



“TEN YEARS WORKING TOGETHER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”

Caracterização de misturas de solo e areia descartada de fundição

CARDOSO, S. M. ^a, MACEDO, G. A. ^a, SARRO, W. S. ^{a*}, FERREIRA, G. C. S. ^a,

SILVA, V. P. A. ^a, PEREIRA, R. S. ^a

^aFaculdade de Tecnologia - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo

*Corresponding author, welidasarro@gmail.com

Resumo

Com a atual urgência em aplicar os conceitos de sustentabilidade em todos os setores produtivos, a aplicação de resíduos em diversas áreas se faz necessário. Para suprir essa necessidade no setor de transportes, um dos resíduos com resultados promissores é a areia descartada de fundição (ADF), utilizada para a estabilização granulométrica de solos argilosos. Este trabalho experimental estudou misturas de solo+ADF com o objetivo de verificar características físicas e comportamento mecânico, com vistas à aplicação em camadas estruturais de pavimentos flexíveis. Para alcançar tais objetivos fez-se ensaios de granulometria, plasticidade, ultrassom e compressão axial não confinada. Concluiu-se que a incorporação de até 40% de ADF é indicada para compor as camadas de base e sub-base de pavimentação e que a técnica de ultrassom se mostra uma ferramenta promissora para controle tecnológico de solos compactados.

Palavras-chave: geotecnia, controle tecnológico, resíduos sólidos, sustentabilidade

1. Introdução

Com a atual urgência em aplicar os conceitos de sustentabilidade em todos os setores produtivos, é notório que o setor de pavimentação envolva dois fatores importantes, em que as ações sustentáveis são limitadas: o alto consumo de recursos naturais não renováveis e o impacto ambiental de implantação e construção (FERREIRA *et al.*, 2014). Para sanar tais fatores, há diversas propostas de utilizar resíduos sólidos de origem mineral para a estabilização granulométrica de solos, o que viabiliza sua aplicação em pavimentos. (FERREIRA *et al.*, 2013; TEIXEIRA, 2014)

Nesse contexto, se insere o passivo ambiental identificado como areia descartada de fundição (ADF), resíduo resultante da moldagem de peças metálicas e composto principalmente de mineral silicoso (CARNIN *et al.*, 2010). No Brasil, há uma produção de aproximadamente 3 milhões de toneladas a cada ano. As adições (orgânicas e inorgânicas), inseridas na areia para aumentar a coesão do material durante a fundição, dependem do tipo de peça a ser fabricada (KLINSKY, 2009). Por isso, há vários tipos de ADF, sendo que a identificada como “areia verde” e considerada com excelente resíduo para ser incorporado em produtos ou processos que necessitam de aprovação dos órgãos ambientais.

Segundo requisitos da ABNT NBR 10004 (2004) a ADF oriunda do processo verde é classificada como II-A, isto é, não perigosa e não inerte (DOMINGUES *et al.* 2016).

A partir do estudo de trabalhos dos principais autores deste assunto, identificou-se que o principal fator de influência no comportamento mecânico de misturas de solo+ADF é a umidade (Teixeira *et al.*, 2015). Portanto, este trabalho tem como principal objetivo avaliar a resistência mecânica de misturas de solo+ADF em função da variação de umidade destas misturas.

Para realizar a etapa experimental optou-se por dois tipos de ensaios (não destrutivos e destrutivos), respectivamente, ensaios de compressão axial não confinada e ensaios de ultrassom. O ensaio de ultrassom foi escolhido devido estudos realizados por diversos autores que comprovaram a eficiência do ensaio de ultrassom para realizar a caracterização de solos compactados e inspeção de construções em terra (MILANI, 2008; BANDEIRA, 2009; HOFFMANN E GONÇALVES, 2010; FERREIRA *et al.*, 2014; SARRO *et al.*, 2015; TEIXEIRA *et al.*, 2015). Tendo em vista que o bom desempenho do pavimento também depende do controle tecnológico dos materiais que o compõem, buscar novas técnicas de ensaio é de suma importância para a qualidade e desenvolvimento deste tipo de infraestrutura.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

A amostra de solo utilizada nesta pesquisa foi coletada no campus I da Unicamp em Limeira, SP, o qual foi classificado como laterítico argiloso (TEIXEIRA, 2014). A amostra de areia descartada de fundição (ADF) foi coletada em indústria do setor de fundição, localizada na região de Piracicaba, SP. Esta ADF, oriunda do processo "areia verde" foi classificada como II-A, segundo ensaios realizados em Laboratório acreditado (BIOAGRI, Piracicaba-SP) e critérios descritos na ABNT NBR 1004:2004.

Com esses materiais, foram compostos solos artificiais, a partir da substituição de solo por ADF nas porcentagens de 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%. Com isso, verificou-se os melhores teores de ADF, para estabilização granulométrica deste tipo de solo, considerando o comportamento mecânico. A caracterização física do solo, ADF e das misturas foi realizada a partir dos ensaios de granulometria (NBR 7181:2016), plasticidade (NBR 7180:2016) e índices físicos (NBR 6508:2008). Feito isso, foram moldados 28 corpos de prova cilíndricos (50 x 100 mm), na energia intermediária e umidade ótima de compactação (NBR 7182:2016), sendo 4 para cada teor de substituição.

2.2. Metodologia

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente durante 7 dias. Neste período, foram realizados ensaios de ultrassom aos 2, 3 e 7 dias, com o objetivo de definir correlações entre a umidade e velocidade do pulso ultrassônico (VPU). O tempo de pulso ultrassônico foi obtido com equipamento UsLab (Agricef, Brasil) e transdutores planos de ondas longitudinais de 45kHz de frequência, com o qual foi possível calcular a VPU (eq. 1).

$$VPU = \frac{L}{t} \times 10^6 \quad (1)$$

Onde:

VPU = Velocidade do pulso ultrassônico (m/s)

L = comprimento (mm)

t = tempo (μs)

No sétimo dia, todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples não confinada (NBR 12770:1992) com controle de umidade, isto é, definiu-se a umidade dos corpos de prova antes da ruptura. Nestes ensaios foi utilizada uma prensa elétrica microprocessada com capacidade máxima de 0,5 kN, com determinação do deslocamento (mm) e velocidade de aplicação de carga de 0,75mm/min.

3. Resultados

3.1. Caracterização Física

As amostras utilizadas nessa pesquisa foram classificadas por Teixeira (2014) em sua dissertação, a qual está inserida no mesmo laboratório em que este estudo foi realizado. De acordo com a distribuição granulométrica (Fig. 1), a amostra de solo natural é composta por 55% de argila, 22% de silte e 23% de areia. Já a amostra de ADF possui partículas com diâmetros entre 0,08 mm e 2 mm, indicando que a mesma é 100% arenosa, comportamento que corrobora com sua composição principal (sílica). As curvas granulométricas das misturas tiveram o comportamento esperado, visto que o objetivo da estabilização granulométrica era uma gama de materiais com composições variadas.

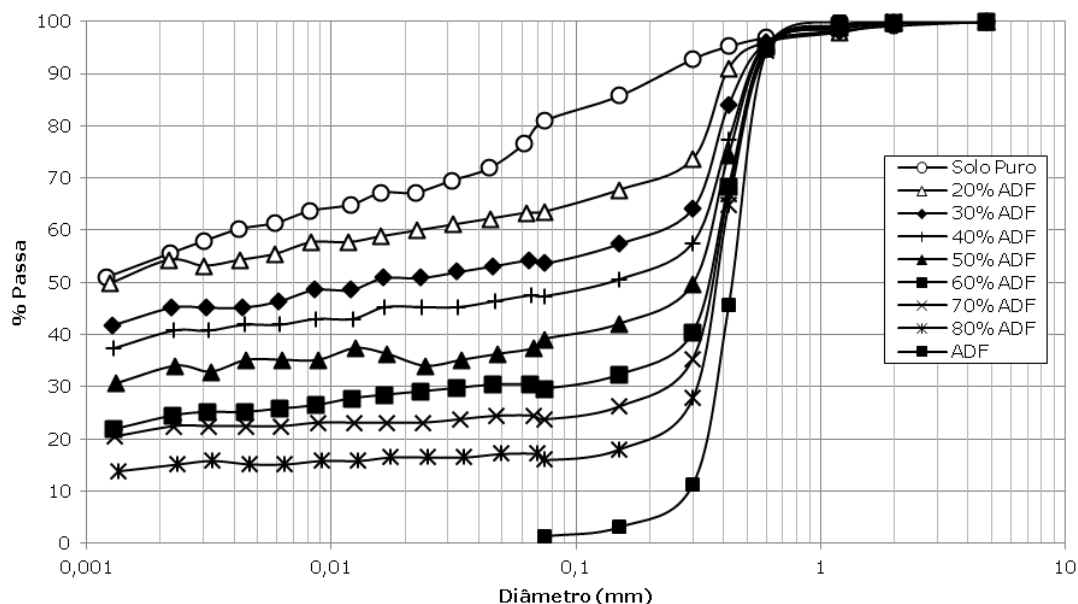


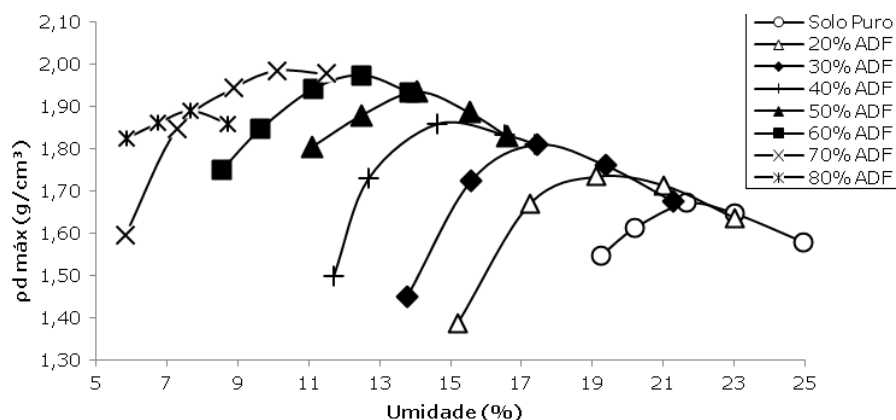
Fig. 1 Distribuição granulométrica das misturas (Teixeira, 2014)

Também deve-se ressaltar que os resultados de índice de plasticidade dispostos na Tab.1 confirmam a estabilização granulométrica, visto que em relação ao solo puro os valores de massa específica, limite de liquidez e plasticidade apresentaram redução com o aumento de partículas granulares.

Tab. 1 Massa Específica e Índices de Plasticidade.

Material	ρ_s (g/cm ³)	LL	LP	IP
Solo Natural	2,79	41	31	10
ADF	2,68	-	-	-
20% ADF	2,71	34	25	9
30% ADF	2,71	32	24	8
40% ADF	2,70	29	20	9
50% ADF	2,71	28	19	9
60% ADF	2,70	22	17	5
70% ADF	2,69	19	13	6
80% ADF	2,69	-	-	-

Os resultados dos ensaios de compactação, método Proctor na energia intermediária (Fig. 2), indicaram uma redução da umidade ótima e aumento da massa específica seca máxima com o aumento do teor de ADF. Esse comportamento era esperado, visto que o objetivo da estabilização granulométrica é proporcionar uma melhor interação dos grãos, sendo possível apenas quando as partículas dos materiais não são uniformes.

**Fig. 2.** Curva de compactação das misturas (Teixeira, 2014)

3.2. Ensaio Ultrassom

A fig. 3 apresenta o comportamento da VPU nos corpos de prova conforme o teor de ADF e tempo de moldagem. Verifica-se que após 7 dias, a VPU já estabilizou, o que pode auxiliar positivamente no controle tecnológico de camadas de pavimento. Isso se deve ao fato dos corpos de prova irem perdendo a umidade de lubrificação dos grãos, fazendo com que a onda ultrassônica percorra o material sem sofrer atenuação, já que a onda acústica se propaga melhor em meios sólidos em relação aos líquidos (TEIXEIRA *et al.*, 2015). Também é possível identificar o aumento da VPU com o aumento do teor de ADF, que ocorre principalmente pela diminuição da umidade de compactação. Entretanto, após a perda de umidade desse material, há um aumento da porosidade, o que pode provocar uma redução da resistência mecânica.

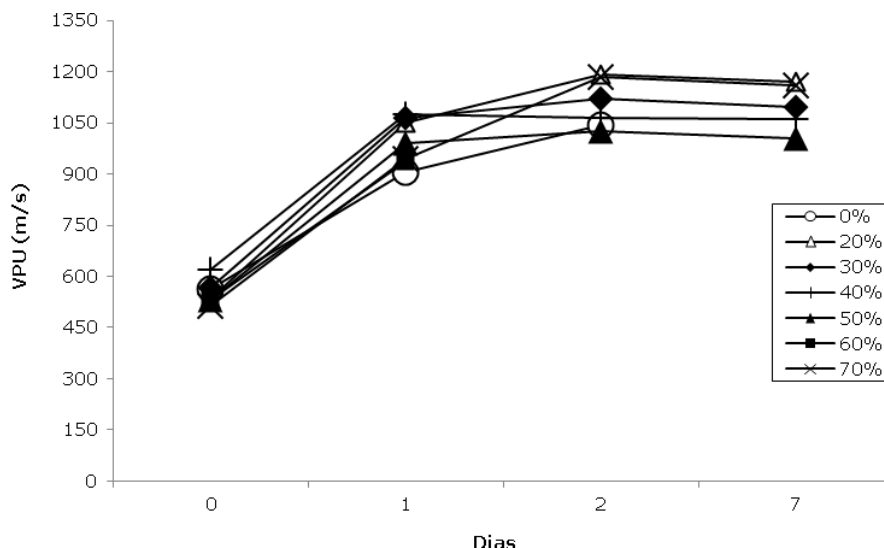


Fig. 3. Acompanhamento da velocidade

3.3. Caracterização Mecânica

O ensaio de resistência à compressão não-confinada não é o ensaio indicado para esse material, pois a coesão é diminuída conforme o teor de areia é aumentado. Ainda assim, por existirem pesquisas com resultados positivos como a de Cardoso (2013) e Teixeira *et al.* (2015), optou-se por avaliar a possível correlação desse parâmetro com a VPU.

Conforme demonstrado na Fig. 4, a resistência à compressão foi decrescente à medida que o teor de ADF aumentou, exceto para o teor de 40%. Esse comportamento foi semelhante ao encontrado por Teixeira (2014) e Teixeira *et al.* (2015). Verifica-se que o teor de 40% de ADF representa exatamente o ponto limite, onde ocorrem alterações contraditórias em relação à VPU e resistência. A VPU que diminui inversamente proporcional ao aumento do teor de ADF, neste teor se mantém igual ao teor de 30% e depois reduz bruscamente. Já a resistência à compressão diminui no teor de 40% e 50% e depois aumenta significativamente nos teores de 60% e 70%, apresentando valores praticamente iguais aos teores de 20% e 30% de ADF. A condição decrescente da resistência ocorre devido à diminuição da coesão da mistura, propriedade exclusiva das argilas, cujo teor diminuiu com o aumento de ADF. Mas nos teores de 60% e 70% ocorre o inverso e a resistência à compressão aumenta novamente. Para entender este comportamento são necessários ensaios sobre as alterações microestruturais destas misturas.

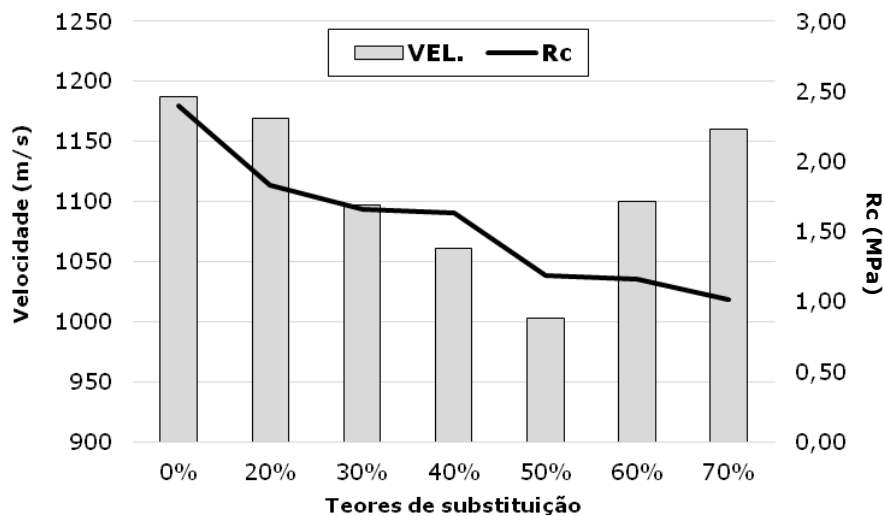


Fig. 4 Relação entre velocidade e resistência à compressão

Ao considerar que o objetivo da estabilização granulométrica do solo com ADF é justamente obter um material bem graduado, com porcentagens de materiais finos e granulares que permitissem um melhor entrosamento dos grãos durante a compactação, esse processo ocorre tanto para os teores de 20% e 30%, quanto para os teores de 60% e 70%. Ainda assim, melhor interação não indica maior rigidez, fator que contribui para a resistência mecânica.

A fig. 5 apresenta os resultados da umidade do solo (na data de ruptura) e resistência à compressão, em relação ao teor de ADF. Ao observar a figura identifica-se que o solo precisou de praticamente o dobro de umidade, comparado à mistura de solo+70%, para ser compactado. Com o aumento do teor de ADF houve uma perda gradativa da umidade. Essa fig. mantém a discussão descrita na fig. 4, ou seja, são necessários ensaios microestruturais e também de porosidade para entender o comportamento das misturas de solo+ADF.

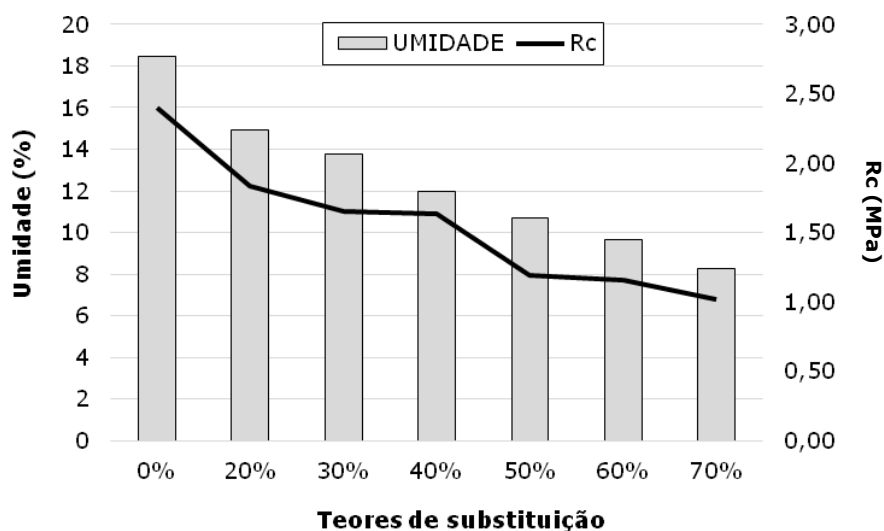


Fig. 5 Relação entre a umidade e à resistência a compressão

Teixeira *et al.* (2012), Teixeira (2014), Klinsky e Fabbri (2014) e Ferreira *et al.* (2016) também caracterizaram de forma mecânica misturas de solo+ADF, porém, mas com ensaios confinados (ISC-CBR). Estes autores identificaram melhores resultados mecânicos para misturas com 60% e 70% ADF, o que não corrobora os resultados desta pesquisa. Portanto, o tipo de ensaio também pode influir diretamente nos resultados.

4. Conclusões

A utilização da ADF para a estabilização granulométrica de solos argilosos é válida, pois com isso foi possível obter parâmetros físicos indicados para material de pavimentação. O teor de 40% de ADF é o máximo indicado para a amostra estudada neste trabalho, comparando os seus resultados com o solo puro. A técnica de ultrassom é uma ferramenta eficiente para auxiliar no controle tecnológico de solos compactados, entretanto, são necessários mais estudos para identificar os principais fatores que interferem na VPU em solo. Além disso, são necessários mais ensaios para avaliar a influência da microestrutura e energia de compactação.

Referências

ABNT – NBR 10004 – 2004. Resíduos Sólidos - Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT – NBR 12770 – 1992. Solo coesivo: determinação da resistência à compressão não confinada. Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro.

ABNT – NBR 6508 – 2008. Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – determinação de massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT – NBR 7180 – 2016. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT – NBR 7181 – 2016. Análise granulométrica de solos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT – NBR 7182 – 2016. Solo - Ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

Bandeira, R. F. 2009. Estudo da correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica para um material terroso. Dissertação de Mestrado. - Belo Horizonte: Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais.

Bucur, V. 2006. Acoustics of Wood. New York: Editora Springer Verlage.

Cardoso, S. M. 2013. Determinação da resistência à compressão de misturas de solo+ADF compactadas com energia intermediária a partir de ensaios não destrutivos e destrutivos.

Carnin, R. L. P. , Silva , C.O. , Pozzi , R. J. , Cardoso Jr., D. , & Foguer , M. V. 2010. Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. Pavimentação. Ano V, 56 - 67.3

Dijk, R. V.; Gonçalves, R.; Bertoldo, C. 2014. Inspeção de Madeira de Demolição utilizando ultrassom. In: Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos (CONAEND), São Paulo. Anais do CONAEND&IEV2014. São Paulo: ABENDI. v. 1.

Domingues, L. G. F; PIRES, M. G. S. ; FERREIRA, G. C. S. ; TEIXEIRA, I. ; SARRO, W. S. ; CARNIN, R. 2016. Caracterização Ambiental de Areias Descartadas de Fundição utilizadas na Cobertura

de Resíduos em Aterros Sanitários. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 2016, Natal, RN.

Ferreira, G. C. S.; Domingues, L. G. F. ; Teixeira, I. 2013. Viabilidade Ambiental da Aplicação de Areia Descartada de Fundição (ADF) na Estabilização Granulométrica de Solo laterítico argiloso. In: 16º Congresso de Fundição - CONAF, São Paulo. Livreto de Resumos - 16º Congresso de Fundição (CONAF 2013), p. 26-27.

Ferreira, G. C. S.; Domingues, L. G. F.; Teixeira, I.; Pires, M. G. S. 2014. Viabilidade técnica e ambiental de misturas de solo com areia descartada de fundição. Transportes V. 22, N. 2.

Ferreira, G. C. S.; Sarro, W. S.; Hoffman, M.; Gonçalves, R. 2014. Influência das camadas de compactação em inspeções de painéis monolíticos de solo-cimento por ultrassom. In: 18º Congresso Nacional de Ensaio Não destrutivos e de Inspeção, São Paulo, SP: ABENDI, v. 1. p. 1-10.

Ferreira, G. C. S.; Teixeira, I.; Itoman, E. H.; Silva, J. G.; Sarro, W. S.; Domingues, L. G. F. 2016. Comportamento de misturas de solo e areia descartada de fundição nas camadas estruturais de pavimentos flexíveis. II Congresso Luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis. 2016, João Pessoa – PB, 7p.

Giacon JR., M.; Gonçalves, R.; Amalfi, G.; Soriano, J. 2010. Coeficiente de Poisson do concreto determinado por meio de ensaio de ultrassom. In: Congresso Latino americano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, Vitória. Anais do CLIA 2010. Jaboticabal: SBEA, 2010. v. 1. p. 1-10.

Gonçalves, R.; Dijk, R. V.; Bertoldo, C. 2014. Influência da frequência e da distância entre transdutores na velocidade de propagação de ondas obtida em ensaios indiretos durante inspeções de peças estruturais de madeira. In: Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos (CONAEND), São Paulo. Anais do CONAEND&IEV2014. São Paulo: ABENDI, v. 1.

Hoffman, V. M. Gonçalves, R. 2010. Análise da qualidade da taipa de pilão por meio de ondas ultrassônicas. - Campo Grande, UFMS: [s.n.].

Klinsky, L.M.G. & Fabbri, G.T.P. 2009. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Revista Transportes, XVII, p.36-45.

Klinsky, L. M. G.; Bardini, V. S. S.; Fabbri, G. T. P. 2014. Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos argilosos no módulo de resiliência. Revista Transportes 22 (2).

Milani, A. P. S. 2008. Avaliação física, mecânica e térmica do material solo cimento cinza casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica (Tese Doutorado). - Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

Sarro, W. S.; Ferreira, G. C. S.; Galletto, A. 2015. Técnica de ultrassom aplicada na inspeção de edificações construídas em solo compactado. In 57º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon. ISSN:2175-8182, Bonito – MS.

Teixeira, I. 2014. Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

Teixeira, I., Takeda, M. C., Ferreira, G. C. S. e Paiva, C. E. L. 2012. Estabilização Granulométrica de um Solo Laterítico Argiloso através da Incorporação de Areia Descartada de Fundição – ADF. In: XXVI Congresso Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes, ANPET, Joinville, SC, 11p

Teixeira, I.; Sarro, W. S.; Cardoso, S. M.; Assis, G. M.; Ferreira, G. C. S. 2015. Influência da Granulometria e da Umidades nas propriedades de Solos a partir de Ensaio Destrutivos e Não Destrutivos. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes da ANPET.