

Efeito da Adição de Resíduo de Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro nos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

André Sales Mendes

Grupo de Geotecnia/UFAM, Manaus, Brasil, andresalesmendes@gmail.com

Rodrigo de Moura Fernandes

Grupo de Geotecnia/UFAM, Manaus, Brasil, rodrigo_mferd@outlook.com

Matheus Pena da Silve e Silva

Grupo de Geotecnia/UFAM, Manaus, Brasil, matheuspenass@hotmail.com

Raimundo Humberto Cavalcante Lima

Departamento de Geociências/UFAM, Manaus, Brasil, humbertoclima@ufam.edu.br

Consuelo Alves da Frota

Grupo de Geotecnia/UFAM, Manaus, Brasil, cafrota@ufam.edu.br

RESUMO: Estuda-se a adição de resíduos resultantes do processo de fabricação de postes de poliéster reforçado com fibra de vidro (PRFV) ao solo argiloso típico da cidade de Manaus-AM, proveniente da camada superficial do Campus da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). O perfil geotécnico da capital do Estado do Amazonas apresenta, em geral, solos superficiais com baixa capacidade de suporte, considerados inadequados para o emprego na construção de pavimentos. Tal fato deve-se, entre outras razões, aos ínfimos afloramentos rochosos na região, realidade a elevar os custos logísticos e de extração da matéria prima necessária. A escolha desse subproduto (resíduo de PRFV), como alternativa à estabilização do solo argiloso regional, deveu-se ao fato de ter-se um material armazenado em grandes quantidades e, ainda, sem destinação final adequada. Analisou-se o material natural quanto a: massa específica dos grãos, granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade e parâmetros de compactação. Os resultados indicaram: a) granulometria com a presença de 76,06% de argila; b) peso específico dos grãos igual a 26,7 kN/m³; c) valores dos limites de Atterberg de 83% (LL) e 41% (LP); e d) peso específico aparente seco máximo e umidade ótima iguais a 13,9 kN/m³ e 32%, respectivamente. Triturou-se o resíduo de PRFV de modo a resultar em uma textura semelhante a granulometria de um solo arenoso. Nas misturas pesquisadas foram adicionados 10% e 30% desse material alternativo ao solo natural. Realizou-se o ensaio de compactação na energia do Proctor Intermediário em, pelo menos, três vezes para cada uma dessas composições. A partir dos limites de Atterberg e de suas granulometrias enquadraram-se o solo natural e as misturas como MH e A-7-5, de acordo com o SUCS e as orientações da AASHTO, respectivamente. Moldaram-se corpos de prova, segundo os mencionados parâmetros de compactação, visando à realização do ensaio de cisalhamento direto, tanto para o solo "in natura" quanto para as citadas composições, com controle do grau de compactação. Submeteram-se as amostras às tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa, de acordo com uma taxa igual a 1 mm/min. Obtiveram-se as tensões cisalhantes de ruptura relativas às respectivas tensões normais. O experimento seguiu as recomendações da *American Society for Testing and Materials*. O comportamento mecânico apontou, relativo ao solo natural, o decréscimo da coesão e o aumento do ângulo de atrito com a maior inserção do material alternativo.

PALAVRAS-CHAVE: Solo, Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro, Cisalhamento Direto, Coesão, Ângulo de Atrito.

1 INTRODUÇÃO

RISSON *et al* (1998) destacam que os materiais poliméricos sintéticos são utilizados para a produção de diversos itens, suprimindo os mais diversos requisitos funcionais de forma econômica e eficaz. Afirmam ainda que, após a segunda guerra mundial, intensificou-se a criação e a utilização de novos tipos de polímeros. Surgia, assim, de maneira lenta e gradual, o uso de termofixos e fibras de vidro como reforço de peças moldadas em resina poliéster insaturadas, resultando, portanto, em um compósito.

Em particular a composição denominada Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) consiste na mistura de um reforço (fibra de vidro) à resina poliéster (matriz polimérica), com a inserção de uma substância catalizadora de polimerização (ORTH *et al*, 2012, *apud* KEMERICH *et al*, 2013). Basicamente, um compósito é considerado como sendo um material multifase, quando demonstra uma significativa proporcionalidade de ambas as fases constituintes, gerando, por conseguinte, outra fase de melhor qualidade (PINTO, 2002, *apud* KEMERICH *et al*, 2013).

Entretanto, de acordo com ORTH *et al* (2012), devido à não degradabilidade natural da maioria dos PRFV's, tal material tem sido responsável por sérios problemas ambientais, porquanto o petróleo é o principal constituinte em sua fabricação. É importante salientar, ainda, que a indústria de compósitos gera cerca de 13 mil toneladas de resíduo por ano, entre aparas e rebarbas de processos, além de peças com defeitos. LIMA (2010, *apud* ORTH *et al*, 2012) destaca que a maior parte desses subprodutos tem como destino final os aterros industriais.

Em Manaus, o PRFV, partícipe deste trabalho, tem sido utilizado na fabricação de postes, cruzetas e pontaleiras, com a finalidade de atender as obras do projeto “Luz para Todos” do Governo Federal. No entanto, até o presente momento, não há uma disposição econômica e ambientalmente adequada para os resíduos oriundos desse material.

Por outro lado, observa-se na região amazônica grande deficiência em jazidas de material pétreo superficial, característica a

encarecer os custos das obras civis regionais. Tal realidade gera elevadas despesas com a extração e transporte dessa matéria-prima, muitas vezes localizada em afloramentos a grandes distâncias da capital (SILVA *et al*, 2014).

Neste contexto, visou-se o aproveitamento do resíduo de PRFV, proveniente da indústria produtora desses postes de fibra, em adição ao solo argiloso, predominante na região de Manaus. Este material natural é usualmente utilizado como material de base dos pavimentos asfálticos, a despeito de sua baixa qualidade técnica.

2 OBJETIVOS

Analisou-se comportamento mecânico, a partir da resistência ao cisalhamento direto, das seguintes composições: 90% de solo natural + 10% de PRFV e 70% de solo natural + 30% de PRFV. Buscou-se identificar o efeito da adição desse material alternativo ao solo natural, verificando as proporções mais benéficas, bem como propor uma disposição ambientalmente adequada aos citados resíduos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Coletou-se o solo argiloso natural (Figura 1) na camada superficial onde se localiza a Universidade Federal do Amazonas (UFAM), no bairro do Coroado, zona leste da cidade de Manaus. Foi analisado pelos seguintes ensaios: limites de liquidez (NBR 6459/84) e plasticidade (NBR 7180/84), massa específica dos grãos (NBR 6508/84), granulometria (NBR 7181/84) e compactação (NBR 7182/86). Caracterizou-se o resíduo de RPFV (Figura 2), pela granulometria, sendo considerada apenas a textura inferior à peneira de 1,18 mm de abertura.

As composições participantes, 90% de solo natural + 10% de resíduo (Figura 3) e 70% de solo natural + 30% de resíduo, também foram caracterizadas de forma similar ao solo natural.



Figura 1. Solo argiloso natural



Figura 2. Resíduo de PRFV



Figura 3. Composição solo-10% resíduo

3.2 Moldagem e Ensaio de Cisalhamento Direto

Moldaram-se os corpos de prova a serem submetidos ao ensaio de cisalhamento direto, baseado nos parâmetros do ensaio de compactação na energia Proctor Intermediário, (massa específica aparente seca máxima e

umidade ótima), com controle do grau de compactação. Calculou-se a massa de cada corpo de prova por meio da Equação 1. A Figura 4 expõe o molde usado para compactação das amostras.

$$M = GC \cdot \gamma_{dm\acute{a}x} \cdot (w_{ot} + 1) \cdot V_{molde} \quad (1)$$

Onde:

M, massa a ser compactada, g;

GC, grau de compactação, no caso em torno de 100 %;

$\gamma_{dm\acute{a}x}$, massa específica aparente seca máxima, g/cm³;

w_{ot} , umidade ótima, %;

V_{molde} , volume do corpo de prova a ser compactado, cm³.



Figura 4. Molde para compactação de corpos de prova

Confeccionados os corpos de prova, realizou-se o ensaio de resistência ao cisalhamento direto a deformação controlada, segundo as recomendações da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, D 3080-2011). Variou-se as tensões normais num intervalo 50 kPa, sendo elas: 50, 100, 150, 200 kPa, relativo a taxa de deslocamento, no plano de ruptura, igual a 1 mm/min. Ao se associar as tensões cisalhantes com as tensões normais, determinaram-se, pelo critério de Mohr-Coloumb, os parâmetros coesão e ângulo de atrito interno. Nas Figuras 5 e 6, observa-se a prensa de cisalhamento direto do Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Tecnologia/UFAM e um corpo de prova cisalhado, respectivamente.

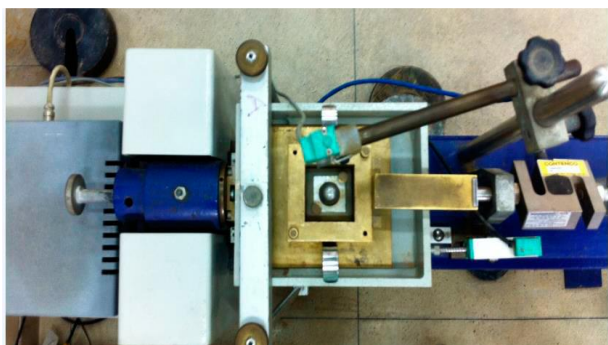


Figura 5. Equipamento de Cisalhamento Direto



Figura 6. Corpo de prova cisalhado

4 RESULTADOS

O solo natural e o resíduo de PRFV, bem como as composições estudadas, apresentaram as distribuições granulométricas mostradas na Figuras 7 e 8 respectivamente, e na Tabela 1. Tais resultados mostraram valores iguais a 72,89% e 55%, ou seja, predominância da argila no solo e no subproduto, respectivamente. Destaca-se a elevada porcentagem da fração areia (44%) no PRFV. Relativo às composições, os resultados mostraram aumento da fração de areia como consequência da adição do resíduo ao solo. A adição do resíduo ao solo influenciou, também, o coeficiente de curvatura (aumento) e o coeficiente de uniformidade (redução), conforme mostra a Tabela 2.

Concernente ao peso específico dos grãos, o material natural indicou valor igual a 26,7 kN/m³. Os índices de consistência das composições indicaram o decréscimo do índice de plasticidade com o aumento da participação do resíduo (Tabela 3).

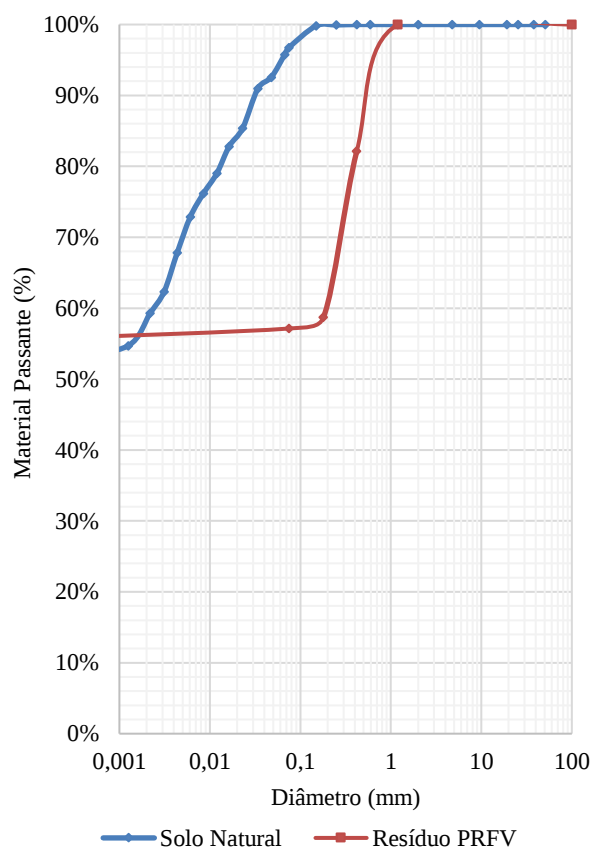


Tabela 1. Resultados da granulometria (%)

	Areia	Silte	Argila
Material	4,75-0,075 (mm)	0,075-0,005 (mm)	<0,005 (mm)
Solo	3,18	23,87	72,89
Resíduo	44,4	0,60	55,00
90 - 10	13,81	25,13	61,05
70 - 30	32,97	19,55	47,49

Tabela 2. Coeficientes de Uniformidade e Curvatura para cada composição.

	Coeficiente de Uniformidade	Coeficiente de Curvatura
Solo	2,00	Solo 0,50
90 - 10	3,50	90 - 10 0,25
70 - 30	18,40	70 - 30 0,04
Resíduo	27,00	Resíduo 0,03

Tabela 3. Índices de consistência (%)

Composição	LL	LP	IP
Solo natural	80	40	40
Solo nat. + 10% res.	73	37	36
Solo nat. + 30% res.	50	30	20

A partir dos resultados da textura e limites de Atterberg enquadraram-se o material natural e o conjunto das composições como MH e A-7-5, conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e as orientações da AASHTO, respectivamente (DAS, 2012). Portanto, permite-se concluir que a adição do material alternativo não causou variação, segundo tais classificações.

Os ensaios de compactação forneceram os valores expostos na Figura 9. Nota-se o decréscimo da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo com o aumento da porcentagem do subproduto. Confeccionaram-se os corpos de prova fundamentados nesses parâmetros, com vista ao teste de cisalhamento direto, que indicaram graus de compactação entre 99 e 100%.

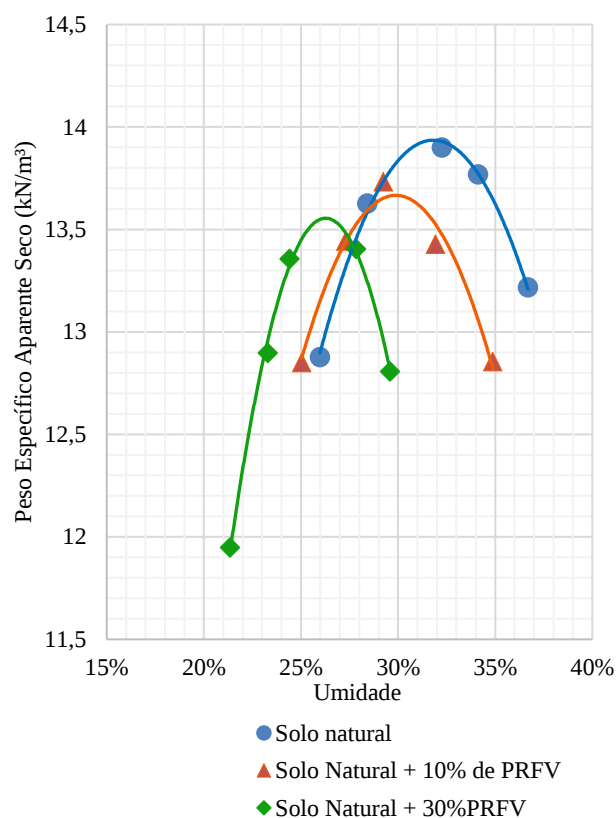


Figura 9. Curvas de Compactação

Os ensaios de cisalhamento direto forneceram as curvas deformação x tensão cisalhante, bem como os pares tensão normal x tensão cisalhante (Figuras 10, 11, 12) e (Tabelas 4, 5, 6).

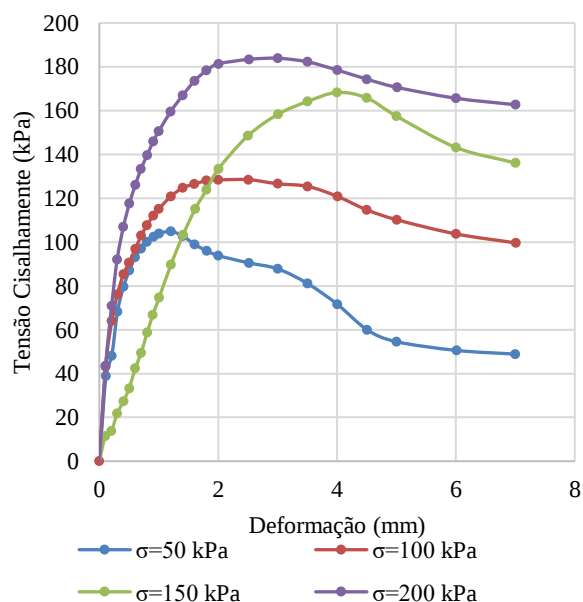


Figura 10. Deslocamento solo natural

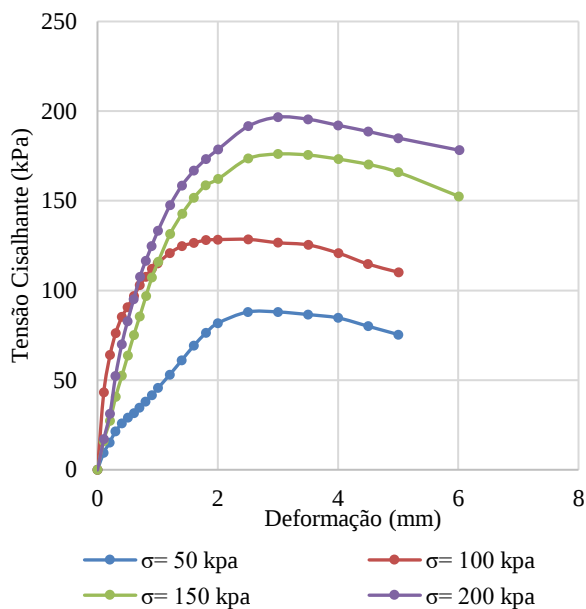


Figura 11. Deslocamento composição 90-10

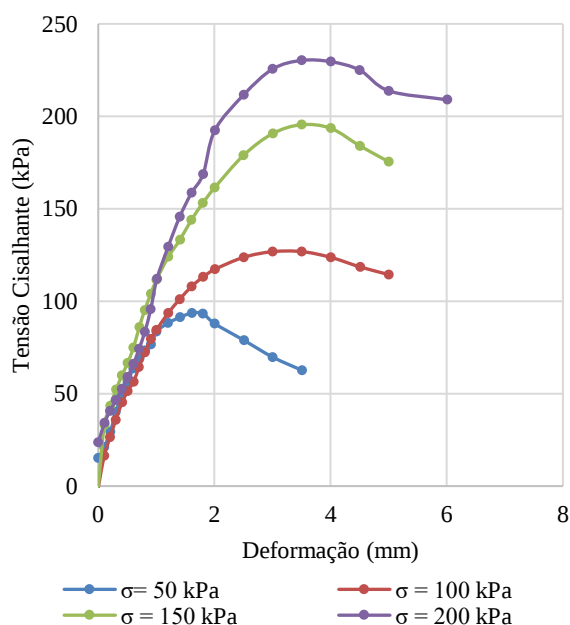


Figura 12. Deslocamento composição 70-30

Tabela 4. Deslocamento relativo a tensão de ruptura no solo natural

σ_c (kPa)	τ_c (kPa)	d (mm)
50	105	1,2
100	129	2,5
150	169	4,0
200	184	3,0

Tabela 5. Deslocamento relativo a tensão de ruptura na composição 90 -10

σ_c (kPa)	τ_c (kPa)	d (mm)
50	89	3,0
100	130	2,5
150	176	3,0
200	197	3,0

Tabela 5. Deslocamento relativo a tensão de ruptura na composição 70 -30

σ_c (kPa)	τ_c (kPa)	d (mm)
50	94	2,0
100	127	3,5
150	196	3,5
200	231	4,0

Tais dados permitiram a aplicação do critério Mohr-Coulomb, e assim determinaram-se as equações presentes na Figura 13, bem como a coesão e o ângulo de atrito constantes na Tabela 7. A análise desses resultados mostrou que a maior participação do resíduo inferiu alterações nos mencionados parâmetros. Em termos percentuais, a diminuição da coesão em relação ao solo natural foi de aproximadamente 30% para a mistura solo-10% resíduo, e 45% alusivo à composição solo-30% resíduo. Atinente ao ângulo de atrito, os acréscimos foram em torno de 26% (solo-10% resíduo) e 51% (solo-30% resíduo).

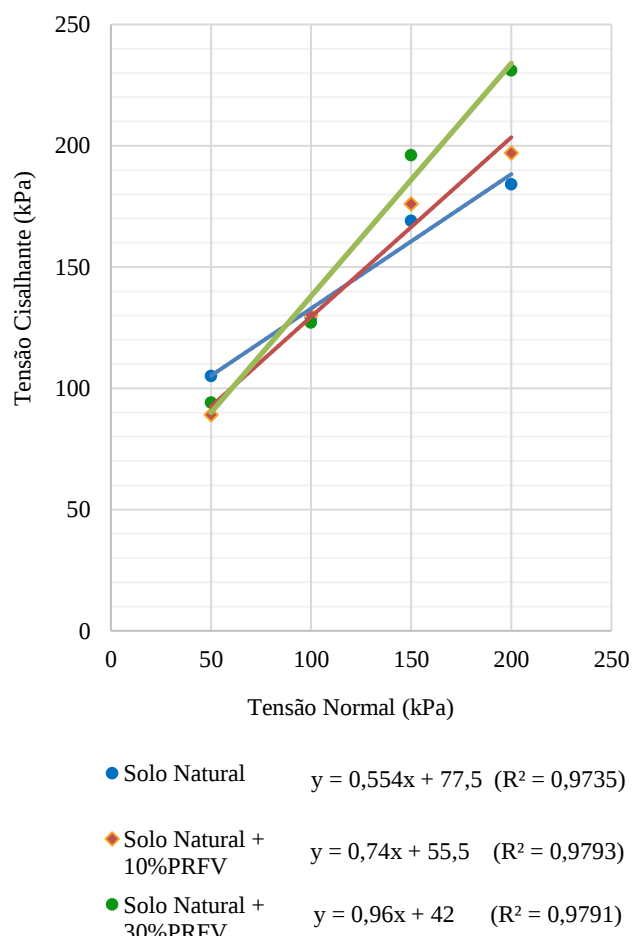


Figura 13. Critério de Mohr-Coulomb

Tabela 7. Coesão e Ângulo de Atrito (ϕ')

Composição	Coesão (kPa)	ϕ' (°)
Solo natural	77,5	29,0
Solo nat. + 10% res.	55,5	36,5
Solo nat. + 30% res.	42,0	44,0

FEUERHARMEL (2000) verificou a influência advinda da inserção de fibras de polipropileno e cimento em uma areia e uma argila. Os resultados mostraram que, para a areia, a inclusão da fibra levou a um aumento no ângulo de atrito aliado a uma queda na coesão. No caso da argila, concluiu que a adição da fibra, assim como o aumento em seu comprimento, acresceu o ângulo de atrito.

Pelo exposto no trabalho em pauta, notou-se que os efeitos da adição do resíduo (argila arenosa) modificaram o solo argiloso, tornando-o menos coeso, e mostrando um aumento expressivo do ângulo de atrito. Tal constatação deve-se a participação de uma destacada fração arenosa (44%), oriunda do PRFV, na mistura. Tais efeitos observados nesse parâmetro, embora relativo a outro material inserido em uma matriz argilosa, são concordantes com as conclusões de FEUERHARMEL (2000).

5 CONCLUSÃO

A adição do resíduo de PRFV ao solo argiloso superficial, característico e predominante na cidade de Manaus, acarretou mudanças significativas nos parâmetros físicos deste. Com a maior inserção do material alternativo, observou-se alteração na distribuição granulométrica das composições, as quais tiveram um aumento na proporção areia, resultando num material menos uniforme e mais granular; e nos parâmetros mecânicos, com a perda de coesão no material das composições em relação ao solo natural, bem como, em contrapartida, um aumento significativo do ângulo de atrito. Entretanto, é importante destacar que este é um trabalho inicial com a participação desse subproduto. Ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados, considerando outras texturas e proporções, para verificar a viabilidade técnica de sua utilização na estabilização granulométrica dos solos

regionais, bem como estudos de cunho econômico visando verificar a viabilidade econômica de sua utilização em larga escala.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 6459-84, Solo: Determinação do Limite de Liquidez*, (1984).
- ABNT. *NBR 6508-84, Solo: Massa Específica Real dos Grãos*, (1984).
- ABNT. *NBR 7180-84, Solo: Determinação do limite de Plasticidade*, (1984).
- ABNT. *NBR 7181-84, Solo: Análise Granulométrica*, (1984).
- ABNT. *NBR 7182-86, Solo: Ensaio de Compactação*, (1986).
- ASTM – American Society for Testing and Materials. *D 3080-11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions*. USA, 2011.
- Das, B. M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª Edição. Tradução All Tasks – São Paulo: Thomson Learning, 2007.
- Feuerharmel, Marcos Roberto. *Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno*. 2000, Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- Kemerich, P. D. C., Piovesan, M., Bertolotti, L. L., Altmeyer, S., HohmVorpagel, T. *Fibras de Vidro: Caracterização, Disposição Final e Impactos Ambientais Gerados*. v(10), nº 10, p. 2112-2121, Jan/Abr, 2013.
- Lima, Gilmar. *Compósitos vislumbram oportunidades nas áreas de transporte e infra-estrutura*. Revista Plástico Moderno, ed. 423, jan. 2010.
- Orth, C. M.; Baldin, N.; Zanotelli, C. T. *Implicações do Processo de Fabricação do Compósito Plástico Reforçado com Fibra de Vidro sobre o Meio Ambiente e a Saúde do Trabalhador: o Caso da Indústria Automobilística*. Revista Produção Online, Florianópolis, Sc, V.12, N. 2, p. 537-556, 2012
- Pinto, N. C. K.; *Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro*. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Universidade de São Paulo, SP, 2002.
- Risson, P., Carvalho, G. A., Viera, S. L., Zeni, M., Zatera, A. J., *Reaproveitamento de Resíduos de Laminados de Fibra de Vidro na Confecção de Placas Reforçadas de Resina Poliéster*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, p. 89-98, Jul/Set, 1998
- Silva, C. L., da Silva, A. C. L., da Frota, C. A, *Módulo dinâmico de compósitos asfálticos com agregados sinterizados de argila calcinada*, Cerâmica 60, p. 10-21, 2014.