

**AVALIAÇÃO DE MATERIAIS BRITADOS E RESÍDUO AREIA DE
FUNDIÇÃO PARA APLICAÇÃO EM BASE DE PAVIMENTOS NO ALTO
URUGUAI GAÚCHO**

Manuella de Moraes

Mestranda no Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade
Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
manuellademoraes@gmail.com

Joice Batista Reis

Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira
Sul - Campus Erechim
joice.jbr.reis@gmail.com

Rafaela Pollon

Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira
Sul - Campus Erechim
rafaelapollon1997@gmail.com

William M. Kubiaki Levandoski

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira
Sul - Campus Erechim
williankubi@gmail.com

Hevelin Pagliarini

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira
Sul - Campus Erechim
hevelin.p@outlook.com

Rafael Pazza

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira
Sul - Campus Erechim
rafael.pazza34@gmail.com

Pedro Eugenio Gomes Boehl, Me.

Professor do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul
- Campus Erechim
pedro.boehl@uffs.edu.br

Mauro Leandro Menegotto, Dr.

Professor do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul
- Campus Chapecó
mauromenegotto@gmail.com

Francisco Dalla Rosa, PhD

Professor do curso de Engenharia Civil e Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental da Universidade de Passo Fundo - Campus Passo Fundo
dallarosa@upf.br

Eduardo Pavan Korf, Dr.

Professor do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária e Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
eduardo.korf@uffs.edu.br

Resumo. *As indústrias brasileiras possuem papel fundamental na economia do país. Contudo a geração de resíduos nos diferentes setores é significativa, motivando elevada preocupação ambiental. Os produtos fundidos se enquadram nesta perspectiva, gerando elevados volumes de resíduos destinados a aterros sanitários. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo fomentar uma aplicação econômica e ambientalmente viável para o resíduo areia descartada de fundição de uma indústria da cidade de Erechim-RS, propondo a incorporação da mesma em misturas destinadas à pavimentação rodoviária. O resíduo e os materiais convencionalmente usados foram caracterizados por meio de análises da composição granulométrica, bem como, quanto ao teor de materiais pulverulentos. Estes dados nortearam a composição de misturas, sendo que estas, quando fixados teores de 30% de brita e 20% de pedrisco, puderam comportar teores de 20% a 45% de areia descartada de fundição (ADF), satisfazendo parcialmente as especificações de faixas granulométricas estabelecidas pelo órgão fiscalizador, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).*

Palavras-chave: *Areia descartada de fundição. Base rodoviária. Composição granulométrica.*

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Censo Mundial de Produção de Fundidos, estima-se que o Brasil, no ano de 2016, produziu cerca de 2,1 milhões de toneladas de materiais fundidos, ocupando a 9ª posição no ranking de produção mundial (MODERN CASTING, 2017). Apesar da relevância para a economia do país, a indústria de produtos fundidos mostra-se igualmente importante quanto a preocupações ambientais, sobretudo com os resíduos provenientes dessa atividade, que no ano de 2012, gerou cerca de

3 milhões de toneladas de areias descartada de fundição (ADF) (NETO; FABBRI, 2004).

A areia descartada de fundição, também conhecida como de areia verde, consiste em uma mistura de areia, aglomerantes e aditivos, empregados como material de fabricação dos moldes para a produção das peças metálicas (KLINSKY et al., 2012). Essa mistura é reintroduzida diversas vezes no processo de fabricação dos moldes até que suas características estejam defasadas, quando então, são descartadas na forma de resíduos (ARULRAJAH et al., 2017).

Devido às características da ADF, que segundo a NBR 10.004 encontra-se na Classe II-A, ou seja, não inerte, este material deve ser destinado para aterros industriais (ABNT, 2004). Entretanto, tal opção tem se tornado inviável em decorrência dos custos elevados para disposição final, da rápida redução da vida útil dos aterros e dos passivos ambientais gerados, em face ao expressivo montante de resíduo produzido (FERREIRA et al., 2014).

De modo a propiciar uma destinação técnica, econômica e ambientalmente viável para a ADF, inúmeros estudos vêm sendo conduzidos no Brasil e no exterior, investigando o comportamento de materiais ante sua incorporação. Dentre as alternativas de seu reaproveitamento, autores como Guney, Aydilek e Demirkan (2006) enfatizam seu emprego como substituto parcial ou integral de materiais tradicionalmente usados em obras da construção civil, sobretudo em pavimentos.

Klinsky e Fabbri (2009) e Ferreira et al. (2014) verificaram que a adição de até 70% de ADF na estabilização granulométrica de solos lateríticos argilosos foi adequada para uso em sub-bases de pavimentos flexíveis. Já Guney, Aydilek e Demirkan (2006) evidenciaram que a areia de fundição, preparada com teores de 5,5% de cimento pode ser aplicada como substituta total dos agregados naturais na construção de uma camada de sub-base de pavimento, valor muito próximo ao obtido por

Yazoghli-Marzouk et al. (2014), que verificou teores de 5,0% para cimento.

Uma vez que a construção de pavimentos rodoviários demanda de um acentuado volume de materiais, custos com transporte destes podem impactar negativamente a execução dessas obras. Por este motivo, apesar de muitos estudos apontarem a viabilidade (ambiental, técnica e econômica) do uso da areia descartada de fundição como material para a confecção de bases e sub-bases de pavimentos, faz-se necessário entender sua aptidão para integrar misturas com materiais disponíveis na região da obra.

Por este motivo, este trabalho visa caracterizar preliminarmente os materiais britados utilizados para pavimentação no município de Erechim-RS, bem como, uma areia descartada de fundição, visando verificar sua aptidão para compor misturas a serem aplicadas em bases de pavimentos rodoviários na região do Alto Uruguai Gaúcho.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Coleta, preparação e caracterização dos materiais britados e da ADF

Os três tipos de materiais britados, previamente denominados brita $\frac{3}{4}$, pedrisco e pó de brita, foram coletados no britador do município de Erechim-RS, o qual faz uso destes materiais para a construção de estradas. A ADF foi coletada em uma indústria metalúrgica de Erechim - RS. Para todos os materiais, as respectivas massas a serem coletadas foram determinadas segundo os procedimentos descritos na norma DNER-PRO 120/97, tomadas em vários pontos das pilhas submetidas à amostragem, a fim de representar a natureza e as condições reais dos materiais (DNER, 1997).

A separação dos materiais para realização dos respectivos ensaios se deu por meio de quarteamento conforme DNER-PRO 199 (DNER, 1996). Como os materiais foram coletados úmidos (para evitar a segregação da parte pulverulenta), o preparo de amostras se

sucedeu por meio de secagem em estufa, utilizando temperatura de aproximadamente $110^{\circ}\text{C} \pm 5$, por um período de 24 horas, de acordo com a DNER-ME 083/98 (DNER, 1996).

A análise granulométrica dos materiais britados e da ADF foi realizada com auxílio de agitador mecânico, respeitando-se o limite de 0,3% de diferença entre a massa introduzida inicialmente no conjunto de peneiras e a soma de todas as massas retidas ao final do experimento, seguindo a DNER-ME 083/98 (DNER, 1996).

Fatores como a agitação e as características físicas do próprio material, podem propiciar uma infidelidade do percentual presente de grãos passantes na peneira de abertura 0,075mm. Por esse motivo, foi realizada a determinação do teor de materiais pulverulentos para os três materiais britados e para a ADF, segundo a norma DNER-ME 266/97 (DNER, 1997).

2.2 Projetos de misturas para compor base de pavimentos rodoviários

Segundo o DNIT (2010), para a utilização de solos na confecção de bases rodoviárias por meio de procedimentos de estabilização granulométrica, estes devem atender faixas de granulometria em proporções específicas de agregados grossos, médios e finos, combinadas entre si, de modo a atender uma das seis faixas de distribuição granulométricas, apresentadas na Tabela 1. A faixa a ser selecionada para o projeto é determinada de acordo com o número equivalente N de operações de um eixo padrão, durante o período de projeto escolhido.

As misturas foram projetadas por meio de metodologia de tentativas, fazendo uso das determinações granulométricas realizadas para cada um dos materiais. Foram então analisados os limites de adição de materiais tradicionais, passíveis de restringir a adição da ADF em decorrência da adequação às faixas granulométricas especificadas pelo órgão fiscalizador.

Tabela 1. Faixas granulométricas para material de base de pavimentos (DNIT, 2010).

| Tipos Abertura da malha (mm) | N > 5 x 10 ⁶ | | | | N < 5 x 10 ⁶ | | Tolerância da faixa de projeto |
|---------------------------------|-------------------------|-------|-------|--------|-------------------------|--------|--------------------------------|
| | A | B | C | D | E | F | |
| | % em peso passando | | | | | | |
| 50 | 100 | 100 | - | - | - | - | ±7 |
| 25 | - | 75-90 | 100 | 100 | 100 | 100 | ±7 |
| 9,5 | 30-65 | 40-75 | 50-85 | 60-100 | - | - | ±7 |
| 4,75 | 25-55 | 30-60 | 35-65 | 50-85 | 55-100 | 10-100 | ±5 |
| 2,0 | 15-40 | 20-45 | 25-50 | 40-70 | 40-100 | 55-100 | ±5 |
| 0,425 | 8-20 | 15-30 | 15-30 | 25-45 | 20-50 | 30-70 | ±2 |
| 0,075 | 2-8 | 5-15 | 5-15 | 10-25 | 6-20 | 8-25 | ±2 |

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio do ensaio de caracterização granulométrica, realizado para os três materiais britados e para a areia descartada de fundição, foram obtidas as respectivas curvas de distribuição granulométrica, apresentadas na Fig. 1. Pode-se verificar por meio das curvas granulométricas que os quatro materiais possuem o predomínio de diferentes diâmetros de partículas.

No caso da brita ¾ e do pedrisco, estes podem ser classificados como agregados graúdos (DNER, 1997a). A brita, é composta majoritariamente pela fração pedregulho grosso (partículas de diâmetro de 20 a 60 mm), representando aproximadamente 50% do material, enquanto o pedrisco possui cerca 84,5% do material correspondente da fração de pedregulho médio (partículas de diâmetro de 6,0 a 20 mm) (ABNT, 1995).

O pó de brita e a ADF, são classificados como agregados miúdos (DNER, 1997b). Cerca de 49,34% do material presente no pó de brita corresponde à fração de areia grossa (partículas de diâmetro 0,60 a 2,0 mm) e a

ADF, possui em sua composição, aproximadamente 62,3% de sua fração correspondente à areia média (partículas de diâmetro de 0,2 a 0,6 mm) (ABNT, 1995).

Além disso, utilizando-se as curvas granulométricas pode-se determinar o coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (Cc), apresentados na Tabela 2.

Segundo Caputo (1988), o coeficiente de uniformidade representa a distribuição do tamanho das partículas. Para solos uniformes, tem-se $Cu < 5$, indicando que a maioria dos grãos apresentam, aproximadamente, os mesmos diâmetros. Sendo assim, verifica-se que somente o pó de pedra não é considerado uniforme, sendo denominado medianamente uniforme ($5 > Cu > 15$).

O coeficiente de curvatura indica como se comporta a graduação do solo, ou seja, permite identificar discontinuidades no conjunto. Valores como $1 < Cc < 3$ indicam solos bem graduados, o que pode ser verificado para os três materiais britados analisados, enquanto a ADF, com $Cc < 1$, é classificada como um solo mal graduado (CAPUTO, 1988).

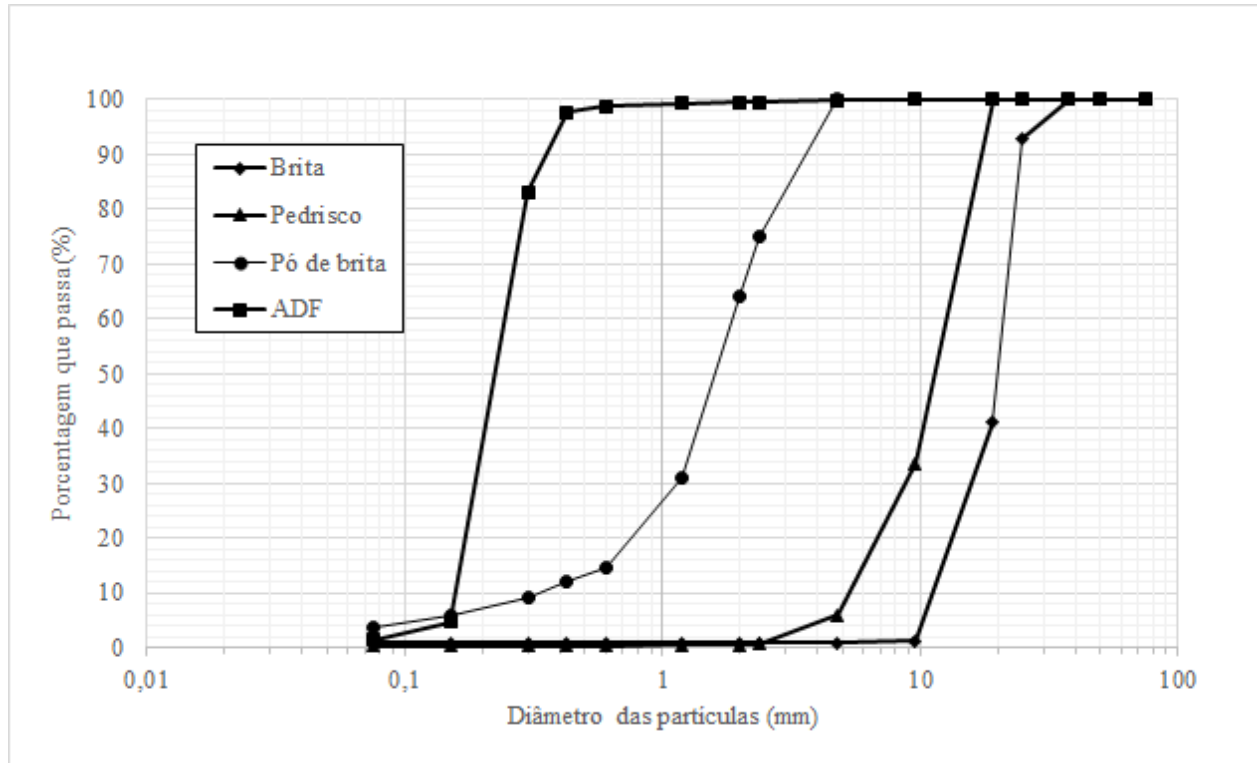


Figura 1. Distribuição granulométrica da brita, pedrisco, pó de brita e ADF

Tabela 2. Coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (Cc) dos diferentes materiais.

| | Brita | Pedrisco | Pó de brita | ADF |
|----|-------|----------|-------------|------|
| Cu | 1,10 | 2,02 | 5,59 | 1,50 |
| Cc | 1,00 | 1,47 | 2,19 | 0,94 |

A determinação dos coeficientes de curvatura e de uniformidade dos materiais se faz importante quando se pensa no processo construtivo do pavimento, a estabilização granulométrica. Esse processo consiste na melhoria da capacidade de resistência, estabilidade e durabilidade dos materiais *in natura*, sendo realizada por meio da mistura de dois ou mais solos, conferindo uma distribuição granulométrica bem graduada, com preenchimento de vazios e contato grão a grão garantido (BERNUCCI et al., 2008; DNIT, 2010).

Sendo assim, se faz necessário a presença de frações de cada um dos materiais, visando alcançar as características requeridas para a mistura.

A partir daí, deu-se início a determinação dos possíveis teores de ADF a serem adicionados na mistura, levando em conta a faixa D da especificação normativa dos materiais, apresentada pela norma DNIT-ES 141/10 (DNIT, 2010).

Se faz importante ressaltar que os teores de brita e pedrisco, por tratarem-se de agregados graúdos, não possuem

expressividade de materiais com a mesma fração granulométrica correspondente à ADF. Sendo assim, mantiveram-se fixos os teores desses dois materiais e analisou-se as interações entre teores de ADF e pó de brita.

Na Tabela 3 está apresentada a faixa granulométrica D, especificada pelo DNIT, juntamente com as faixas granulométricas de cada uma das 6 misturas projetadas.

Tabela 3. Faixas granulométricas dos projetos de misturas

| Abertura da malha (mm) | Especificação DNIT – Faixa D | Tolerância | Misturas | | | | | |
|------------------------|------------------------------|------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
| % em peso passando | | | | | | | | |
| 50 | - | ±7 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 25 | 100 | ±7 | 97,90 | 97,90 | 97,90 | 97,90 | 97,90 | 97,90 |
| 9,5 | 60-100 | ±7 | 57,09 | 57,09 | 57,09 | 57,09 | 57,09 | 57,09 |
| 4,75 | 50-85 | ±5 | 51,47 | 51,46 | 51,45 | 51,44 | 51,44 | 51,43 |
| 2,0 | 40-70 | ±5 | 39,48 | 41,25 | 43,02 | 44,79 | 46,56 | 48,33 |
| 0,425 | 25-45 | ±2 | 23,49 | 27,78 | 32,07 | 36,36 | 40,65 | 44,94 |
| 0,075 | 10-25 | ±2 | 1,70 | 1,59 | 1,48 | 1,37 | 1,26 | 1,15 |

Os seis projetos de misturas possuem os teores de brita e pedrisco fixos, 30% e 20%, respectivamente. Já os teores de pó de brita e ADF, foram sendo variados associadamente, de 5 em 5%, de modo que a soma dos teores dos respectivos materiais fosse 50%. Dessa forma, os teores de ADF a serem adicionadas na mistura, variaram de 20% a 45%, uma vez que, considerando a especificação da faixa granulométrica, assumindo o percentual de tolerância, os teores de ADF são limitados a 47% (limite superior) e 20% (limite inferior).

Ainda assim, observa-se que os projetos de mistura, determinados com base na caracterização granulométrica por peneiramento, não satisfazem o critério do órgão fiscalizador quanto à presença de materiais que passam na peneira de abertura 0,075mm.

É importante destacar que percentual de material contabilizado como <0,075mm na Tabela 3, para cada uma das misturas, refere-se ao montante de amostra retida no fundo do conjunto de peneiras no ensaio de caracterização granulométrica. A brita, o

pedrisco, o pó de brita e a ADF apresentaram, na determinação de materiais pulverulentos, teores de 1,22%, 1,23%, 9,80% e 4,04%, respectivamente, muito superiores ao determinado na caracterização granulométrica. Sendo assim, é possível constatar que haverá incremento no percentual de material presente nesta faixa granulométrica.

Ainda assim, sugere-se a realização de ensaios granulométricos por sedimentação, visando determinar o percentual materiais correspondentes a fração argila, uma vez que este tipo de material, sob a ação de intemperismos, pode apresentar deformações estruturais que serão transmitidas ao pavimento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou uma avaliação do potencial da areia descartada de fundição (ADF) em integrar misturas com três materiais britados (brita ¾, pedrisco e pó de brita), visando a aplicação para a construção de bases de rodovias. Foram projetadas misturas com

50% do material equivalente a agregados graúdos, mantidas as proporções de 30% brita ¾ e 20% pedrisco. Para os outros 50% da mistura, verificou-se que a ADF pode ser utilizada nas misturas em teores de 20 a 45%, em substituição ao pó de brita, satisfazendo parcialmente a especificação da faixa granulométrica D, da norma DNIT - ES 141/10.

Pode-se observar que para atender completamente os requisitos da norma, as misturas projetadas requerem a presença de material passante na peneira de abertura 0,075mm, não podendo este ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira de malha 0,425mm. Entretanto, percebe-se, por meio da determinação de material pulverulento (partículas de diâmetro <0,075mm), que parte deste percentual é contabilizado, em massa, em outras aberturas de peneiras devido a ineficiência da agitação em separar esta fração de material. Portanto, deve-se considerar a determinação do teor de materiais pulverulentos no projeto de mistura.

Ademais, faz-se necessário verificar se os atributos técnicos conferidos a essa estrutura, mediante o emprego da areia de fundição como agregado em suas diferentes camadas constituintes, satisfazem os critérios de desempenho mínimo para este material.

5. REFERÊNCIAS

ARULRAJAH, Arul et al. **Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation.** Sustainable Cities and Society, v. 28, p. 343–349, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.009>>

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: **Resíduos sólidos – classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 6502: Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

BERNUCCI, L. L. B., et al. Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. 1ªed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A., 2008.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos.** 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.a., 1988.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). DNIT-ES 141/10: **Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente.** Rio de Janeiro: IPR, 2010.

FERREIRA, Gisleiva Cristina dos Santos et al. Viabilidade técnica e ambiental de misturas de solo com areia descartada de fundição. **Revista Transportes**, v. 22, n. 2, p. 62–69, 2014.

GUNEY, Yucel; AYDILEK, Ahmet H.; DEMIRKAN, M. Melih. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. **Waste Management**, v. 26, n. 9, p. 932–945, 2006.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1998). DNER-ME 083/98: **Agregados - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro: IPR, 1998.

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1996). DNER-PRO 199/96: **Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.** Rio de Janeiro: IPR, 1996.

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997). DNER-PRO 120/97: **Coletas de amostras de agregados.** Rio de Janeiro: IPR, 1997.

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997). DNER-EM 037/97a: **Agregado graúdo para concreto de cimento.** Rio de Janeiro: IPR, 1997.

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997b). DNER-PRO 038/97:

Agregado miúdo para concreto de cimento.
Rio de Janeiro: IPR, 1997.

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997). DNER-ME 266/97: **Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos.** Rio de Janeiro: IPR, 1997.

MODERN CASTING. **Schaumburg: American Foundry Society**, v. 107, n. 12, dez. 2017. Mensal. Disponível em: <http://content.digitalpub.blue-soho.com/web/y5b2/0A1snzj/ModernCastingDec2017/html/index.html?page=6&origin=reader>. Acesso em: 16 jun. 2018.

KLINSKY, Luiz Miguel Gutiérrez et al. **Reaproveitamento de areia de fundição residual em misturas de areia asfalto usinada a quente.** Transportes, p. 27–34, 2012.

KLINSKY, Luís Miguel Gutierrez; FABBRI, Glauco Tulio Pessa. **Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis.** Revista Transportes, v. XVII, p. 36–45, 2009.

NETO, Benedito Coutinho; FABBRI, G. T. P. **Avaliação da reutilização da areia de fundição em misturas asfálticas densas do tipo CAUQ.** Revista Transportes, 2004.

YAZOGHLI-MARZOUK, O. et al. Recycling foundry sand in road construction-field assessment. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 69–78, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.055>