

Estudo sobre a utilização de Resíduo de Minério de Ferro em microrrevestimento asfáltico

Freddy Richard Apaza¹, Antonio Carlos Rodrigues Guimarães², Mayssa Alves da Silva Sousa³, Carmen Dias Castro⁴

¹Instituto Militar de Engenharia – IME, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, apazafred@gmail.com

²Instituto Militar de Engenharia – IME, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, guimaraes@ime.eb.br

³Instituto Militar de Engenharia – IME, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, mayssa.jc_123@hotmail.com

⁴Instituto Militar de Engenharia – IME, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, carmendc14@gmail.com

Recebido:

27 de setembro de 2016

Aceito para publicação:

30 de novembro de 2016

Publicado:

31 de agosto de 2018

Editor de área:

Francisco Thiago Aragão

Palavras-chaves:

Microrrevestimento,
Resíduo de minério de ferro,
Agregados alternativos.

Keywords:

Micro-Surfacing,
Iron Ore Residue,
Alternative Aggregates.

DOI:10.14295/transportes.v26i2.1254

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica de agregados pétreos e do resíduo proveniente do beneficiamento do minério de ferro, da cidade de Mariana/MG, bem como a caracterização física e mecânica de traços de Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF), considerando a incorporação do resíduo de ferro como agregado miúdo, tendo-se como referência as normas técnicas vigentes. Esse tipo de revestimento é aplicado, geralmente, em rodovias com alto volume de tráfego, as quais, durante a manutenção, requerem a liberação imediata das vias. O uso do resíduo em MRAF é importante, pois reduz o passivo ambiental das barragens de rejeitos e viabiliza o uso de materiais alternativos, agregando ao pavimento desempenho mecânico satisfatório e promovendo redução de custos. A análise química e ambiental do resíduo mostrou que ele se classifica como não perigoso e inerte. O comportamento mecânico dos corpos de prova de MRAF contendo agregado do resíduo de ferro mostrou que os resultados obtidos são compatíveis com a literatura, bem como mostrou ter desempenho semelhante aos agregados usuais, indicando tratar-se de um material com uso promissor nesse tipo de técnica de pavimentação.

ABSTRACT

This paper presents the results of the physical and mechanical characterization of stone aggregates and waste from the iron ore processing in the city of Mariana/MG, and the physical and mechanical characterization of cold-mix micro-surfacing, considering the incorporation of the iron waste as small aggregate, taking as reference the current technical standards. This type of coating is applied on roads with high traffic volumes, which, during maintenance, require the immediate release of the roads. The use of this residue in cold-mix micro-surfacing is important from an environmental point of view, it reduces the environmental liabilities of tailings dams and enables the use of alternative materials, adding to the pavement satisfactory mechanical performance and reduction of costs with inputs. The chemical and environmental analysis of the residue showed that it is classified as non-hazardous and inert. The mechanical behavior of cold-mix micro-surfacing test specimens containing aggregates of the iron residue showed that the results obtained are compatible with the literature, as well as, they showed to perform similarly to the usual aggregates, indicating that it is a material with promising use in this type of technique of paving.



1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de minério de ferro e a sua exploração implica em grande impacto ambiental devido à geração de grandes volumes de rejeitos, que são oriundos tanto na etapa da exploração das jazidas quanto na de beneficiamento do material. O reaproveitamento desses resíduos na construção civil pode agregar valor a esse subproduto e

minimizar as consequências ambientais. A área de pavimentação é adequada porque requer o uso de grandes quantidades de materiais, consumindo, portanto, grandes volumes de eventuais resíduos, desde que as distâncias de transportes dos materiais sejam economicamente viáveis. Entretanto, deve-se levar em consideração que não pode haver transferência do problema da área ambiental para a área de pavimentação/transportes, ou seja, os resíduos não devem ser capazes de causar danos significativos ao meio-ambiente e a técnica de pavimentação que utiliza o resíduo não deve ser comprometida com o uso do material. Neste trabalho será apresentado um estudo de caso – uso de resíduo de mineração do ferro (Fe) em microrrevestimento asfáltico – no qual ambos os aspectos supracitados foram atendidos, constituindo, portanto, uma solução viável.

De acordo com Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (2012), no período de 1996-2005, a geração de rejeitos aumentou 1,4 vezes, passando de 202 milhões de toneladas em 1996 para 290 milhões de toneladas em 2005. O minério que mais contribuiu para a geração de rejeitos no período foi o ferro (35,08%).

Com relação ao cenário futuro da geração de rejeitos, estima-se que a quantidade anual irá praticamente dobrar, passando de 348 milhões de toneladas em 2010 para 684 milhões de toneladas em 2030. Para esse mesmo período considera-se que o ferro continuará, ainda, como a principal substância geradora de rejeitos, com uma contribuição média de 41,38%.

Os resíduos de Fe, principalmente os arenosos, são obtidos em ordem de milhares de toneladas por dia. Em apenas uma mineradora de grande porte, segundo Silva *et al.* (2011), para cada 1 tonelada de minério obtido, é gerada 1,5 tonelada de resíduo arenoso, ocasionando grandes volumes dispostos em barragem e pátios de bota-foras.

Segundo Coelho (2008), os descartes finais dos resíduos de minério de ferro ou de subprodutos da mineração deixaram de ser uma opção para redução de custos, mas uma necessidade, de forma a eliminar ou minimizar problemas ambientais. Com a redução da exploração de novas jazidas naturais, devido às novas exigências e limitações impostas pelos órgãos governamentais na execução de obras de engenharia, ganha importância o estudo da utilização desses materiais. Os resíduos de minério de ferro constituem agregados miúdos potencialmente aplicáveis como materiais de construção, desde que atendidas às premissas de melhoria de suas propriedades geotécnicas.

Conforme Aparecida (2014), os rejeitos de minério de ferro apresentam granulometria muito fina, o que dificulta a caracterização desses materiais pelos métodos convencionais. Uma alternativa viável para a caracterização e reutilização desses resíduos seria o desenvolvimento de técnicas específicas para o reprocessamento, onde se permita a captura das partículas finas ou ultrafinas.

De acordo com Galhardo (2015), o resíduo de ferro mostrou-se viável para aproveitamento em camadas estruturais de pavimentos de baixo volume de tráfego, mesmo em combinação com solos residuais de filito, que se mostraram expansivos. Ferreira (2007) estudou o uso de resíduos de minério de ferro na conformação de estruturas de pavimentos rodoviários para tráfegos de caminhões e, ainda, são poucos os estudos para o uso de resíduos de ferro como agregado alternativo em misturas de microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF).

O MRAF é constituído por uma delgada camada usada sobre a superfície do pavimento, que serve para evitar fissuras em vias de baixo, médio e alto tráfego. As misturas de MRAF são feitas com agregados naturais e emulsões asfálticas de ruptura controlada.

A caracterização do agregado de resíduo de minério de ferro, produto da exploração e beneficiamento do minério de ferro, constitui-se como a mais importante contribuição deste trabalho, pois até o momento têm-se poucas pesquisas internacionais sobre uso deste resíduo na área de pavimentação. No âmbito nacional, há poucos trabalhos publicados, a exemplo de Silva (2010) que estudou o uso do rejeito em misturas asfálticas do tipo CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente).

Importante considerar que esta pesquisa teve início antes da ruptura das barragens de resíduos de mineração do ferro em Mariana/MG, fato que teve destaque na imprensa mundial e que causou amplos impactos ambientais ao longo do Rio Doce. Entretanto, apesar da tragédia, os resíduos utilizados no presente trabalho são originários da barragem do Germano, a qual permanece intacta após a tragédia, e com os seus estimados cem milhões de toneladas de resíduos armazenados. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo investigar o uso do resíduo de minério de ferro como agregado alternativo para ser empregado em misturas do tipo MRAF.

2. RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo segundo a UNCTAD (Conferência das Nações Unidas Sobre Comércio e Desenvolvimento) e o U.S. Geological Survey. De acordo com as mesmas fontes, em 2011 os três maiores produtores foram a Austrália com 480 milhões de toneladas, o Brasil com 390 milhões de toneladas e a China com 380 bilhão de toneladas (IBRAM, 2012).

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2012), as reservas medidas de Minério de Ferro no Brasil alcançaram a faixa de 29 bilhões de toneladas, colocando o país em segundo lugar em relação às reservas mundiais (que correspondem a 180 toneladas). No entanto, considerando-se as reservas em termos de ferro, o Brasil assume a primeira posição, devido ao alto teor encontrado nos minérios de hematita (60% de ferro) e itabirito (50% de ferro).

O estado de Minas Gerais (MG) é o mais importante estado minerador do país, extraindo mais de 160 milhões de toneladas/ano de minério de ferro, sendo responsável por aproximadamente 53% da produção brasileira de minerais metálicos e 29% de minérios em geral (IBRAM, 2014).

De acordo com Campanha (2011), a maioria dos resíduos do beneficiamento do ferro é considerada de forma granular, com baixa permeabilidade, com boas condições de drenagem e baixo potencial poluidor. O comportamento geotécnico é determinado pelas características e pela forma de deposição, sendo que na região do Quadrilátero Ferrífero do estado de MG tem-se que a maioria dos rejeitos possui cerca de 60% a 70% de sua granulometria tendendo para as areias finas e médias siltosas.

Para melhor entendimento das características específicas do ferro e do resíduo de minério de ferro podem ser consultados os diversos trabalhos existentes na literatura, dentre os quais se destacam: Galhardo (2015), Cordeiro (2014), Bastos (2013), Campanha (2011), Pinho Rocha (2008), Fernandes (2005), Takehara (2004), Presotti (2002), Rosiere (1996), Door (1964), entre outros. Importante observar que os resíduos podem ter características distintas em função do processo de beneficiamento do minério de ferro, sendo comum a presença de grãos de quartzo (SiO_2) e minerais contendo ferro residual do processo de beneficiamento, por exemplo, a hematita.

Para a presente pesquisa foram utilizados dois tipos de agregados: resíduo do beneficiamento do minério de ferro (agregado miúdo) e o agregado convencional (granito). O resíduo do minério de ferro é produto da redução do ferro na mina de exploração, denominada Alegria, a

qual opera sobre responsabilidade da Mineradora Samarco S.A., localizada em Mariana/MG, apresentada na Figura 1.



Figura 1. Depósito de resíduo de minério de ferro em Mariana/MG. Barragem do Germano

Após a mineração, o material passa por processos de beneficiamento que incluem etapas de britagem, peneiramento e flotação. Nesta última fase, o resíduo de ferro passa a ser tratado como um passivo ambiental e é descartado em pilhas e barragens. Durante o processo de extração e beneficiamento do minério de ferro são geradas toneladas de resíduos que são provenientes dos processos químicos, ou pelo baixo aproveitamento do resíduo do minério de ferro por defeitos ou quebras.

A hematita é o principal mineral presente no minério de ferro encontrado no Brasil. Sua exploração, para a indústria siderúrgica gera diversos resíduos líquidos, sólidos e lama, os quais são oriundos da etapa de fragmentação e concentração do minério composto de sílica.

No Brasil, os resíduos são classificados quanto ao perigo, pela norma Técnica NBR 10.004 (ABNT, 2004), em resíduos de classe I (perigosos), classe II (não inertes) e classe III (inertes). A Lei Federal 9.605 (Brasil, 1998), promulgada em fevereiro de 1998 - Lei de Crimes Ambientais enfatiza a proteção jurídica do meio ambiente e estabelece penalidades contra as pessoas físicas e jurídicas que cometerem violações ambientais. Assim como, as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), como por exemplo, a Resolução Conama Nº 001 (1986), que estabelece definições, responsabilidades, critérios básicos e diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente.

3. MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO A FRIO

O microrrevestimento de acordo com Bernucci *et al.* (2008), é considerado uma evolução das lamas asfálticas, pois usa o mesmo princípio e concepção, porém utiliza emulsões modificadas com polímeros para aumentar sua vida útil. Considerado, também, como um sistema de pavimentação superficial de camadas delgadas, composto de emulsão asfáltica modificada por polímeros, agregados triturados, filler, água e aditivos.

O microrrevestimento asfáltico é composto de uma camada delgada, podendo variar de 6 a 15 mm e não deve ser considerado no projeto como melhoria da capacidade estrutural do pavimento. No entanto, ele é aplicado em vias de tráfego elevado visando melhorar a segurança e, em vias urbanas, devido à facilidade de aplicação e o custo atrativo (ABEDA, 2001). A experiên-

cia brasileira tem se concentrado no emprego de MRAF como camada selante impermeabilizante, rejuvenescedora e antiderrapante, conforme descrito na especificação de serviço do DNIT (2005).

Ceratti e Reis (2011) indicam que os principais requisitos técnicos estabelecidos para os agregados a serem utilizados em MRAF são: materiais granulares limpos, de elevada resistência mecânica e durável; 100% oriundos de britagem de rocha, com partículas livres de contaminantes químicos, de argila ou outro material que possa afetar a adesividade, a mistura e a execução; tamanho nominal máximo entre 4 e 9,5 mm e curva de composição granulométrica bem graduada. Quanto às emulsões asfálticas as especificações de serviço brasileiras nº 35 (DNIT, 2005), NBR 14948 (ABNT, 2003) indicam que seja de ruptura rápida modificada por polímeros.

Para aprofundar os conhecimentos referentes às características específicas das misturas asfálticas do tipo MRAF, podem ser consultados vários trabalhos disponíveis na literatura, dentre os quais se destacam: Castro (2014), Vasconcelos (2013), Silva (2011), Reis (2005), dentre outros.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a realização dos procedimentos de laboratório as recomendações e guias de dosagem seguiram as prescrições descritas pela *International Slurry Surfacing Association* (ISSA), pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT).

A especificação do DNIT (2005) e a norma brasileira da ABNT (2003) são amplamente utilizadas para misturas de microrrevestimento. Para a mistura, primeiramente verificou-se a graduação dos agregados através do enquadramento granulométrico, levando-se em consideração o maior aproveitamento do resíduo. Para tanto, determinou-se a percentagem em peso seco do agregado para o teor de emulsão asfáltica e o conteúdo de água. Para os ensaios de compatibilidade das misturas verificadas em corpos de prova com adição do resíduo de ferro, realizaram-se várias tentativas a fim de verificar e estabelecer os valores padrões para efeitos de comparação da mistura piloto com as demais misturas com resíduo de minério de ferro.

Foram realizados ensaios de tempo de mistura com a finalidade de obter-se uma mistura mais homogênea entre corpos de prova de microrrevestimento, sendo utilizadas duas amostras para se alcançar o resultado médio. As misturas foram preparadas no Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do Instituto Militar de Engenharia (IME), considerando quatro traços diferentes. Assim, foram preparados 16 corpos de prova para os ensaios de desgaste (perda por abrasão úmida, *Wet Track Abrasion Test*- WTAT) e mais 16 corpos de prova para o ensaio de exsudação (excesso de asfalto por adesão de areia, *Loaded Wheel Test* - LWT), totalizando 32 corpos de prova para cada traço com diferentes proporções de resíduo de ferro em substituição ao agregado natural (0%, 10%, 15% e 20%). No total foram moldados 128 corpos de prova.

A compatibilidade dos materiais foi realizada pelo ensaio de adesividade (*Wet Stripping Test* - WST) e o ensaio de coesão úmida (*Modified Cohesion Test* - MCT), conforme as normas citadas no item 5.3, que classificam o comportamento do resíduo em misturas de microrrevestimento.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Agregados

Para a produção das misturas de microrrevestimento, utilizou-se pó de pedra oriundo da região

do Rio de Janeiro, sendo o mesmo coletado pela Holcim Brasil. O resíduo de minério de ferro utilizado para este estudo foi proveniente do processo denominado flotação, durante o beneficiamento do minério de ferro na mina Alegria, sendo constituído de material escuro, muito fino e com baixa coesão. Ambos estão ilustrados na Figura 2 a seguir.

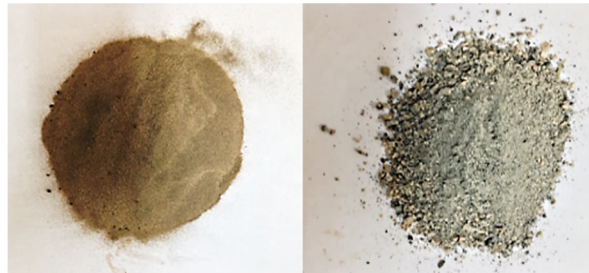


Figura 2. Aspecto visual do resíduo de minério de ferro e do pó de pedra utilizados

5.2. Ligante asfáltico

Foi utilizada para esta pesquisa a emulsão RC-1C-E, cujas propriedades obtidas dos ensaios de caracterização são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização da emulsão RC 1C-E

Ensaio	Resultados	Especificações
Viscosidade Saybolt- furol	23,3	Max. 70 s
Resíduo por evaporação	62,3 %	Min. 60%

5.3. Metodologia

Inicialmente, foram realizadas as caracterizações química e ambiental do resíduo do minério de ferro no Laboratório de Ciência dos Materiais do IME, através dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (MEV/EDS), Solubilização (orgânicos) e Lixiviação de metais (inorgânicos). Em seguida, foram realizados os ensaios básicos de caracterização do resíduo de minério de ferro e do agregado, tais como: a densidade real e aparente (método de ensaio nº 084 – DNER, 1995), granulometria por peneiramento (NBR 7181 - ABNT, 1984), perda por abrasão (NBR 14746 – ABNT, 2014), sanidade ou durabilidade (método de ensaio 089 – DNER, 1994), bem como os ensaios de caracterização da emulsão asfáltica (especificação nº128 – DNIT, 2010).

Após a caracterização, foram determinados os traços para as distintas misturas de MRAF, utilizando-se a faixa granulométrica I como referência, conforme especificações do DNIT (mesma faixa II da ISSA). Posteriormente, foram confeccionados os corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de resistência ao desgaste de abrasão úmida WTAT (NBR 14746 – ABNT, 2014), desgaste por adesão de areia LWT (NBR 14841 – ABNT, 2015), coesão modificada (NBR 14798 – ABNT, 2002) e ensaio de adesividade (NBR 14757- ABNT, 2001).

5.3.1 Dosagem do microrrevestimento asfáltico a frio

A determinação da consistência da mistura é uma operação importante que permite definir a quantidade ótima de água para uma correta trabalhabilidade da massa, de acordo com a norma

ABNT (2003). O tempo mínimo de estabilidade de mistura é de 120 segundos e nos quatro traços estudados atendeu-se a esse requisito.

A técnica mais aplicada para a determinação da consistência é a prescrita na norma ISSA TB – 106, sendo que a composição granulométrica deve atender às exigências das faixas conforme o método de ensaio 083 do DNER (1998). A ISSA recomenda as Faixas I, II e III. Para cada traço foi calculado a porcentagem de emulsão asfáltica (%), sobre a massa da mistura seca, obtendo-se os valores (em %) indicados na Tabela 2.

Tabela 2: Proporção do ligante

Ensaio	Porcentagem			
	Traço 1 (SRF*)	Traço 2 (10 % RF**)	Traço 3 (15 % RF)	Traço 4 (20 % RF)
Ensaio WTAT	10%	12%	14%	16%
Ensaio LWT	12%	14%	16%	18%
Ensaio de coesão	% ótimo de emulsão			

*SRF: Sem Resíduo de Ferro; **RF: Resíduo de Ferro

A ilustração da composição do traço de cada mistura é apresentada na Figura 3. A determinação dos teores de cada componente da mistura foi realizada pela análise granulométrica dos materiais constituintes da mistura e os percentuais de cada material foram ajustados até o correto enquadramento na faixa requerida.



Figura 3. Mistura dos componentes do MRAF

Realizou-se uma composição granulométrica (Figura 4) dos materiais pó-pedrisco e resíduo, para todos os traços, enquadrando-os na faixa II da especificação do ISSA A143 – A e na faixa I da especificação nº 035 (DNIT, 2005).

Os agregados foram quarteados para os ensaios de granulometria, lavados e secados na estufa a 60°C e peneirado segundo a norma ME 083 (DNER, 1998) - Análise granulométrica. De posse do resultado do ensaio granulométrico, iniciou-se a escolha do tipo de faixa que permitisse calcular as porcentagens de agregados somados ao resíduo de minério de ferro para cada traço proposto, conforme as normas da ISSA e a especificação de serviço nº 35 (DNIT, 2005), para microrrevestimento. Para tanto, foi utilizado o método das tentativas até serem estabelecidas as porcentagens adotadas de cada material para as quatro misturas propostas. Devido a quantidade de finos, o traço 4 (Figura 4) ficou fora dos limites da faixa na região correspondente à peneira de nº 50.

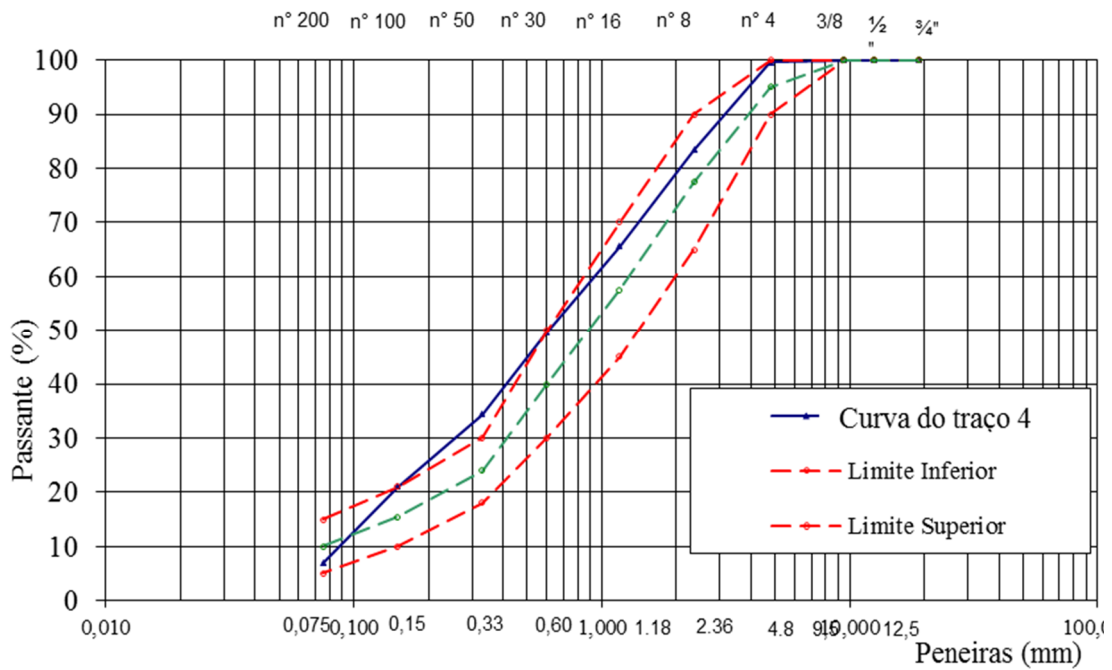


Figura 4. Faixa granulométrica ISSA II, DNIT, Traço 4 (20% RF)

No total foram definidos quatro traços, todos considerando 1% de cimento, porém variando a porcentagem de resíduo, conforme indicado na Tabela 3. No caso de uso de fíler foi usado cimento (do tipo CP I) por ser mais comercial e de custo econômico.

Tabela 3: Porcentagem dos materiais para cada um dos traços pesquisados

Materiais	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
	SRF	10% RF	15%RF	20% RF
Pó de pedra (%)	99	89	84	79
Resíduo de minério de ferro (%)	0	10	15	20
Cimento (%)	1	1	1	1

* RF: resíduo da mineração do Fe.

Na Tabela 4 são apresentadas as superfícies específicas para cada traço considerado, a partir das quais se determinou a quantidade de teor de emulsão asfáltica, sendo utilizado o método de Duriez (método para estimar as quantidades de emulsão teórica feito no laboratório), no qual as proporções de água são inversamente proporcionais ao teor de emulsão.

Tabela 4: Superfície Específica (SE) dos traços do projeto

SIGLA	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
SE =	6,24	6,88	7,19	7,51

Na Figura 5 são apresentadas as distribuições granulométricas dos traços analisados considerando a faixa I do DNIT (2005).

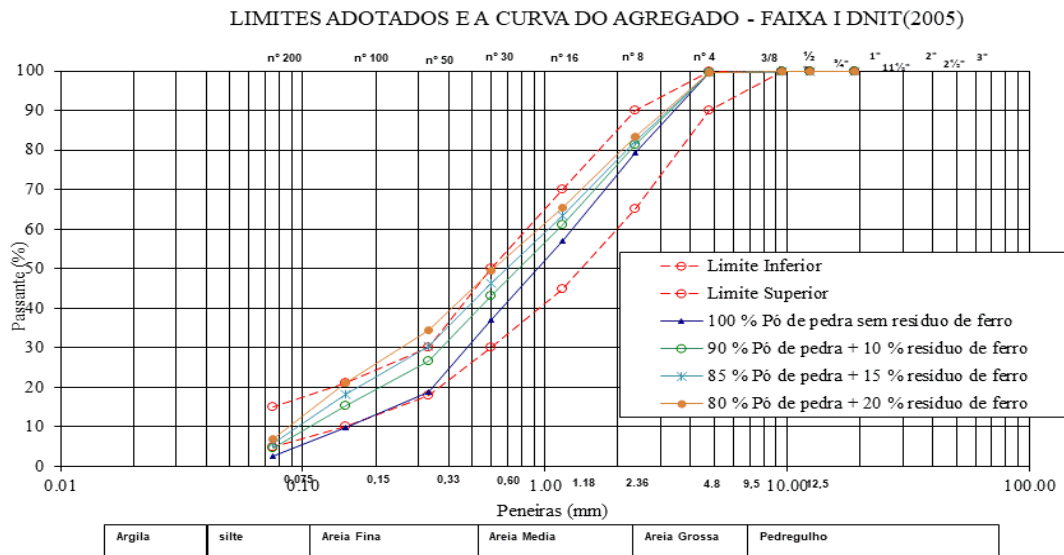


Figura 5. Na Figura 5 são apresentadas as distribuições granulométricas dos traços analisados considerando a faixa I do DNIT (2005).

5.3.2 Caracterização dos agregados pelo coesímetro (MCT)

Os resultados do ensaio pelo coesímetro modificado definem a resistência da emulsão asfáltica com relação ao desprendimento dos agregados, fato que depende da ruptura e da cura no processo de mistura. O processo é dependente do tempo. As normas recomendam que a emulsão deva ser de ruptura controlada. Esse processo de ruptura pode ser rápido ou lento, sendo que, normalmente, as misturas aplicadas na superfície do pavimento devem permitir a liberação ao tráfego até sessenta minutos após a aplicação.

O ensaio foi realizado em diferentes intervalos de tempo, com as diversas misturas sem adição de resíduo, que foram comparadas com misturas com resíduo de ferro. As misturas foram testadas com uma carga de 200 kPa, na qual se inicia um desenvolvimento dos esforços de coesão modificada.

5.3.3 Determinação da perda por abrasão úmida (WTAT)

Esse ensaio avalia a resistência à abrasão úmida do MRAF por meio da simulação dos efeitos produzidos sobre a superfície úmida pela ação da frenagem de um veículo. Através da realização desse ensaio, é determinado o valor mínimo de teor de ligante asfáltico, dado pela diferença de perda de massa do material pétreo do corpo da prova, na qual se estabelece o teor ótimo de emulsão de uma mistura que compõe o MRAF.



Figura 6. Equipamento utilizado para preparação dos corpos de prova para o ensaio WTAT

O traço piloto (ou de controle) integralmente com agregados naturais foi necessário para avaliar, quanto à sensibilidade dos resultados do WTAT, as demais misturas de microrrevestimento a frio. Para avaliar esse comportamento, foram preparados e moldados corpos de prova utilizando o equipamento apresentado na Figura 6.

5.3.4 Determinação do excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT

O ensaio LWT permite avaliar o efeito da compactação através de um simulador de tráfego em laboratório (Figura 7), e determina a resistência à exsudação do asfalto sob uma carga simulada de tráfego, bem como o teor máximo de ligante que deve ser utilizado no MRAF. Foram confeccionados 2 corpos de prova para cada tipo de traço, com dimensões de 50 mm de largura por 375 mm de comprimento.



Figura 7. Simulador de tráfego

5.3.5 Determinação da adesividade das misturas (WST)

A determinação da adesividade das misturas avalia a compatibilidade química entre os materiais da composição da mistura e sua resistência à ação da água, por meio de um método expedito (Reis & Santos, 2009). Esse ensaio é normatizado e descrito pela ABNT (2001). Para a realização do ensaio é basicamente necessário submeter os corpos de prova na água em ebulição durante 3 minutos e, após esse tempo, o corpo de prova é retirado e levado para secar ao ar livre. Posteriormente ao período de repouso, procede-se a análise visual da superfície do corpo de prova e estima-se a área coberta pela película asfáltica. O valor mínimo recomendável pela norma ISSA, para ser considerado como satisfatório, é em torno de 90%.

6. RESULTADOS

O ensaio de MEV mostrou que a amostra de resíduo contém uma alta porcentagem de ferro e silício, o que já era esperado uma vez que o material é resultante do processo de trituração de rochas de minério de ferro. Não foram encontrados vestígios de componentes expansivos e nem radioativos (Figura 8a e b).

Quanto ao ensaio de lixiviação (orgânicos), esse apresentou valores abaixo dos limites máximos prescritos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) (Tabela 5). O ensaio de solubilização (inorgânicos) também apresentou teores de constituintes solubilizados abaixo dos limites máximos prescritos pela mesma norma (Tabela 6). Assim, a amostra de resíduo do beneficiamento de minério de ferro pode ser classificada como Classe II B - não perigoso e inerte.

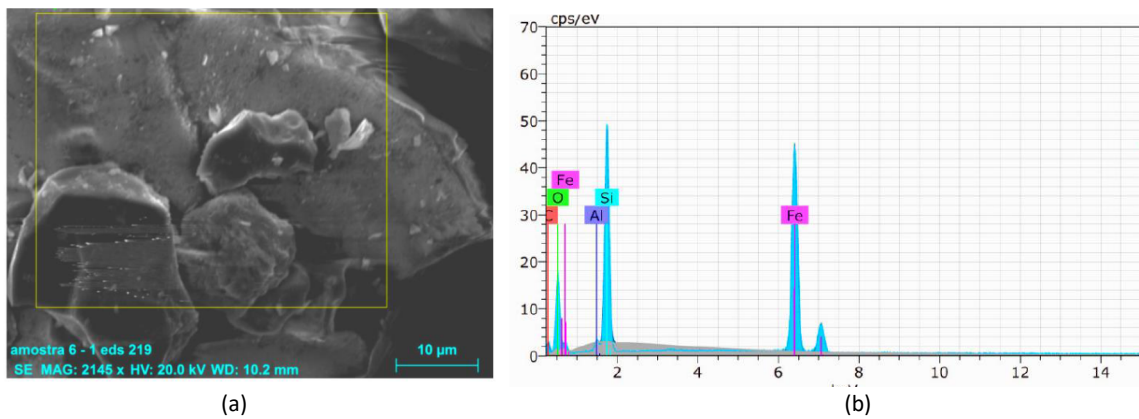


Figura 8. Resultados dos ensaios de a) MEV, aprox. 2145 vezes e b) EDS do resíduo

Quanto ao ensaio de lixiviação (orgânicos), esse apresentou valores abaixo dos limites máximos prescritos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) (Tabela 5). O ensaio de solubilização (inorgânicos) também apresentou teores de constituintes solubilizados abaixo dos limites máximos prescritos pela mesma norma (Tabela 6). Assim, a amostra de resíduo do beneficiamento de minério de ferro pode ser classificada como Classe II B - não perigoso e inerte.

Tabela 5: Teor de constituintes inorgânicos lixiviados.

Constituintes	Unidade	Resultados	Limites (mg/L)	
			Limites de Quantificação	NBR 10004 (máximo)
Prata	(Ag)	(mg/L)	N.D.	0,0250
Arsênio	(As)	(mg/L)	N.D.	0,0250
Bário	(Ba)	(mg/L)	N.D.	0,0100
Cádmio	(Cd)	(mg/L)	N.D.	0,0030
Cromo	(Cr)	(mg/L)	N.D.	0,0100
Chumbo	(Pb)	(mg/L)	N.D.	0,0100
Selênio	(Se)	(mg/L)	N.D.	0,0250
Merúrio	(Hg)	(mg/L)	N.D.	0,0002
Fluoreto	(F)	(mg/L)	N.D.	0,0200
pH	-	-	4,92	-

N.D. = Não detectado, significa que os teores estão abaixo do limite de quantificação.

Tabela 6: Teor de constituintes inorgânicos solubilizados

Constituintes	Unidade	RESULTADOS	LIMITES (mg/L)	
			Limites de Quantificação	NBR 10004 (máximo)
Prata	(Ag)	(mg/L)	N.D.	0,0100
Alumínio	(Al)	(mg/L)	N.D.	0,0100
Arsênio	(As)	(mg/L)	N.D.	0,0080
Bário	(Ba)	(mg/L)	N.D.	0,0100
Cádmio	(Cd)	(mg/L)	N.D.	0,0030
Cromo	(Cr)	(mg/L)	N.D.	0,0100
Cobre	(Cu)	(mg/L)	N.D.	0,0100
Ferro	(Fe)	(mg/L)	0,027	0,0100
Manganês	(Mn)	(mg/L)	0,008	0,0050
Chumbo	(Pb)	(mg/L)	N.D.	0,0070
Selênio	(Se)	(mg/L)	N.D.	0,0080
Zinco	(Zn)	(mg/L)	N.D.	0,0030
Merúrio	(Hg)	(mg/L)	N.D.	0,0002
Sódio	(Na)	(mg/L)	1,85	0,0600
Sulfatos	(SO ₄) ²⁻	(mg/L)	1,850	0,5000
Nitratos	(N)	(mg/L)	0,890	0,5000
Cloretos	(Cl)	(mg/L)	0,240	0,0500

Tabela 6: Teor de constituintes inorgânicos solubilizados (continuação)

Constituintes	Unidade	Resultados	Limites (mg/L)	
			Limites de Quantificação	NBR 10004 (máximo)
Fluretos	(F ⁻)	(mg/L)	N.D.	0,0200
Cianetos	(CN ⁻)	(mg/L)	N.D.	0,0500
Fenóis	-	(mg/L)	N.D.	0,1000
pH	-	-	6,280	-

N.D. = Não detectado, significa que os teores estão abaixo do limite de quantificação.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles, adesividade, absorção e índice de forma.

Tabela 7: Características dos agregados para misturas de microrrevestimento

Métodos	Ensaio	Resultados			Parâmetros
		MRAFo	Pó de pedra	Resíduo ferro	
Método de Ensaio nº35(DNER, 1998)	Perda por Abrasão	40%	15,3	-	40% máximo
NBR 14949 (ABNT, 2003)	Azul metileno	10%	2,5	0,4	10% mínimo
Método de Ensaio nº 54 (DNER, 1997)	Equivalente de Areia	60%	72%	46%	65% mínimo
Método de Ensaio nº 89 (DNER, 1994)	Durabilidade	12%	5,2	-	15% máximo usado Na ₂ SO ₄ ou 25% máximo usado MGSO ₄

Com relação à massa específica, para o resíduo de minério de ferro obteve-se a densidade aparente correspondente a 1,5 g/cm³ e a densidade real equivalente a 2,86 g/cm³. Para o pó de pedra a densidade aparente foi igual a 1,54g/cm³ e a densidade real foi correspondente a 2,55 g/cm³.

Quanto ao ensaio de Abrasão Los Angeles, devido à granulometria fina do resíduo de minério de ferro (<#4mm), não foi possível fazer a leitura deste e/ou determinar sua influência no resultado final. Foi possível apenas realizar o ensaio com o pó de pedra, cujo resultado – 15,3% - mostrou-se muito baixo.

Em relação ao Índice de Forma, foram obtidos por meio do ensaio do AIMS (*Aggregate Image Measurement System*). Verificou-se que o resíduo apresenta uma angularidade baixa a moderada. A partir do índice de textura para o resíduo de minério de ferro, percebeu-se que o resíduo apresenta uma textura moderada equivalente a relação de 1:3, o que o torna aceitável (ABNT, 2006). Quanto à sanidade ou durabilidade, verificou-se uma perda de massa correspondente a 1%, mostrando a boa resistência do resíduo de minério de ferro ao intemperismo químico.

Tabela 8: Análise granulométrica do resíduo de minério de ferro

Peneiras (pol.)	(mm)	% Passante		
		Pó de pedra	Resíduo	Cimento
3/8"	9,5	100,00		
n.º 4	4,8	99,46		
n.º 8	2,36	79,19		
n.º 16	1,18	56,89	100,00	
n.º 30	0,6	36,95	99,94	
n.º 50	0,33	18,94	95,80	100,00
n.º 100	0,15	9,82	65,64	100,00
n.º 200	0,075	2,47	24,48	98,50

Através da análise granulométrica, pode-se afirmar que as características do resíduo de minério de ferro proporcionam a mistura asfáltica estabilidade por meio do intertravamento das partículas e contribuindo para o atrito, devido à sua grande superfície específica, conforme apresentada na Tabela 8.

6.1. Determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro (MCT)

A Tabela 9 consolida os resultados do teste de coesão modificada obtidos para os traços testados.

Tabela 9: Resultados do teste de coesão modificada MCT

Ensaio	Tempo	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
		SRF	10% RF	15% RF	20% RF
A	30min	22	21	30	22
B	60min	20	26	29	21
C	90min	25	26	28	22
D	120min	27	31	27	25
E	150min	28	29	28	23

O torque realizado pelas misturas sem resíduo de ferro apresenta característica aceitável dentro do parâmetro exigido pelas normas. A Figura 9 representa os esforços desenvolvidos nas misturas estudadas. A partir dessa figura, pode-se constatar que as misturas com adição de 10% de resíduo de ferro desenvolvem esforços superiores de coesão e ruptura rápida para 12 kg.cm como limite de trabalhabilidade. Além disso, a adição de resíduo em 20% apresenta as características similares de desenvolvimento de esforços de coesão e ruptura rápida, isto é, o resíduo não altera o tempo de mistura.

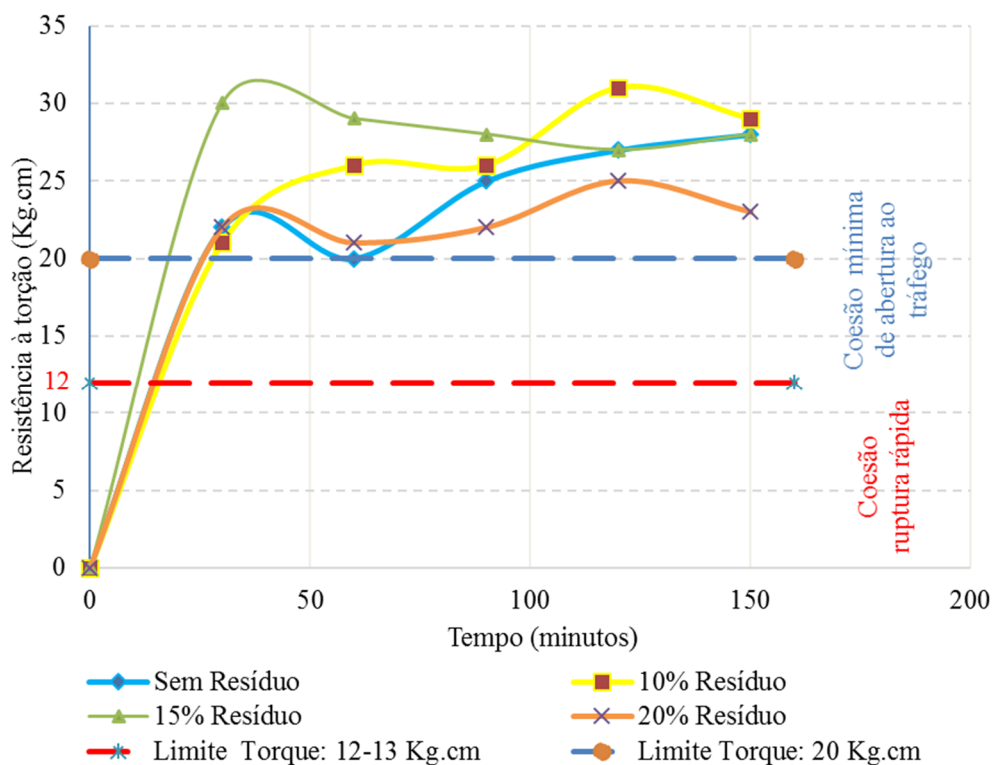


Figura 9. Resultados da coesão modificada MCT para os traços ensaiados

Para o caso de verificação, a coesão mínima para abertura ao tráfego apresentou esforços similares às misturas sem adição de resíduo, os quais evidenciam o comportamento de torque superior ao limite estabelecido pelas normas da ISSA (Figura 10) e as misturas com adição de resíduo de ferro mostraram que as misturas atingiram o parâmetro de 20 Kg.cm.

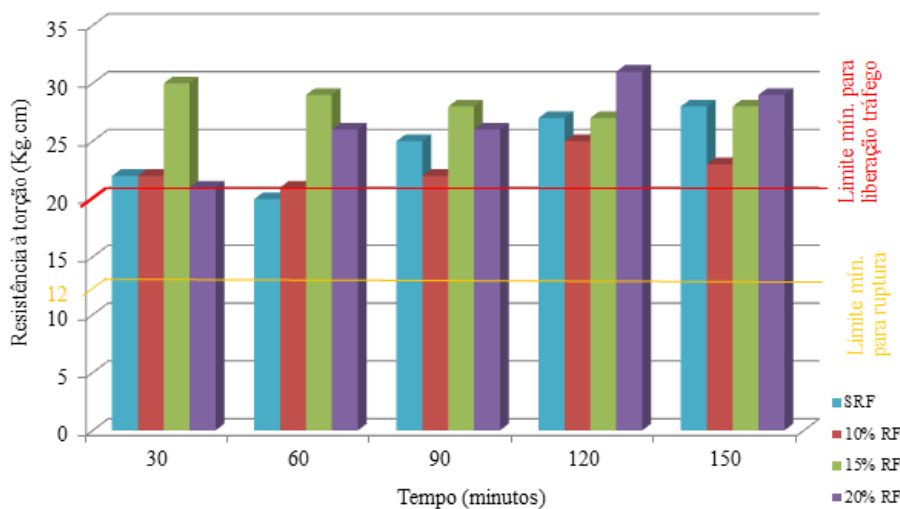


Figura 10. Resultados da coesão máxima dos projetos com adição de resíduo de ferro

Verifica-se que a adição do resíduo em estudo proporciona um ligeiro incremento e mantém um comportamento de torque superior a 20 kg.cm após 60 minutos. Nesse sentido, percebe-se que é importante que o resíduo seja utilizado em conjunto com emulsão asfáltica de ruptura controlada para possibilitar uma rápida execução e liberação ao tráfego.

6.2. Determinação da adesividade de misturas (WST)

A Tabela 10 apresenta os resultados dos testes de adesividade realizados, indicando o teor de emulsão e o recobrimento de cada mistura confeccionada. Na Figura 11, ilustra-se o comportamento das misturas sem resíduo de ferro, que apresentaram um elevado valor de adesividade (97%), ao passo que as misturas com adição de 10% de resíduo de ferro, diminuíram a adesividade com valores ainda acima de 90%, limite estabelecido como aceitável.

Tabela 10: Resultados do teste de adesividade WST

Tipo	Misturas	Teor de emulsão (%)	Recobrimento (%)
RC – 1C E	SRF	10	97,25
	10% RF	12	93,75
	15% RF	14	93,75
	20% RF	16	85,00

Os resultados apresentados na Tabela 10 e na Figura 11 indicam que apesar da perda de adesividade com o aumento do teor de emulsão asfáltica, as misturas feitas com resíduo de minério de ferro apresentaram uma boa adesividade com até 15% de adição de mesmo, apresentando boa parte da área recoberta pela película de asfalto, integralmente devido ao resíduo, uma vez que esse representa o material fino na granulometria da mistura. Os resultados são coerentes com a mistura piloto, pois as misturas com adição de resíduo de ferro atingiram os limites estabelecidos pela norma.

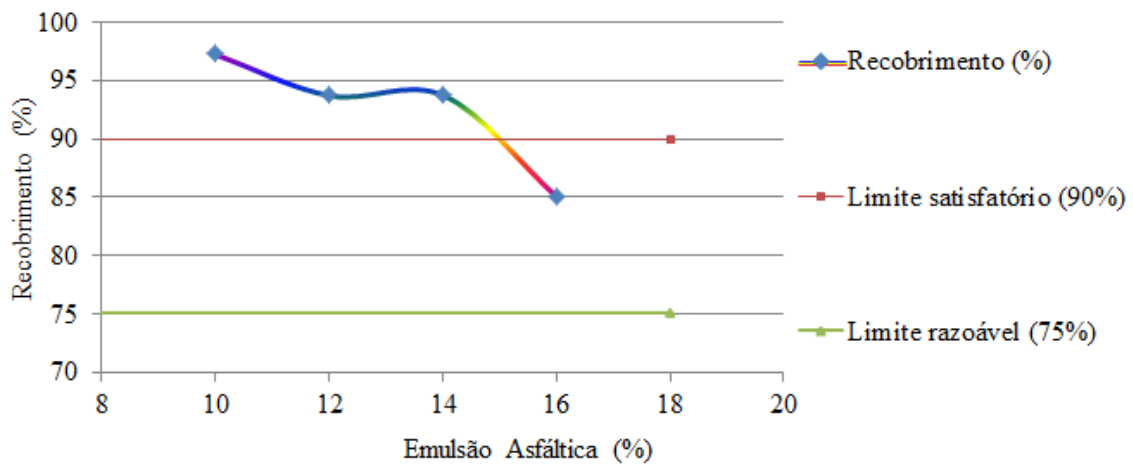


Figura 11. Valores de adesividade das misturas deste estudo

6.3. Determinação da perda por abrasão úmida (WTAT)

Foram moldados quatro corpos de prova, conforme mostrado na Tabela 11, para possibilitar a seleção das misturas de microrrevestimento e permitir a medição da resistência à deformação devido à aplicação da carga.

Tabela 11: Resultados do teste de perda por abrasão úmida WTAT

Água (%)	12	10	8	6
Emulsão asfáltica (%)	10	12	14	16
SRF (g/m ²)	592,86	389,87	335,09	294,75
10% RF (g/m ²)	689,25	509,16	415,53	307,10
15% RF (g/m ²)	707,68	519,74	424,08	318,75
20% RF (g/m ²)	941,60	670,02	450,72	340,52

Na Figura 12 são mostrados os resultados do ensaio de desgaste por abrasão úmida após uma hora de saturação.

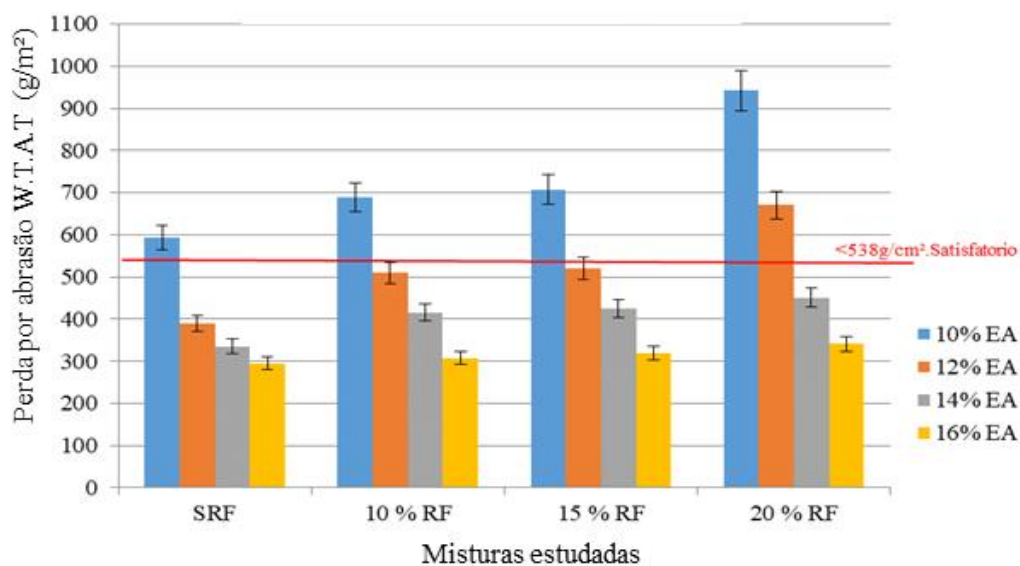


Figura 12. Desgaste por abrasão úmida WTAT

Através da Figura 12, observa-se que, como aumento de emulsão asfáltica (EA) residual, a perda abrasiva diminui e, também, a perda por abrasão é maior quanto maior a porcentagem de resíduo de ferro incorporado na mistura. Pode-se inferir que a adição do resíduo de minério de ferro gera um maior consumo de ligante devido a maior superfície específica do resíduo e, por isso, o Traço 1 (SRF) foi o menos afetado em relação aos demais traços.

6.4. Determinação da adesão de areia (LWT)

A Tabela 12 apresenta os resultados do teste de adesão de areia para as quatro misturas analisadas e, também, para os quatro corpos de prova confeccionados.

Tabela 12: Resultados do teste adesão de areia LWT

Água (%)	12	10	8	6
Emulsão asfáltica (%)	10	12	14	16
SRF (g/m ²)	451,35	489,03	544,81	609,28
10% RF (g/m ²)	424,85	454,03	545,68	596,36
15% RF (g/m ²)	412,66	434,34	535,06	570,03
20% RF (g/m ²)	396,17	424,57	558,8	597,41

Os resultados obtidos para as misturas sem adição de resíduo de ferro apresentaram valores abaixo do aceitável pelas normas. Verifica-se, pela análise da Tabela 12, que a diferença entre as misturas sem adição de resíduo e aquelas contendo resíduo de ferro diminui levemente devido à adesão de areia ao resíduo, proporcionado pelo aumento da superfície específica que varia de 6,24 até 7,51 m²/kg nas misturas. As quantidades de adesão de areia indicam baixo risco de exsudação da mistura.

As misturas elaboradas com agregados naturais apresentaram uma grande resistência à compactação com valores de até 544,68 g/m², valor este situado acima da faixa limite estabelecida de 538 g/m² pelas normas da ISSA. As misturas com adição de 10% de resíduo de minério de ferro e 90 % de agregado natural, no tempo de 30 minutos, obtiveram valor de coesão de 454,03 g/m²; as misturas com 15% de resíduo e de 85 % de agregado natural, 434 g/m²; e as misturas de 20% de adição de resíduo e com 80% de agregado natural, valor de 424 g/m².

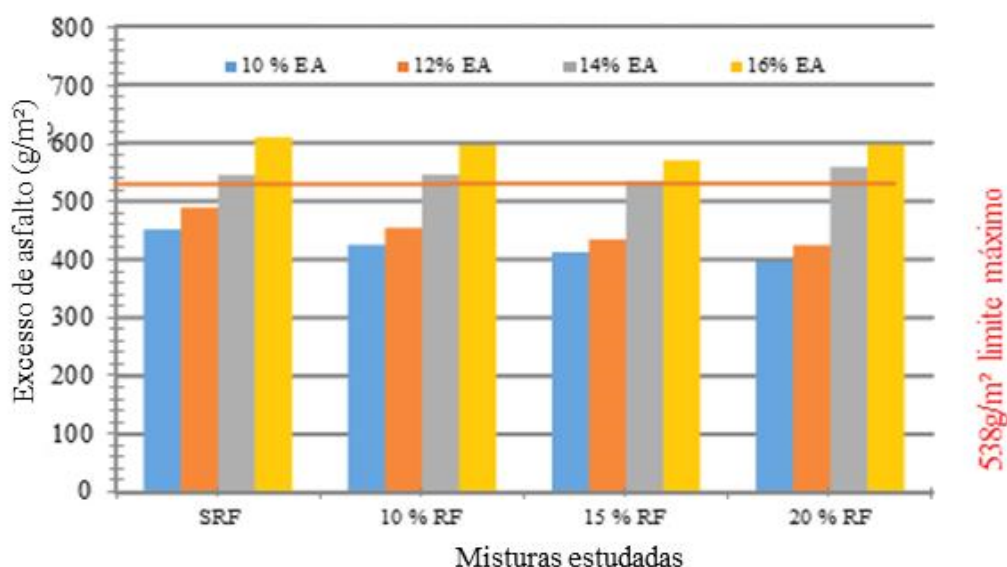


Figura 13. Perda por adesão de ligante das misturas deste estudo

Na Figura 13 é apresentado um gráfico de perda por adesão de ligante das misturas analisadas nesta pesquisa. Verifica-se que para todas as faixas de percentuais de emulsão asfáltica, as misturas com adição de resíduo minério de ferro apresentam uma mínima variação de desgaste à abrasão em relação ao traço de controle. Nota-se, ainda, que em todas as misturas com resíduo de minério de ferro tem-se uma leve diminuição da coesão para o teor de 16% de emulsão asfáltica e, também, há uma baixa na resistência de compactação.

As Figuras 14 a 17 apresentam os gráficos de WTAT × LWT, em que foram obtidos: (a) para o caso de misturas sem adição de resíduo de ferro, o teor ótimo de asfalto de 6,95%, que equivale a 11,39% de emulsão asfáltica; (b) para o caso de 10% de RF foi de 7,55% de teor ótimo de asfalto, equivalente a 12,34 % de emulsão asfáltica; (c) para o caso de 15% de RF, 8,0 % de teor ótimo de asfalto, equivalente a 13,05% de emulsão asfáltica e (d) para o caso de 20% de RF, obteve-se 8,22 % de teor ótimo de asfalto, equivalente a 13,43% de emulsão asfáltica.

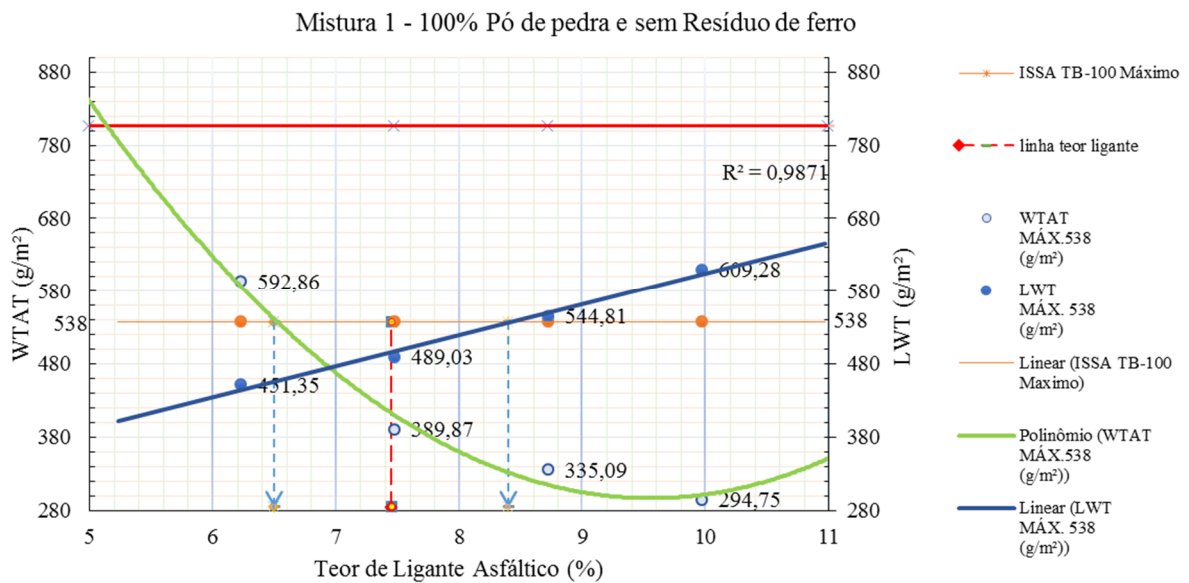


Figura 14. Gráfico WTAT × LWT (SRF)

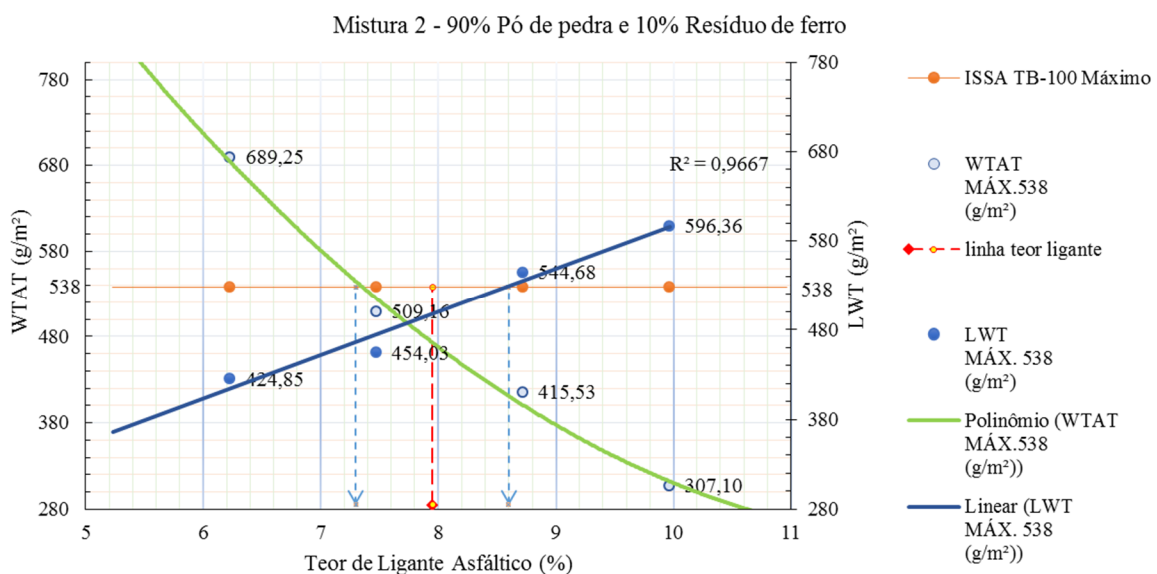


Figura 15. Gráfico WTAT × LWT (10%RF)

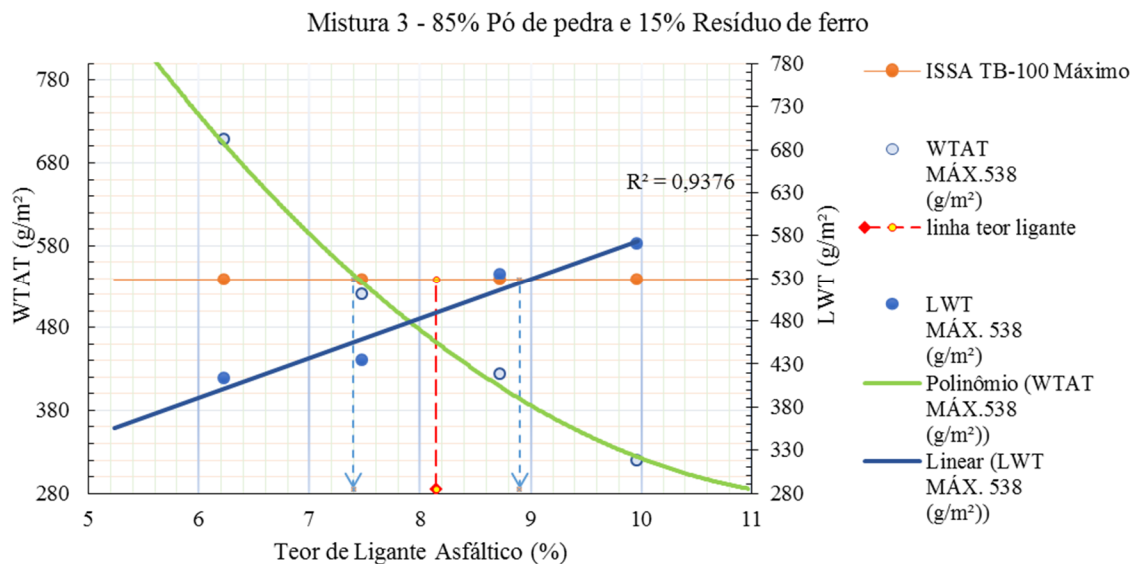


Figura 16. Gráfico WTAT x LWT (15%RF)

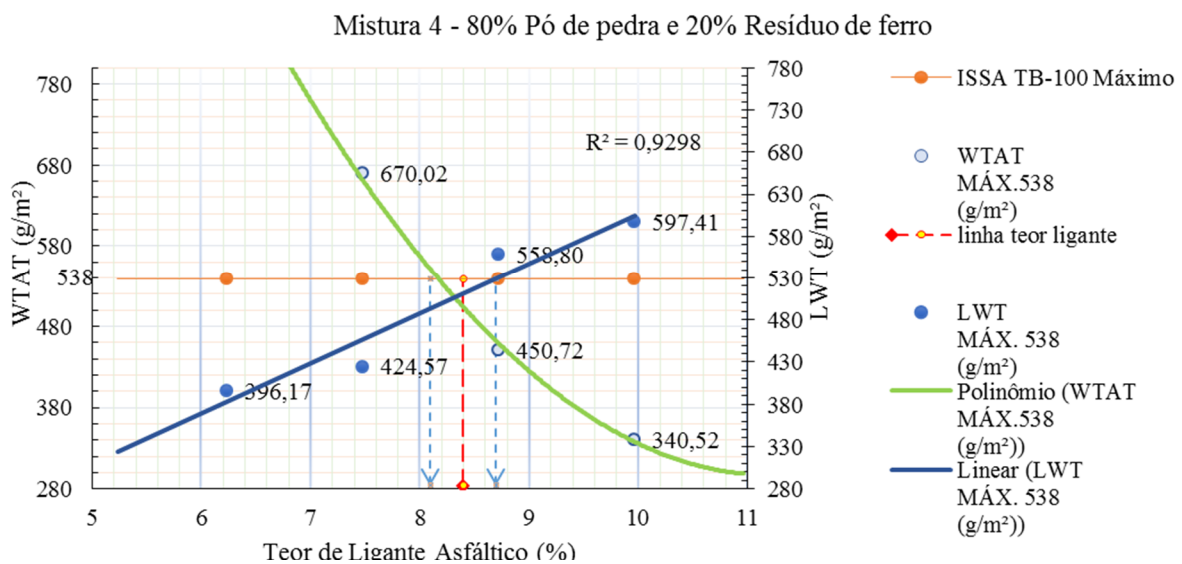


Figura 17. Gráfico WTAT x LWT (20%RF)

Os resultados apresentados auxiliam na determinação da quantidade máxima de resíduo de minério de ferro que pode ser adicionada como agregado em misturas de microrrevestimento, tendo sido analisados dados do enquadramento granulométrico e ensaios de comportamento da mistura. A quantidade adicionada de resíduo de minério de ferro em diferentes proporções estudadas no laboratório tem um efeito significativo nos resultados da coesão modificada. Por outro lado, nos ensaios WTAT e LWT não foram observados efeitos significativos.

É muito importante destacar que os resultados obtidos neste estudo só são válidos para os materiais empregados e apresentados neste artigo. Ao se utilizar diferentes materiais, a emulsão asfáltica utilizada para os traços estudados pode ter diferentes reações, pois depende da composição físico-química do agregado, resultando em variações de comportamento.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bibliografia mostrou poucas aplicações do resíduo de minério de ferro em misturas asfálticas, portanto, este trabalho veio contribuir de forma a apresentar a aplicação em misturas com

emulsões asfálticas a frio e em diferentes proporções de maneira a garantir o máximo aproveitamento do resíduo.

Os resultados da análise química mostraram que o resíduo possui altas concentrações de ferro e silício, mas não indicou alta porcentagem de metais pesados, nem a presença de componentes expansivos ou radioativos. Sendo assim, o resíduo não é potencialmente perigoso ao meio ambiente. Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização mostraram-se abaixo dos limites estabelecidos pela norma de resíduos sólidos, o que possibilitou classificar o resíduo como Classe II B - não perigoso e inerte, podendo assim ser usado como agregados em misturas asfálticas.

A caracterização física do resíduo de ferro indica que o mesmo cumpre os requisitos técnicos de um agregado convencional, em termos de equivalente de areia e composição granulométrica, a qual mostrou-se adequada para incorporá-la em misturas asfálticas do tipo MRAF, melhorando o enquadramento nas faixas granulométricas estudadas.

Quanto aos resultados do ensaio de perda por abrasão, o resíduo de ferro forneceu resistência abrasiva ao desgaste em condições saturadas (WTAT) e atendeu ao limite especificado em norma (máximo de 538 g/m²). Quanto à influência do resíduo no excesso de asfalto pela adesão de areia (LWT), todos os resultados atenderam ao parâmetro requerido (máximo de 538 g/m²).

O resíduo de minério de ferro mostrou vantagens técnica e ambiental, uma vez que pode ser empregado como agregado alternativo no uso em misturas asfálticas de microrrevestimento. Em termos de influencia do resíduo nos ensaios de perda por abrasão, pode-se afirmar que todos os ensaios atenderam ao estado limite e o uso do resíduo diminuiu a perda por abrasão em todas as misturas. No caso da influencia do resíduo em ensaio de excesso de asfalto pela adesão de areia, tem-se que todos os resultados atenderam ao parâmetro requerido. Assim, recomenda-se a adoção da mistura com teor máximo investigado de 20% de resíduo de mineração do Fe, tendo em vista a necessidade de se consumir uma quantidade elevada de resíduos para fins de mitigação do impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABEDA: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (2001) *Manual básico de Emulsões Asfálticas – soluções para pavimentar*. Rio de Janeiro.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) *NBR 10004. Resíduos Sólidos - classificação*. Rio de Janeiro.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) *NBR 14746. Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica — Determinação de perda por abrasão úmida (WTAT)*. Rio de Janeiro,
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001) *NBR 14757. Microrrevestimentos e lamas asfálticas - Determinação da adesividade de misturas*. Rio de Janeiro.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2002) *NBR 14798. Microrrevestimentos asfálticos - Determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro*. Rio de Janeiro.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) *NBR 14841. Misturas asfálticas - Determinação da adesão de areia em microrrevestimentos asfálticos a frio por meio da máquina LWT*. Rio de Janeiro.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003) *NBR 14948. Microrrevestimentos asfálticos a frio modificados por polímero - Materiais, execução e desempenho*. Rio de Janeiro.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003) *NBR 14949. Microrrevestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul-de-metileno*. Rio de Janeiro.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *NBR 7171. Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006) *NBR 7809. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Aparecida, L. C. (2014) *Caracterização de rejeito de beneficiamento de minério de ferro em faixas ultrafinas antes e após tratamento térmico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.
- Bastos, L. A. C. (2013) *Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto.

- Bernucci, L. B.; L. M. G. Motta; J. A. P. Ceratti e J. B. Soares (2008) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Petrobras, ABEDA. DOI: 10.13140/2.1.4361.5684
- Brasil (1998) *Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998*. Publicada no Diário Oficial da União em 13 de maio de 1998.
- Campanha, A (2011) *Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade federal de viçosa. Minas Gerais,
- Castro, P. B. (2014) *Avaliação do Emprego de Agregados Alternativos em Microrrevestimento Asfáltico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza.
- Ceratti, J. A. P.; R. M. M. Reis (2011) *Manual de Microrrevestimento Asfáltico a frio- MRAF*. Instituto Pavimentar. Oficina de Textos. São Paulo.
- Coelho, C. F. (2008) *Análise de fluxo de material no processo de preparação do minério de ferro para indústria siderúrgica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro Campos de Goytacazes. Rio de Janeiro.
- CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente (1986) *Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986*. Publicado no D.O.U de 17/2/86.
- Cordeiro, L. C. A (2014) *Caracterização de Rejeito de Beneficiamento de Minério de Ferro em Faixas Ultrafinas antes e Após tratamento Térmico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto.
- DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) *ME 035/98 – Agregados: determinação da abrasão Los Angeles*. 06 p. Rio de Janeiro.
- DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997) *ME 054/97 – Equivalente de areia*. 06 p. Rio de Janeiro.
- DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) *ME 083/98 – Agregados: análise granulométrica*. p 01/05. Rio de Janeiro.
- DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995) *ME 084/95 – Agregados miúdo– Determinação da densidade real*. 03 p. Rio de Janeiro.
- DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) *ME 089/94 – Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio*. 06 p. Rio de Janeiro.
- DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2005) *035/2005 – ES. Pavimentos flexíveis – Micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero – Especificação de serviço*. 09 p. Rio de Janeiro.
- DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010) *128/2010 – EM. Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos – Especificação de material*. 05 p. Rio de Janeiro.
- Door, J. N (1964) *Esboço Geológico do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, Brasil*. Rio de Janeiro.
- Fernandes, G (2005) *Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos*. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília (UnB). Brasília.
- Ferreira, R. F (2007) *Dimensionamento de um Pavimento Experimental para Tráfego de Caminhões Fora-de-Estrada em Planta de Mina*. Dissertação (Mestrado Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto.
- Galhardo, D. C (2015) *Estudo da Viabilidade Técnica do Uso de Rejeitos de Mineração em Camadas Estruturais de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Instituto Militar de Engenharia, IME. Rio de Janeiro.
- IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração (2012) *Informação e análise da Economia Mineral Brasileira, 7ª Edição, Dezembro de 2012*. Disponível em <http://www.ibram.org.br>
- IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração (2014) *Informações sobre a Economia Mineral do Estado de Minas Gerais*. Disponível em <http://www.ibram.org.br>
- IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2012) *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas – Relatório de Pesquisa*. Brasília.
- Pinho Rocha, J. M (2008) *Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos Itabiritos Anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. – Minas Gerais*. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte.
- Presotti, E. S (2002) *Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto.
- Reis, M, M; N. R. Santos (2009) *Uma inovação Tecnológica Para Tratamento de Superfície Microrrevestimento Asfáltico a frio*. Ipiranga asfaltos. São Paulo.
- Reis, M (2005) *Um Estudo da Influência da Granulometria dos Agregados no Desempenho do Microrrevestimento Asfáltico a Frio quanto ao Deslocamento Lateral e Vertical*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas.
- Rosiere, C. A (1996) *As características mineralógicas texturais e de anisotropia dos minérios de ferro como parâmetros geometalúrgicos. Anais. I simpósio Brasileiro de minério de Ferro: caracterização, Beneficiamento e Pelotização*. Ouro Preto.
- Silva, A. H. M (2011) *Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Silva, A. P. M. da; J. P. Viana e A. L. B. Cavalcante (2011) *Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração*. 41 p. Disponível em http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/11_CADDIAG_Res_Sol_Mineraacao.pdf

- Silva, R. G. O. da (2010) *Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Minas Gerais.
- Takehara, L (2004) *Caracterização Geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração sinter feed*. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre.
- Vasconcelos, M. A. G (2013) *Estudo sobre Emprego do Cape Seal em Revestimentos Rodoviários do Estado do Ceará*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza.