

Estudo de Estabilização de Solos Sedimentares Costeiros com Baixa Capacidade de Suporte

Cezar Augusto Burkert Bastos

Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande/RS, Brasil, cezarbastos@furg.br

Pedro Henrique de Souza Farias Brandão

Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande/RS, Brasil, pedrohbrandao@hotmail.com

Larissa Macedo Aguiar

Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande/RS, Brasil, mayracpereira@hotmail.com

Franklin Willians Ramos Cavalcanti Albuquerque

Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande/RS, Brasil, keli_luana@hotmail.com

RESUMO: A Planície Costeira Sul do RS se caracteriza pela presença de solos sedimentares, muitos dos quais impróprios para obras de terra em geral (aterros, base de pavimentos, entre outros). Estas obras dependem, em muito dos casos, de materiais de empréstimo mais nobres, com custo de aquisição e transporte elevados. Neste sentido, a melhoria de propriedades de solos locais pela técnica de estabilização físico-química torna-se uma atrativa alternativa. Na região de Santa Vitória do Palmar, extremo sul do Brasil, têm-se solos areno-argilosos de terraços lagunares que apresentam baixa capacidade de suporte retratada por baixos valores do índice de suporte Califórnia (CBR). Este trabalho apresenta resultados de experimentos na busca da dosagem do teor de cimento para estabilização destes solos segundo método de dosagem simplificado da Portland Cement Association (PCA), apresentado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Os solos são divididos em dois grupos para estudo em função da granulometria apresentada. O estudo conduzido serve como importante referência na estabilização dos solos desta natureza, fortalecendo a solução por solo-cimento como uma alternativa de projeto para obras de terra e pavimentação na região.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de Solos, Solo-Cimento, Solos Costeiros, Planície Costeira Sul.

1 INTRODUÇÃO

A Planície Costeira Sul do RS se caracteriza pela presença de solos sedimentares, muitos dos quais com aplicação restritiva para obras de terra em geral (Bastos, 2008). Obras de aterros, base de pavimentos, entre outros, em muito dos casos dependem de materiais de empréstimo mais nobres (saibros, argilas lateríticas e britas graduadas, p.ex.), com distância e custo de aquisição e transporte elevados. Neste sentido, a melhoria de propriedades de solos locais pela

técnica de estabilização físico-química torna-se uma alternativa atrativa. Na região de Santa Vitória do Palmar, extremo sul do país, têm-se solos areno-argilosos de terraços lagunares, pedologicamente classificados como planossolos, que apresentam baixa capacidade de suporte caracterizada por pequenos valores do índice de suporte Califórnia (CBR). A região sofre um recente crescimento da demanda por obras de terra em virtude da implantação de parques eólicos.

Como estabilização entende-se todos os

procedimentos que visam melhorar e estabilizar propriedades do solo (como capacidade de suporte, deformabilidade, expansibilidade, permeabilidade, entre outros). A estabilização de solos é classificada em mecânica e físico-química. A estabilização físico-química é aquela que envolve o uso de aditivos no solo visando mudanças nas suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Na estabilização com cimento a ação cimentante do aditivo se dá junto aos grãos do solo através de reações de hidratação e hidrólise. As ligações mecânicas e químicas se dão entre o cimento e a superfície rugosa dos grãos. O cimento atua nos pontos de contato entre os grãos, logo, a cimentação é mais efetiva quanto maior o número destes contatos. A cimentação do solo-cimento ocorre por reações primárias (cimentação de partículas) e secundárias (predominante em solos argilosos). A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) publicou um completo estudo técnico sobre dosagem das misturas de solo-cimento estabelecendo normas de dosagem (ABCP, 1986).

Pesquisas na estabilização de solos costeiros têm um destacado histórico pelo grupo de pesquisa Geotecnia-FURG e colaboradores, são exemplos de trabalhos conduzidos: Bastos et al. (1992), Bastos (2004), Prietto et al. (2010), Ruver et al. (2013a) e Ruver et al. (2013b).

A motivação do estudo em foco partiu de uma extensiva pesquisa de jazidas para obras das subestações de energia Santa Vitória e Marmeleiro, vinculadas a parques eólicos em implantação na região de Santa Vitória do Palmar (Bastos, 2014). Tais parques e obras correlatas compõem o maior complexo eólico da América Latina, o Complexo Eólico Campos Neutrais. A Figura 1 localiza os empreendimentos (Brasil, 2016) e a Figura 2 ilustra a obra da Subestação Santa Vitória do Palmar A,B - 500/138 KV - Eletrosul (Schreiber Engenharia, 2016).

O trabalho apresenta resultados de experimentos na busca da dosagem do teor de cimento para estabilização destes solos segundo método simplificado da Portland Cement Association (PCA). Para tal, os solos de 26 jazidas pesquisadas foram agrupados em dois grandes grupos em função da granulometria.

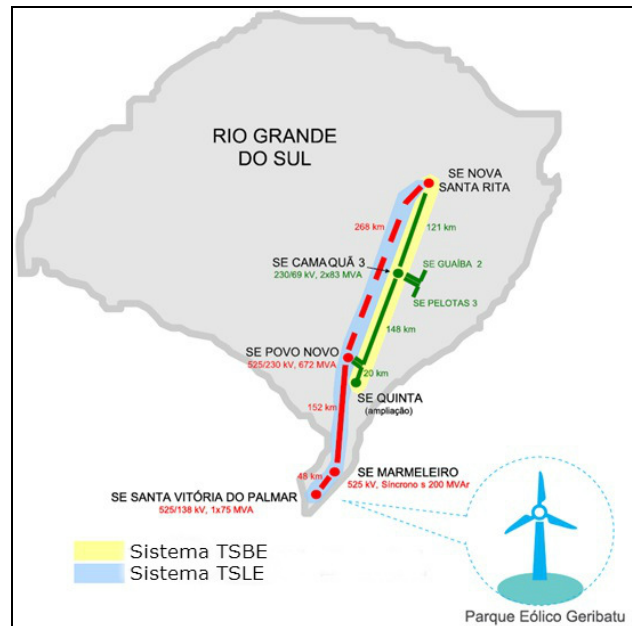


Figura 1. Localização das subestações Santa Vitória e Marmeleiro pertencentes ao Sistema TSLE - Transmissora Sul Litorânea de Energia (Brasil, 2016)



Figura 2. Obra da Subestação Santa Vitória do Palmar A,B - 500/138 KV - Eletrosul (Schreiber Engenharia, 2016)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul é constituída por diferentes sistemas deposicionais oriundos dos eventos transgressivos e regressivos, que foram responsáveis por sua modelagem. Na sua porção sul da Planície Costeira tem-se terraços lagunares e barreiras litorâneas (Tomazelli e Villwock, 2005), constituídos por sedimentos argilo-arenosos mais antigos do Pleistoceno, que deram origem às unidades geomorfológicas Lombadas Costeiras e Planície Alta Costeira (Cunha et al., 1996). Nestes ambientes desenvolvem-se predominantemente perfis de

Planossolos Eutróficos e Solódicos com horizonte superficial arenoso contrastando com horizonte subsuperficial argilo-arenoso (Figura 3). Os solos comumente apresentam argila de atividade alta e elevada saturação de bases e, no caso dos planossolos solódicos, saturação elevada em sódio, fruto do retrabalhamento pelo mar nos eventos transgressivos.

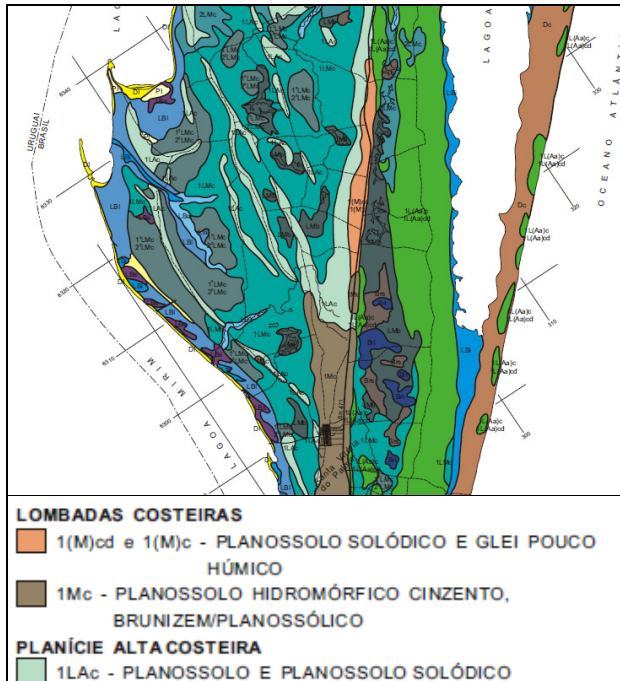


Figura 3. Unidades geomorfológicas e pedológicas na área de pesquisa das jazidas (modificado de Cunha et al., 1996)

O trabalho teve início e fonte de motivação a realização e a análise de uma série de ensaios de laboratório conduzidos pelo Laboratório de Geotecnia e Concreto da FURG com materiais de empréstimo empregados e com potencial de emprego na construção dos aterros compactados das subestações Marmeleiro e Santa Vitória, situadas no município de Santa Vitória do Palmar/RS (Bastos, 2014).

Os resultados da caracterização geotécnica dos materiais das 26 jazidas estudadas e os parâmetros de compactação e de capacidade de suporte e expansão são ilustrados nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de caracterização

Jazida / Amostra	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	Classif. HRB-AASHTO
1	55	12	33	30	14	A6(4)
2	62	9	29	28	15	A6(2)
3	70	9	21	22	15	A2-4(0)
4	68	8	24	24	15	A2-4(0)
5	54	16	30	30	15	A6(4)
6	11	11	5	37	29	A2-4(0)
8	75	3	22	23	14	A2-4(0)
9	82	3	15	19	12	A2-4(0)
10	80	5	15	19	12	A2-4(0)
11	76	9	15	19	13	A2-4(0)
12	74	7	19	18	12	A2-4(0)
13	73	10	17	16	10	A2-4(0)
14	73	10	17	25	13	A2-6(0)
15	78	4	18	22	9	A2-6(0)
16	81	4	15	21	11	A2-4(0)
17	62	9	29	27	15	A6 (1)
18	71	3	26	24	14	A2-4(0)
19	77	3	20	23	13	A2-4(0)
20	85	1	14	18	13	A2-4(0)
21	68	5	27	27	15	A2-6(0)
22	72	4	24	27	14	A2-6(0)
23	89	2	9	18	14	A2-4(0)
24	73	2	25	29	21	A2-4(0)
25	62	8	30	29	15	A6 (2)
26	51	14	35	33	15	A6 (6)

Obs: A amostra 7 não foi caracterizada; a amostra 6 discorda ao mostrar excepcional teor de pedregulho (66%)

Tabela 2. Resultados dos ensaios de compactação e CBR

Jazida / Amostra	$\gamma_{dm\max}$ (kN/m ³)	w _{ót} (%)	ISC (%)	Expansão (%)
1	16,94	19,2	2	0,34
2	17,78	15,6	3	0,79
3	18,40	13,3	6	0,30
4	18,27	14,5	3	0,38
5	17,72	15,9	3	0,54
6	17,31	15,4	11	0,39
8	18,06	12,6	1	1,41
9	17,98	13,1	11	0,67
10	18,06	13,0	3	0,22
11	18,40	11,0	8	0,29
12	18,57	13,3	9	0,04
13	18,77	12,9	9	0,15
14	18,77	12,1	10	0,17
15	18,11	14,9	5	0,46
16	18,22	14,0	6	0,05
17	18,36	13,3	9	0,19
18	17,89	15,4	3	0,71
19	17,73	16,4	2	0,37
20	18,18	15,0	4	0,21
21	18,75	13,2	15	0,00
22	17,57	15,6	4	0,79
23	17,86	14,9	4	1,01
24	18,59	12,7	15	0,00
25	17,83	16,4	2	0,37
26	17,26	11,7	3	2,11

Os solos de empréstimo estudados mostraram-se como areias médias e finas argilosas, com teor de argila entre 9% e 35%. Na sua maioria pertencem à classe A2 (A2-4 ou A2-6) pelo sistema HRB-AASHTO de classificação de solos. Já os mais argilosos e plásticos pertencem à classe A6. Quanto à plasticidade, são na maioria medianamente plásticos, com índice de plasticidade entre 7% e 15%. Na Carta de Plasticidade de Casagrande os solos pertencem ao domínio das areias argilosas e situam-se acima da Linha A, evidenciando a relativa plasticidade conferida pela fração argilosa destes solos.

A atividade coloidal (Ia) dada pela razão entre o índice de plasticidade e teor de argila dos solos varia entre 0,42 e 1,56, predominando solos com baixa atividade coloidal ($Ia < 0,75$).

A caracterização geotécnica destes materiais foi condizente com a natureza geológica da região, formada por depósitos de terraços lagunares preteritamente retrabalhados pelo mar.

Os solos apresentaram baixa capacidade suporte de tal sorte que somente solos de duas jazidas atingiram o valor mínimo de ISC igual a 15%, exigido para as obras de terra previstas nas subestações.

Para esta pesquisa de viabilidade da estabilização com cimento, os solos das jazidas foram agrupados em duas amostras, em função da granulometria apresentada: amostras 1 e 2, com teor de silte + argila de 35% e 21%, respectivamente. Com estas amostras foi realizada caracterização geotécnica e obtidos parâmetros de compactação na energia do Proctor Normal.

A experiência brasileira na dosagem de solo-cimento baseia-se, principalmente, nos métodos de dosagem da norte-americana Portland Cement Association (PCA). Não obstante outros países haverem desenvolvido procedimentos diferentes, falta-lhes, entretanto, o que é justamente a maior prerrogativa dos métodos da PCA para o Brasil: a comprovação de seus resultados em um grande número de obras executadas e em uso desde 1939, com extensa variedade de solos, das mais diversas origens e regiões no país (ABCP, 1986).

A PCA dispõe de uma Norma Geral e de uma Norma Simplificada de Dosagem. A Norma Geral de Dosagem apresenta uma desvantagem prática: o tempo de duração dos ensaios, principalmente dos ensaios de durabilidade, no que se sugeriu procurar correlacionar os resultados desse ensaio com outro de mais rápida execução, simplificando e encurtando o tempo gasto na dosagem. A norma simplificada do PCA, baseada na correlação estatística obtida nos resultados de ensaios de durabilidade e de resistência à compressão simples aos 7 dias com 2438 solos arenosos, apresentou um método simplificado para a dosagem de solo-cimento. O fundamento desse método é a constatação de que um solo arenoso, com determinada granulometria e massa específica aparente seca máxima, requererá, de acordo com o critério de perda de massa no ensaio de durabilidade, o mesmo teor de cimento por este indicado, desde que alcance resistência à compressão, aos 7 dias, superior a um certo valor mínimo estabelecido estatisticamente na série de ensaios de comparação realizada. O procedimento daí resultante foi materializado em ábacos de fácil e direta utilização.

O uso do método restringe-se a solos que contenham no máximo 50% de partículas com diâmetro equivalente inferior a 0,05 mm e no máximo 20% de partículas com diâmetro equivalente inferior a 0,005 mm. A Norma Simplificada de Dosagem divide-se em dois métodos distintos. Concomitantemente atendidas as exigências quanto aos teores da argila e de silte mais argila, caso o solo não contenha partículas com tamanho superior a 4,8 mm é usado o Método A (ou Norma Simplificada A).

A norma brasileira ABNT – NBR 11798/2012 (Materiais para base de solo-cimento – requisitos) estabelece que, com finalidade de base de pavimento, o solo-cimento é restrito à estabilização de solos das classes A1, A2 e A4, enquanto a ABNT – NBR 12253/2012 (Solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento - procedimento) explicita como valor mínimo de RCS aos 7 dias de cura o valor único de 2100 kPa.

Para dosagem de misturas de solo-cimento foi utilizado o método A estabelecido pela norma da ABCP. Para aplicação do método foram elaborados corpos de prova 5x10 cm em triplicata para ensaios de compressão simples nos teores de cimento de 0%, 3%, 6%, 9% e 12% e idades de cura úmida de 7, 14, 28, 60 e 90 dias. As rupturas foram realizadas em prensa elétrica instrumentada por célula de carga e transdutor de deslocamento (Figura 4).



Figura 4. Arranjo experimental para ruptura dos corpos de prova em compressão simples

Na verdade, o estudo em foco ampliou a investigação além do estabelecido na Norma Simplificada A, na medida em que foram obtidas curvas de compactação para todos os teores de aditivo estudados e foram moldados corpos de prova em triplicata para todas as misturas. A aplicação do método restringiu-se a obtenção do valor mínimo de resistência a compressão simples aos 7 dias de cura em função no teor de partículas menores que 0,05 mm (Figura 5), que, cabe destacar, difere da fração silte + argila pela ABNT – NBR 6502/1995 (Rochas e Solos que define a fração silte + argila como partículas menores que 0,06 mm (dados da Tabela 1).

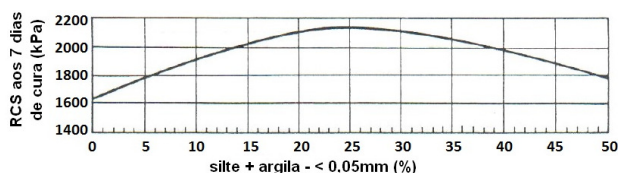


Figura 5. Resistência a compressão simples mínima requerida aos 7 dias (modificado de ABCP, 1986)

3 RESULTADOS ALCANÇADOS

A Tabela 3 resume os resultados dos ensaios de caracterização das duas amostras agrupadas. A Figura 6 a seguir ilustra as curvas granulométricas.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de caracterização

Amostra	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	Classif. HRB-AASHTO
1	63	11	26	22	11	A6(1)
2	79	3	18	22	12	A2-4(0)

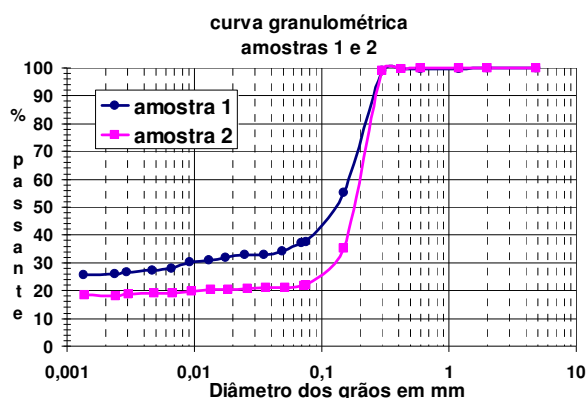


Figura 6. Curvas granulométricas das amostras agrupadas

As amostras agrupadas mostraram-se representativas dos distintos materiais das jazidas pesquisadas. Destaca-se que a plasticidade dos dois materiais pouco se altera apesar da variação granulométrica.

Se avaliarmos a granulometria das amostras frente aos critérios normativos, a amostra 1 seria desqualificada para estabilização de um pavimento rodoviário, visto que o teor de partículas menores que 0,005 mm (argila pelo PCA) é de 27,5%. Por outro lado, a NBR 11798/2012 não indica solos da classe A6 para estabilização com cimento, quando o uso indicado é base de pavimento. No entanto, neste último caso cabe destacar que o solo não se enquadra como pertencente à classe A4 por somente 1% a mais no valor de IP.

As curvas de compactação obtidas das diferentes misturas com as amostras 1 e 2 são apresentadas na Figura 7. A Tabela 4 apresenta os parâmetros ótimos de compactação a partir das curvas.

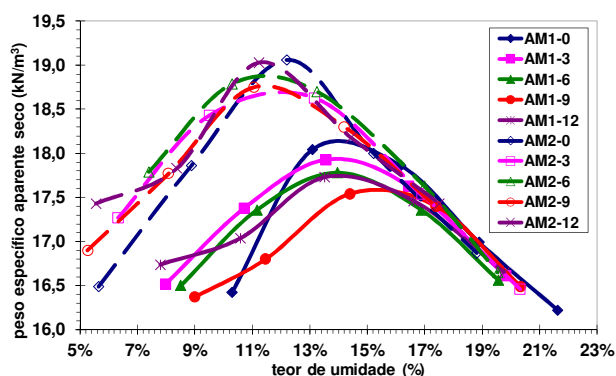


Figura 7. Curvas de compactação das misturas. Exemplo da identificação das misturas: AM1-6 = amostra 1 com 6% de cimento

Tabela 4. Parâmetros de compactação das misturas

amostra	parâmetros	teor de cimento				
		0%	3%	6%	9%	12%
1	$\gamma_{d\text{máx}}$ (kN/m³)	18,2	18,0	17,8	17,6	17,8
	$w_{\text{ót}}$ (%)	14,0	14,4	14,0	15,3	14,5
2	$\gamma_{d\text{máx}}$ (kN/m³)	19,1	18,7	18,9	18,8	19,0
	$w_{\text{ót}}$ (%)	12,2	12,0	11,5	11,4	11,4

Os parâmetros mostram a diferença de comportamento das amostras. A amostra 1 mais argilosa apresenta menores valores de densidade máxima e maiores valores de umidade ótima em relação a amostra 2 com menor teor de finos. A mudança no teor de aditivo não mostra uma tendência clara na variação dos parâmetros.

Em função do teor de finos, o método simplificado A da PCA (ABCP, 1986) estabelece resistência à compressão mínima aos 7 dias de cura de 2050 kPa para a amostra 1 e 2100 kPa para a amostra 2 (Figura 5). Nota-se que no caso da amostra 2 é o mesmo valor mínimo estabelecido pela NBR 12253/2012.

A Figura 8 ilustra que somente a amostra 1 atinge o requisito de RCS para um teor de 12% de cimento. Entretanto, os resultados obtidos para outros tempos de cura indicam significativo crescimento da RCS até os 60 dias, atingindo 2905 kPa para a amostra 1 e até 3914 kPa para amostra 2, crescimento em 98% e 85% respectivamente, demonstrando que reações secundárias têm grande importância com as misturas neste teor.

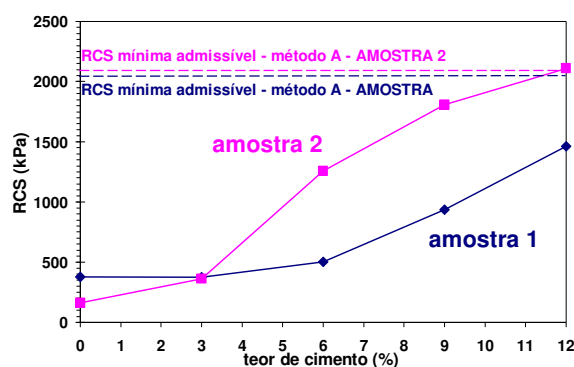


Figura 8. Aplicação do critério de dosagem pela norma simplificada - método A da PCA, segundo ABCP (1986)

4 CONCLUSÕES

O estudo apresentado mostra que a estabilização físico-química com cimento de solos costeiros areno-argilosos de terraços lagunares do extremo sul do Brasil tem potencial na melhoria destes solos frente a aplicações diversas.

A amostra agrupada 2 mais arenosa mostrou, como esperado, melhor desempenho, atingindo maiores valores de resistência a compressão simples e o valor mínimo estabelecido pelo método simplificado A da PCA. O consumo de 12% de cimento é considerado elevado, entretanto o método estabelece valores mínimos para aplicação nobre do solo-cimento como base rodoviária. Para outras aplicações menos exigentes, como vias secundárias e urbanas e camadas finais de aterro para subestações, o estudo pode prescrever menores teores de aditivo.

O teor significativo de argila indica o potencial de reações pozolânicas na estabilização com cal. Estudos estão sendo conduzidos com este outro agente estabilizante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PDE-FURG pelo apoio à pesquisa e ao técnico Bruno Mariano Cerqueira da Silva pelo auxílio na instrumentação dos ensaios de compressão simples.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1986). *Dosagem das misturas de solo-cimento – Normas de dosagem e métodos de ensaios*. Estudo Técnico n.35. 3ª ed. São Paulo/SP:ABCP. 57p.
- Bastos, C. A. B. (2004) Estudos recentes conduzidos na FURG sobre solos alternativos para pavimentação econômica e obras de terra na Planície Costeira Sul. *Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online)*, v.4, p.31 - 42.
- Bastos, C.A.B. (2014) *Estudo Geotécnico - Subestações Marmeleiro e Santa Vitória*. Relatório Técnico. Laboratório de Geotecnia e Concreto – FURG, Rio Grande/RS. 34p.
- Bastos, C.A.B., Nunez, W.P., Dias, C.R.R. (1992) Caracterização e estudo da potencialidade de emprego em estradas vicinais de solos plintíticos ocorrentes no sul da Planície Costeira do RS. 26ª Reunião Anual de Pavimentação. *Anais...* ABPv, Aracajú/SE. v.1. p.1 - 23.
- Brasil. Ministério do Planejamento. Programa de Aceleração do Crescimento. *Brasil inaugura parque eólico do maior complexo da América Latina*. <http://www.pac.gov.br/noticia/48d35480>. acessado em 13/2/2016.
- Cunha, N.G., Silveira, R.J.C., Severo, C.R.S., Soares, M.J., Costa, C.N., Cruz, S.N. (1996) *Estudo dos solos do município de Santa Vitória do Palmar*. Documentos 24/96. Pelotas/RS:Embrapa/CPACT. 58p.
- Prietto, P.D.M., Arnold, G.P., Bastos, C.A.B., Nunez, W. P. (2010) Avaliação experimental de solos quimicamente estabilizados para utilização em bases de estradas de baixo volume de tráfego. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. *Anais...* ABMS, Gramado/RS. CD-ROM
- Ruver, C.A., Bastos, C.A.B., Machado, C.R., Custodio, C.Z., Casarini, M.M. (2013a) Avaliação técnica e de custos de execução de misturas de solo-cimento para bases de pavimentação da região sul do estado do Rio Grande do Sul. *Revista Pavimentação*, v.28, p.41 - 56.
- Ruver, C.A., Machado, C.R., Bastos, C.A.B., Dias, C.R.R. (2013b) Viabilidade técnico-econômica da areia eólica estabilizada com agentes aglomerantes para emprego em pavimentação. *Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online)*, v.13, p.13 - 24.
- Schreiber Engenharia (2016). *Subestação Santa Vitória do Palmar A, B - 500/138 KV - Eletrosul – RS*. <http://www.schreiber.eng.br/subes-vitoria>. acessado em 13/2/2016.
- Tomazelli, L.J., Villwock, J.A. (2005) Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. *Gravel*, n.3, p.109-115.