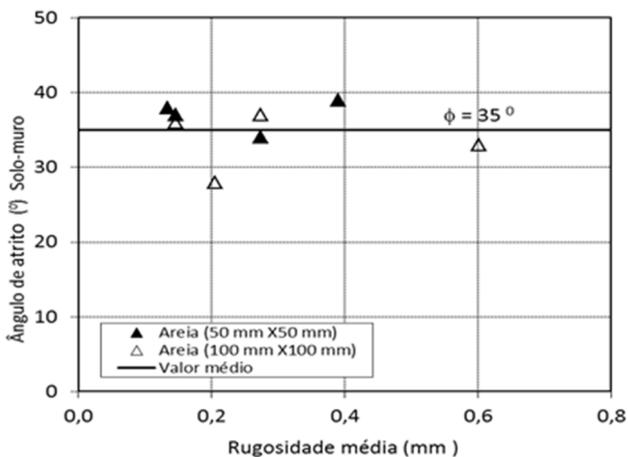
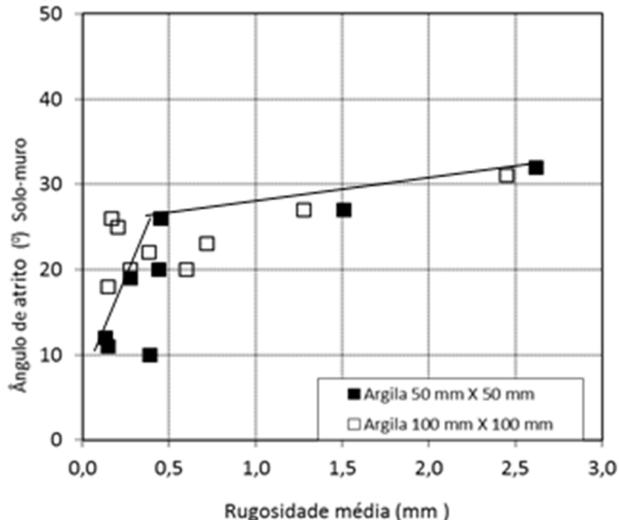


Figura 8 – Variação do atrito solo-muro com a rugosidade média para a areia argilosa do Ibura.



Na argila de baixa compressibilidade (CL) o valor do ângulo de atrito solo-muro é influenciado, significativamente, pela rugosidade da superfície. Para valores de Rugosidade Média, inferiores a 0,5 mm, há tendência de diminuição ângulo de atrito solo-muro com a diminuição da rugosidade da superfície de contato entre os dois materiais. O valor do ângulo de atrito solo-muro variou de 10° a 22°, Figura 9. Para valores de Rugosidade Média maior que 0,50 mm, o ângulo de atrito solo-muro cresce com o aumento da rugosidade da superfície, porém, com menor intensidade do que para valores de Rugosidade Média menores que 0,50 mm. Apresenta valores variando de 20° a 32° inferiores ao ângulo de atrito interno do solo.

Figura 9 – Variação do atrito solo-muro com a Rugosidade Média na argila de baixa compressibilidade (CL).



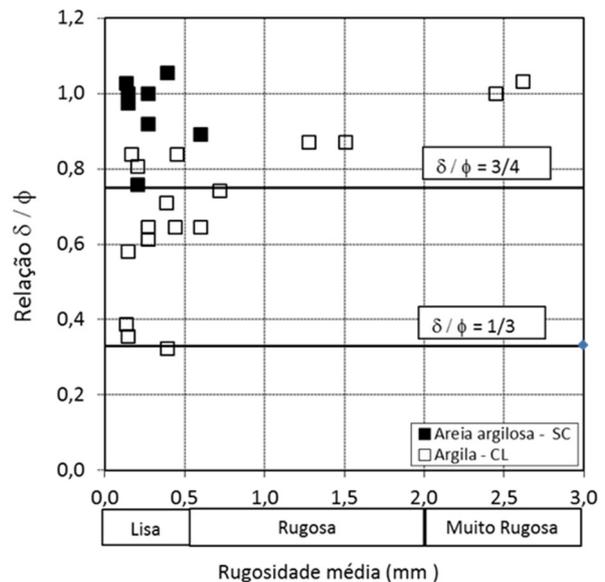
3.5.4 Relação do ângulo de atrito solo-muro com o ângulo de atrito interno do solo

Na areia argilosa (SC), do Ibura, a relação entre o ângulo de atrito solo-muro e o ângulo de atrito do solo (δ/ϕ) variou de 3/4 a 1, para superfície de contato lisa ($Ra < 0,5$ mm) e rugosa ($0,5 \text{ mm} < Ra < 2$ mm). Na argila de baixa compressibilidade (CL), de Nova Descoberta, a relação

(δ/ϕ) variou de 1/3 a 3/4, para superfície de contato lisa ($Ra < 0,5$ mm) e de 3/4 a 1, para superfície de contato rugosa ($0,5 \text{ mm} < Ra < 2$ mm) e muito rugosa ($Ra > 2$ mm), Figura 10. Na literatura geotécnica a rugosidade é descrita apenas de maneira qualitativa e muitas vezes não indica o tipo de solo que está em contato com a superfície para definir a relação do ângulo de atrito entre o solo e o muro, Tabela 1. Gómez *et al.* (2008) obtiveram valores da relação (δ/ϕ) que variaram de 0,86 (para resistência de pico) a 0,82 (para resistência residual) em areia compactada e de 0,71 (para resistência de pico) a 0,86 (para resistência residual) em areia medianamente compacta, em ambos os casos o solo estava em contato com o concreto. Valores que se encontram dentro da faixa aqui obtida.

Terzaghi (1943) indica que a relação entre o ângulo de atrito do solo com a do solo-muro varia de 1/3 a 2/3. Moliterno (1994) indica que a relação entre δ/ϕ varia de 0 para paramento liso (cimentado ou com pixe) a 1 para paramento de muro rugoso. Os trabalhos não informam o tipo de solo do contato com a superfície e nem quantifica a rugosidade das superfícies.

Figura 10 – Relação do ângulo de atrito solo-muro com ângulo de atrito do solo.



4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia empregada para avaliar a rugosidade das superfícies de contato do solo com o material do muro foi adaptada da avaliação da rugosidade utilizada da ABNT NBR 6405:1988. Os resultados obtidos são significativos para estabelecer relação do ângulo de atrito solo-muro, com índices de rugosidade.

A rugosidade da superfície tem influência na avaliação do atrito solo-muro, para diferentes materiais. Na areia argilosa (SC) do Ibura variou de 28° a 39°. O valor médio do ângulo de atrito solo-muro ($\delta = 35^\circ$) é próximo ao ângulo de atrito interno do solo ($\phi = 38^\circ$) para todas superfícies de contato, exceto na superfície lisa de concreto

convencional, ($\delta = 28^\circ$). Na argila de baixa compressibilidade (CL), variou de 10° a 32° a depender da rugosidade, para valores de rugosidade média $< 0,50$ mm, o ângulo de atrito solo-muro (δ) variou de 10° a 22° e para valores de rugosidade média $> 0,50$ mm, o ângulo de atrito solo-muro (δ) variou de 20° a 32° .

A relação entre o ângulo de atrito solo-muro e o ângulo de atrito do solo (δ/ϕ) variou de $3/4$ a 1 na areia argilosa (SC) e de $1/3$ a 1 , na argila de baixa compressibilidade (CL) em função da rugosidade da superfície. Os valores da relação são associados aos valores numéricos da rugosidade média das superfícies.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**: solo – determinação do limite de liquidez – Procedimento. Rio de Janeiro, 1984a, 6 p.

_____. **NBR 6508**: solo – grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984b, 8 p.

_____. **NBR 7180**: solo – determinação do limite de plasticidade – procedimento. Rio de Janeiro, 1984c, 6 p.

_____. **NBR 7181**: solo – análise granulométrica – procedimento. Rio de Janeiro, 1984d, 13 p.

_____. **NBR 6457**: amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986a, 8 p.

_____. **NBR 7182**: solo – ensaio de compactação – procedimento. Rio de Janeiro, 1986b, 10 p.

_____. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987, 24 p.

_____. **NBR 6405**: especificação de parâmetro para medida de rugosidade superficial. Rio de Janeiro, 1988, 18 p.

_____. **NBR 14082**: execução de substrato padrão e aplicação de argamassa para ensaios. Rio de Janeiro, 2003, 19 p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 6. ed., v. 2, 496 p, 1986.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**, 6ª Edição, Thomson Learning, 562 p, 2007.

DeJONG, J. T.; WESTGATE, Z. J. Role of initial state, material properties, and confinement condition on local and global soil structure interface behavior. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 11, p. 1646-1660, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:11\(1646\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:11(1646)).

GÓMEZ, J. E.; FILZ, G. M.; EBELING, R. M.; DOVE, J. E. Sand-to-concrete interface response to complex load paths in a large displacement shear box. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, v. 31, n. 4, p. 358-369, 2008.

LAFAYETTE, K. P. V. **Comportamento geomecânico de solos de uma topossequência na Formação Barreiras em uma encosta na área urbana do Recife, PE**.

Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 122 p, 2000.

MARZIONNA, J. D.; MAFFEL, C. E. M.; FERREIRA, A. A.; CAPUTO, A. N. **Análise, projeto e execução de escavações e contenções**. In: Hachich, W.; Falconi, F. F.; Saes, J. L. 1998.

MOLITERNO, A. **Cadernos de muros de arrimo**. Editora Edgar Blücher, São Paulo, 1994.

PALMA, E. S. **Metrologia**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Mecânica. PUC, 2006.

POTYONDY, J. G. Skin friction between various soils and construction materials. **Geotechnique Journal**, v. 11, n. 4, p. 339–355, 1961. <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.4.339>.

SÁ, W. B. **Estudo da interação solo-muro em concreto convencional, com resíduo de construção e demolição (RCD) e alvenaria de pedra**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil. Universidade Católica de Pernambuco, Recife. 111 p, 2006.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. John Wiley and Sons. New York, 510 p, 1943. <https://doi.org/10.1002/9780470172766>.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil Mechanics in Engineering Practice**, McGraw Hill, New York, NY. 2nd ed. 685 p, 1967.

TULLIS, J. P. **Hydraulics of pipelines, pump, valves, cavitation, transients**. John Wiley & Sons, New York, 1989. <https://doi.org/10.1002/9780470172803>.