

Relatório Final de Atividades

**Uso de produtos químicos, cal e resíduo, para melhoramento do solo rosa da
formação Guabirotuba**

Nicole Graeff Farias Muchinski
Bolsista UTFPR
Prof. Ronaldo Luis dos Santos Izzo

CURITIBA/PR

2021

NICOLE GRAEFF FARIAS MUCHINSKI

**Uso de produtos químicos, cal e resíduo, para melhoramento do solo rosa da
formação Guabirotuba**

Relatório de Pesquisa do Programa
de Iniciação Tecnológica da
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná.

CURITIBA/PR

2021

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. MELHORAMENTO DE SOLOS	5
2.2. PÓ DE VIDRO	5
2.3. CAL	6
2.4. FORMAÇÃO GUABIROTUBA	6
3. OBJETIVO GERAL	7
3.1. OBJETIVO ESPECÍFICO	7
4. METODOLOGIA	8
4.1. MATERIAIS	8
4.1.1. Solo	8
4.1.2. Cal	8
4.1.3. Água	8
4.1.4. Pó de vidro	8
4.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	8
4.3. CURVA DE COMPACTAÇÃO	9
4.4. ENSAIOS DE COMPRESSÃO	10
4.4.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	11
4.4.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	11
5. RESULTADOS	11
5.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	11
5.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	12
5.3. CONCLUSÃO	15
6. REFERÊNCIAS	16

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de construção de novas edificações e da construção de novas vias públicas, rodovias e modernização de vias rurais ocorre por conta da expansão das cidades, ou seja, por conta da urbanização. Com isso, têm-se a necessidade de construção de novas edificações, novas rodovias ou modernização e ampliação delas. Então, o fator mais importante das construções civis tem sido o local da construção, independente das condições da região, como: o quanto o solo é compatível com a necessidade construtiva. Os solos argilosos e orgânicos são mais trabalhosos para a construção civil e podem aparecer nos locais de interesse. Portanto, a tendência é cada vez mais a engenharia civil se deparar com estes desafios geotécnicos: como compatibilizar o solo e construção.

A engenharia civil é motivada a pesquisar e obter saídas viáveis para adequar solo e construção. Uma opção para as edificações é a utilização de fundações profundas garantindo maior estabilidade estrutural no caso de solos problemáticos. Porém, quanto mais profundas as fundações, maior a complexidade dos cálculos, maior a quantidade de material, ou seja, as fundações profundas acabam elevando o custo da obra. Quando se trata das construções de pavimentação o uso de estruturas mais profundas como forma de trazer estabilidade se torna impraticável devido a sua dimensão. Outra opção é o melhoramento das características mecânicas do solo, tornando-o apto para as construções de edificações ou de pavimentação.

De forma geral, o melhoramento do solo é realizado com cimento Portland e Cal, principalmente pela fácil disponibilidade destes materiais. Porém, por conta do custo e dos efeitos nocivos ao meio ambiente, uma das alternativas é a substituição do cimento Portland por resíduos industriais e domésticos. Uma das características desejáveis dos resíduos é a atividade pozolânica e a alcalinidade. Neste trabalho será abordado o melhoramento do solo pela adição do pó de vidro, material com atividade pozolânica (MASSAZA, 2004).

O resíduo do vidro, especificamente, o pó de vidro será analisado na mistura do solo para o melhoramento. Curitiba, local de onde será realizado este estudo, está majoritariamente situada sobre a bacia sedimentar da formação Guabirotuba são 300 km² de bacia sedimentar em Curitiba e 900 km² ao total (FELIPE, 2011). A formação geológica Guabirotuba possui inúmeras camadas de solo e estruturalmente cada

camada está situada entre zonas de cisalhamentos rúpteis. As camadas que contêm maiores quantidades de argilas e siltes são maciças e cinzas esverdeadas. Já os depósitos rudáceos são encontrados majoritariamente nas bordas da bacia e possuem colorações mais avermelhadas (SALAMUNI, 1999).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. MELHORAMENTO DE SOLOS

O melhoramento de solos tem como objetivo aprimorar as características do solo, como: aumentar a resistência mecânica e a resistência à água. Esse método pode ser realizado de três maneiras: Estabilização mecânica, física e química. A escolha do tipo de estabilização depende das propriedades do solo e as propriedades desejadas (SANTOS, 2012).

A estabilização física corresponde aos processos que envolvem mudança de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção (CRUZ; JALALI, 2010). Já a estabilização mecânica engloba todos os processos que envolvem apenas o próprio solo, sem adição de novos materiais (SANTOS, 2012).

A estabilização química corresponde a incorporação de um aditivo ao solo. Este método traz resultados através das reações químicas que ocorrem entre o aditivo e os minerais do solo. A adição de materiais ao solo resulta em reações químicas que conferem à mistura uma umidade ótima para a compactação, preenchendo os poros e, conseqüentemente, oferecem uma maior resistência e menor permeabilidade (MAKUSA, 2013). Neste trabalho será avaliado o uso da cal e do pó de vidro como aditivos.

2.2. PÓ DE VIDRO

Segundo a ABNT (2004) o vidro é classificado como um resíduo de classe II B, ou seja, é um resíduo sólido não perigoso ao meio ambiente e inerte, ou seja, ele não lixivia. O resíduo do vidro ainda não é utilizado na construção civil para a estabilização de solos, mas tem sido amplamente estudado.

O passante da peneira 0,075 mm possui propriedade pozolânica de grande interesse para a engenharia civil (AFONSO, 2019). A propriedade pozolânica do pó de vidro é a responsável pela sua efetividade no melhoramento de solos. Segundo

Massaza (2004), pozolanas são caracterizadas como materiais inorgânicos compostos por sílica e alumínio e que quando em contato com Óxido de Cálcio na presença de umidade desencadeia reações que produzem compostos cimentícios.

2.3. CAL

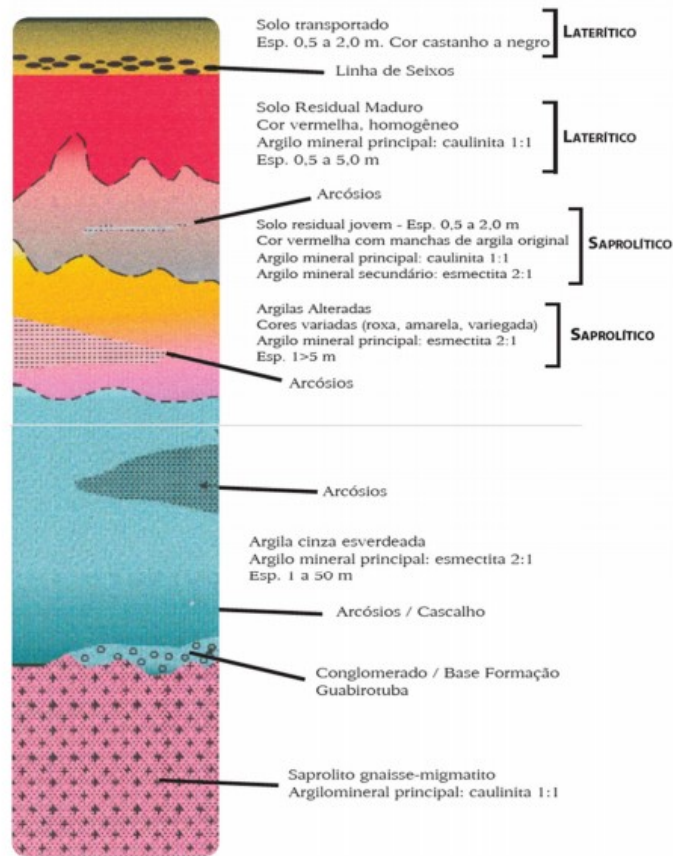
Segundo Marques (2006), a cal é um aglomerante resultante da calcinação de rochas carbonáticas e o produto desse processo são os óxidos de cálcio, conhecidos popularmente como a cal viva. Algumas reações de formação da cal serão expostas a seguir. Resumidamente, o carbonato de cálcio (CaCO_3) da rocha quando em contato com o calor libera o CO_2 , obtendo o óxido de cálcio (CaO).

A utilização da cal na construção civil pode ser justificada pelo aumento da plasticidade nas argamassas, pintura, fabricação de tijolos, bloco e estabilização de sub-bases e bases de pavimentos, ou seja, no melhoramento do solo (MARQUES, 2006). Segundo Brito (2017), a mistura de cal no solo é recomendada para solos argilosos ou siltosos. As reações químicas da cal em contato com o solo úmido ocorrem por modificação ou estabilização

2.4. FORMAÇÃO GUABIROTUBA

A formação Guabirota encontra-se sobre as rochas do complexo Cristalino que são constituídas principalmente de argilas siltosas ou siltes argilosos. Essa formação é encontrada na região metropolitana de Curitiba com área aproximada de 3000 km² (KORMANN, 2002). O que acontece é que há diferentes camadas do solo da formação Guabirota pela região de Curitiba e Região Metropolitana. Há locais em que o solo corresponde à primeira camada e há locais em que são encontrados solos das camadas seguintes a primeira (Figura 1). Os solos de diferentes camadas são identificados e diferenciados principalmente pela coloração. O solo utilizado neste trabalho corresponde a quarta camada, reconhecido como Solo Rosa.

Figura 1 - Estratificação da Formação Guabirotuba



As camadas de solo da formação Guabirotuba são diferenciadas principalmente pelo mineral principal presente e pela coloração do solo de cada camada (SALAMUNI, 1999).

3. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o ganho de resistência mecânica do solo rosa a partir da adição de cal e pó de vidro ao solo.

3.1. OBJETIVO ESPECÍFICO

Avaliar o ganho de resistência mecânica do solo rosa da formação Guabirotuba melhorado com cal e pó de vidro, e verificar a eficiência da utilização do pó de vidro como aditivo ao solo.

4. METODOLOGIA

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Solo

No presente trabalho foi utilizada uma amostra do solo da Formação Guabirotuba disponível no laboratório de Geotecnia da UTFPR campus Ecoville.

A amostra corresponde ao solo da quarta camada da Formação Guabirotuba, presente na região metropolitana de Curitiba no município de Fazenda Rio Grande. Em uma análise primária caracteriza-se o solo da formação Guabirotuba pela coloração. O solo possui uma coloração rosada, portanto é denominado solo rosa.

4.1.2. Cal

A cal que foi utilizada neste estudo é uma cal hidratada dolomítica, composta por hidróxido de cálcio e magnésio que está disponível no laboratório de Geotecnia da UTFPR campus Ecoville. Esta cal é produzida em Almirante Tamandaré.

4.1.3. Água

A água utilizada para a realização dos ensaios e para a montagem dos corpos de prova foi a água destilada.

4.1.4. Pó de vidro

O pó de vidro que foi utilizado neste trabalho também será da amostra já presente no laboratório de Geotecnia da UTFPR campus Ecoville. O vidro foi submetido a processos de destorroamento a fim de chegar à granulometria de 0,075 mm.

4.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Conforme a norma ABNT NBR-6457, a primeira etapa para a preparação das amostras é a secagem. O solo foi colocado na estufa à 60°C. Após o solo estar seco, a amostra foi destorroada com o auxílio de um almofariz e depois passada na peneira nº8. Optou-se pela peneira nº 8 ao invés da peneira de nº 10 por conta do tamanho

dos grãos, o passante da peneira de nº 8 tem maior interação com a cal, por conta da sua pequena granulometria.

A amostra separada foi de 1500 g conforme orienta a norma ABNT NBR-6457 e então, com base nos dados obtidos no ensaio de Proctor, obtiveram-se as quantidades de água para a umidade ótima do solo e para cada traço variou-se a quantidade de cal e pó de vidro para as futuras análises.

A composição de cada traço está apresentada na a Tabela 1. As quantidades de solo foram definidas para a preparação de 6 corpos de prova de cada traço, 3 deles destinados ao ensaio de compressão diametral e os outros 3 para o ensaio de compressão simples.

TRAÇO	QUANTIDADES
1	SOLO
2	SOLO + 3% CAL+2% PÓ DE VIDRO
3	SOLO + 7% CAL+2% PÓ DE VIDRO
4	SOLO + 10% CAL+2% PÓ DE VIDRO
5	SOLO + 3% CAL + 5% PÓ DE VIDRO
6	SOLO + 7% CAL + 5% PÓ DE VIDRO
7	SOLO + 10% CAL + 5% PÓ DE VIDRO

Tabela 1 - Traço de cada amostra a ser analisada

Os corpos de prova foram moldados em tamanho de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura em três camadas com o auxílio de um cilindro. O tempo de cura úmida para os cp's será de 7 dias..

4.3. CURVA DE COMPACTAÇÃO

Para determinar a curva de compactação do solo, foram realizadas cinco misturas com diferentes proporções de solo e água. Para a execução do Ensaio de Compactação de Proctor, utilizou-se um molde de 10,106 cm de diâmetro e 944 cm³ de volume e um soquete de 2,5 Kg que cai em queda livre de 30,5 cm.

Cada mistura de solo com a quantidade de água específica é despejada no molde em três camadas, cada camada de solo é compactada com 25 golpes do soquete. Após as três camadas, pesa-se o molde, obtendo o peso do solo compactado (W) e por meio da Equação 1, o peso específico natural de compactação.

$$y = \frac{W}{V}$$

Equação 1 – Equação para obter o peso específico natural de compactação do solo¹

Sendo,

y = Peso específico natural de compactação

W = Peso do solo compactado no molde

V = Volume do molde

Sabendo-se o teor de umidade (*w*) que foi pré-determinado, utiliza-se a Equação 2 e obtém-se o peso específico seco (*yd*).

$$yd = \frac{y}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

Equação 2 – Equação para obter o peso específico seco do solo.¹

Sendo,

yd = Peso específico seco do solo

w(%) = Teor de umidade do solo em porcentagem

Esses valores são plotados em um gráfico *w x yd*, onde podemos encontrar os valores do peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo do solo. Com essas informações tem-se a equação que determinará as quantidades para a mistura de cada traço da análise.

4.4. ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Para a comparação dos efeitos da adição do pó de vidro e cal ao solo, serão realizados os ensaios por compressão simples e de resistência a tração por compressão diametral com o intuito de avaliar o ganho de resistência mecânica das misturas.

Todos os corpos de prova serão moldados com base no teor de umidade ótimo obtido na curva de compactação Proctor. De forma a tornar o estudo mais preciso, cada traço terá seis corpos, sendo três para a compressão simples e três para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, o resultado será a média aritmética dos três valores obtidos para cada ensaio. As amostras serão rompidas conforme o tempo de cura e seguindo as orientações normativas presentes na NBR 12770 para a compressão simples e NBR 7222 para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral (ABNT, 1992 ; ABNT, 2016)

4.4.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Antes da realização do ensaio, pesou-se cada corpo de prova para obter o teor de umidade de cada cp. Os cps foram colocados na prensa e o ensaio foi realizado à velocidade constante. O resultado encontra-se no item 5.1.

4.4.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Foram destinados três corpos de prova de cada traço para o ensaio de compressão simples. Antes de realizar o ensaio, pesou-se cada corpo de prova com o objetivo de obter o teor de umidade individual. Utilizou-se a velocidade recomendada de 0,5mm/min (DAS, 2007). Os resultados encontram-se no item 5.2.

5. RESULTADOS

5.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

O Ensaio de compressão simples ocorreu normalmente com os 42 cp's. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 2.

Tração por Compressão Simples			
Mistura	Tempo	Resistência (kPa)	Média (kPa)
Solo	1	946,809	934,451
	2	916,390	
	3	958,217	
	4	916,390	
Mistura 1 3%cal 2%vidro	1	927,797	890,723
	2	842,876	
	3	889,773	
	4	902,448	
Mistura 2 3%cal 5%vidro	1	818,794	824,181
	2	812,456	
	3	830,201	
	4	835,271	
Mistura 3 7%cal 2%vidro	1	1621,110	1708,883
	2	1744,056	
	3	1867,002	

	4	1603,366	
Mistura 4 7%cal 5%vidro	1	1877,142	1901,858
	2	1868,269	
	3	1921,504	
	4	1940,516	
Mistura 5 10%cal 2%vidro	1	2100,219	2118,597
	2	1927,841	
	3	2176,268	
	4	2270,061	
Mistura 6 10%cal 5%vidro	1	2443,707	2595,805
	2	2532,431	
	3	2604,677	
	4	2802,404	

Tabela 2 – Resultados ensaio de compressão simples.

Na Figura 2 pode-se observar o padrão de rompimentos nos corpos de prova quando submetidos à compressão simples. A ruptura tende a ser perpendicular ao plano de aplicação da força.

Figura 2 – Corpo de prova submetido ao ensaio de compressão simples



Após analisar comparativamente as médias obtidas do ensaio, pode-se observar que houve um ganho de resistência com o aumento da quantidade de Cal e Pó de Vidro. A diferença mais expressiva é entre a amostra de solo e as misturas 5 e 6.

5.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

O Ensaio de tração por compressão diametral ocorreu normalmente com os 42 cp's. Os resultados obtidos estão dispostos no Tabela 3.

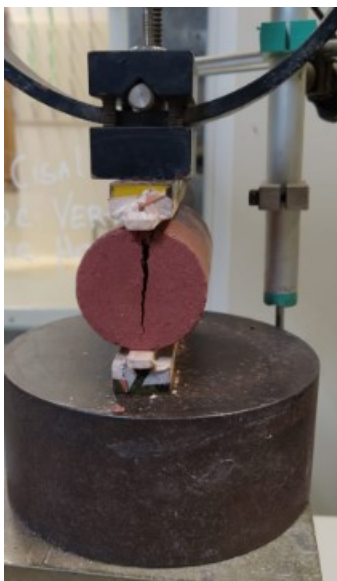
Tração por Compressão Diametral			
Mistura	Tempo	Resistência (kPa)	Média (kPa)
Solo	1	126,505	112,199
	2	97,335	
	3	106,434	

	4	118,522	
Mistura 1 3%cal 2%vidro	1	134,716	121,473
	2	108,259	
	3	118,978	
	4	123,940	
Mistura 2 3%cal 5%vidro	1	100,048	103,999
	2	110,692	
	3	105,015	
	4	100,241	
Mistura 3 7%cal 2%vidro	1	302,232	280,106
	2	243,863	
	3	286,765	
	4	287,565	
Mistura 4 7%cal 5%vidro	1	338,057	306,277
	2	311,025	
	3	319,030	
	4	256,997	
Mistura 5 10%cal 2%vidro	1	346,916	338,969
	2	354,932	
	3	323,685	
	4	330,341	
Mistura 6 10%cal 5%vidro	1	451,014	440,020
	2	464,209	
	3	467,923	
	4	376,935	

Tabela 3 – Resultados ensaio de compressão simples.

Na Figura 3 pode-se observar o padrão de rompimentos nos corpos de prova quando submetidos à compressão simples. A ruptura tende a ser perpendicular ao plano de aplicação da força.

Figura 3 – Corpo de prova submetido ao ensaio de tração por compressão diametral



Após analisar comparativamente as médias obtidas no ensaio, pode-se observar que houve um ganho de resistência com o aumento da quantidade de Cal e Pó de Vidro. A diferença mais expressiva é entre a amostra de solo e as misturas 6. Entre o Solo e as misturas 1, 2 e 3 não houve ganhos de resistências consideráveis, que poderiam ser relacionados a adição da cal ou do pó de vidro.

5.3. CONCLUSÃO

Os resultados foram obtidos através da média aritmética e da comparação numérica dos corpos de prova que ficaram 28 dias na câmara úmida. Nos ensaios de compressão simples observa-se um ganho de resistência a medida em que o teor de cal e pó de vidro aumentam, exceto para as misturas com 3% de Cal. A mistura com melhor desempenho mecânico, foi a amostra 6, como esperado. O mesmo ocorreu com os corpos de prova destinados ao ensaio de tração por compressão diametral, a mistura 6 obteve o melhor desempenho mecânico. E as misturas 1 e 2 não apresentaram diferenças consideráveis na resistência mecânica quando comparado ao solo.

Em relação ao solo, nos ensaios de compressão simples a mistura 3 apresentou um ganho de 83% de resistência, foi a primeira mistura com um ganho expressivo. Comparando o solo com a amostra 6, obteve-se um ganho de 178% de resistência mecânica. No ensaio de tração a compressão, a mistura 3 apresentou um ganho de resistência de 150%. Já a amostra com o valor mais elevado de resistência é a amostra 6 que possui 292% a mais de resistência em relação ao solo.

Portanto, a adição de cal e pó de vidro interferem mecanicamente no solo, porém o impacto será devido a proporção adotada, visto que o solo com 3% de cal não apresentou ganhos de resistência, diferentemente do solo com 10% de cal e 2% e 5% de pó de vidro.

6. REFERÊNCIAS

AFONSO, A. C. Análise do desempenho mecânico de uma mistura de solo argiloso e resíduo de vidro. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004, Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222. Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S. Estabilização de Solos. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, setembro de 2017.

CRUZ, M. L.; JALALI, S.. Melhoramento do Desempenho de Misturas de Solo-Cimento com Recurso a Activadores de Baixo Custo. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, Lisboa, Portugal, v. 120, n. 3, p. 49-64, nov. 2010. Disponível em: <https://www.abms.com.br/links/revistageotecnia/Revista120.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2021

DAS, Braja. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. São Paulo: Thomson, 2007.

FELIPE, R. S. Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba. Mineropar, Curitiba, 2011. Disponível em: < <http://www.documentador.pr.gov.br/documentador/pub.do?action=d&uuid=@gtf-escriba-mineropar@5b42cca2-9f9b-4f7e-80bf-3414773d7913#:~:text=Os%20sedimentos%20da%20Forma%C3%A7%C3%A3o%20Guabirotuba%20atin%2D%20gem%20espessuras%20na%20ordem,e%20arc%C3%B3sios%20de%20granulometria%20grosseira.> > Acesso em: 21 jul. 2021

KORMANN, A. Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: < <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-20072009-092526/pt-br.php> >. Acesso em: 13 de abr. 2021

MAKUSA. G. P. Soil stabilization methods and materials. State of the art review. Sweden: Lulea° University of Technology, 2013

MARQUES. G. O. Notas de aula da disciplina pavimentação. 1 ed. Universidade

Federal De Juiz De Fora, 2006. Disponível em: <
<https://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo.pdf>>
Acesso em: 05 mar. 2021.

MASSAZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C (Org.). Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4 ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2004. Disponível em: <
https://www.researchgate.net/publication/285467782_Aspects_of_the_pozzolanic_activity_and_properties_of_pozzolanic_cements> Acesso em: 23 abr. 2021

PAULA, T. M. Melhoria de solos: Adição de cimento, microssílica e cinza de casca de arroz em um silte orgânico. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R., EBERT, H. D.. Contribuição à geologia da bacia sedimentar de Curitiba (PR). Boletim Paranaense de Geociências, n. 47, p. 123-142, 1999

SALES, A. T. C. Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2006

SANTOS, M. N. Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra. Relatório de Iniciação Científica, PUC-RIO, 2012