

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MAGNETITA EM MISTURAS ASFÁLTICAS E EM CONCRETO: UMA REVISÃO

TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION AND REUSE OF MAGNETITE WASTE IN ASPHALT MIXTURES AND CONCRETE: A REVIEW

Suélien Tonatto Ferrazzo 

Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Porto Alegre (RS), Brasil.

Lucimara Bragagnolo 

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) – *campus* Erechim, Erechim (RS), Brasil.

Eduardo Pavan Korf 

Doutor em Engenharia pela UFRGS. Professor pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da UFFS – *campus* Erechim, Erechim (RS), Brasil.

Endereço para correspondência:

Suélien Tonatto Ferrazzo – Avenida Osvaldo Aranha, 99 – Bom Fim – CEP 90035-190 – Porto Alegre (RS), Brasil – E-mail: suellenferrazzo@hotmail.com

Recebido em: 26/08/2019

Aceito em: 13/12/2019

RESUMO

A magnetita consiste em um mineral com excelentes propriedades magnéticas e mecânicas, estando presente em resíduos da extração de ferro disponíveis mundialmente em milhões de toneladas depositadas em aterros. Ao considerar a variabilidade das características desse material, conforme especificidades da jazida de extração e das operações de processamento e reprocessamento, para a sua aplicação tecnológica é fundamental realizar a caracterização do resíduo. As mais promissoras formas de reaproveitamento do resíduo de magnetita referem-se a sua aplicação em asfalto e em concreto. Nesse contexto, este trabalho aborda as principais técnicas de caracterização tecnológica de resíduos de magnetita e suas contribuições, bem como resultados de estudos da incorporação do subproduto mineral em misturas betuminosas e em concreto. Identificou-se que as técnicas utilizadas analisam os resíduos e/ou o material asfáltico compósito e betão considerando as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e termodinâmicas. Verificou-se que o resíduo de magnetita, como substituinte parcial e integral do material de enchimento, melhorou a resistência à corrosão e às rachaduras das misturas asfálticas. Além disso, o uso de pó de magnetita, extraído do resíduo, melhorou a rigidez e a resposta elástica, bem como promoveu a cura de microfissuras da mistura betuminosa. A incorporação de resíduos do mineral em pó no concreto resultou em melhorias na trabalhabilidade e na resistência do material. As informações desta revisão oferecem um panorama das técnicas de caracterização e das perspectivas de reciclagem dos resíduos de magnetita no setor da construção civil.

Palavras-chave: resíduos de minério de ferro; tratamento; solidificação e estabilização; agregados; asfalto e material cimentício.

ABSTRACT

Magnetite consists of a mineral with excellent magnetic and mechanical properties and is present in iron extraction waste, which is available worldwide in millions of tons deposited in landfills. When considering the variability of the characteristics of this material, according to the specificities of the extraction and processing and reprocessing operations, it is essential for its technological application to characterize the waste. The most promising forms of reuse of magnetite waste refer to its application to asphalt and concrete. In this context, this work approaches the main techniques of technological characterization of magnetite waste and their contributions, as well as results of studies of the incorporation of the mineral byproduct in bituminous and concrete mixtures. It was identified that the techniques used analyze the waste and/or composite asphalt material and concrete considering the physical, chemical, mineralogical and thermodynamic properties. Magnetite waste, as a partial and integral substituent of the filler material, has been found to improve the corrosion and cracking resistance

of asphalt mixtures. In addition, the use of magnetite dust extracted from the residue improved stiffness and elastic response, as well as curing bituminous micro-cracks. The incorporation of powdered mineral residues into concrete resulted in improvements in the workability and strength of the material. The information in this review provides an overview of the characterization techniques and prospects for recycling magnetite waste in the construction sector.

Keywords: iron ore waste; treatment; solidification and stabilization; aggregates; asphalt and cementitious material.

INTRODUÇÃO

A acelerada expansão da indústria siderúrgica desencadeou a crescente geração de resíduos de minério de ferro, que são considerados um dos principais resíduos sólidos industriais, representando expressivas quantidades em todo o mundo (CHEN *et al.*, 2011; GIUSTOZZI *et al.*, 2018; KOSSOFF *et al.*, 2014). Na China, das 5,97 bilhões de toneladas de resíduos da mineração dispostas em aterros, aproximadamente um terço corresponde a resíduos de ferro (CHEN *et al.*, 2011). Já na Austrália Ocidental, são geradas 632 milhões de toneladas de resíduos de minério de ferro por ano (KURANCHIE *et al.*, 2015). No Brasil, em 2014, estimou-se que 275,5 milhões de toneladas foram destinadas a aterros e barragens de rejeitos (DAUCE *et al.*, 2019). Com a elevada geração desses resíduos e o pouco reaproveitamento, passou-se a ocupar extensas áreas de terra e a acarretar problemas ambientais e sociais, como contaminação do solo e de recursos hídricos, toxicidade nas cadeias alimentares e riscos à saúde humana (BURD, 2002; DINO *et al.*, 2018; HAMMARSTROM *et al.*, 2005; KOSSOFF *et al.*, 2014; MEHTA *et al.*, 2018; MORENO; NERETNIEKS, 2006; WANG *et al.*, 2016c).

Entre os resíduos da mineração de ferro, destacam-se os resíduos de magnetita (RM), que são oriundos do processamento do referido mineral (Fe_3O_4), apresentam baixo custo e são utilizados na produção de aço e produtos de ferro (GIUSTOZZI *et al.*, 2018). Diversos estudos relatam que os RM são gerados de modo contínuo em elevadas quantidades (PATTI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2016c), entretanto dados específicos sobre a sua geração são escassos na literatura. Na China, estima-se que são geradas, todo ano, 700 milhões de toneladas de RM e que somente 20% dessa parcela é reaproveitada (WANG *et al.*, 2016c). No Brasil, especificamente na indústria de

mineração Anglo American Fosfatos, tem-se geração anual de dois milhões de toneladas de resíduos, sendo uma parcela de 40% correspondente à magnetita. Para Tomáz *et al.* (2015), ao considerar uma taxa de recuperação de 60%, o reaproveitamento desse subproduto da mineração resultaria em um adicional de 78,5 milhões de dólares no produto interno bruto (PIB) do estado de Goiás (GO). Ainda, no município de Catalão (GO), a indústria de beneficiamento de rocha fosfática gera 230 toneladas/hora de RM (equivalente a 30% da alimentação da planta), que são dispostas em barragens de rejeitos (SILVA; MENDES; SILVA, 2016).

Com a finalidade de garantir o fornecimento de matérias-primas oriundas da extração mineral, recentes avanços econômicos e geopolíticos estão sendo direcionados à reutilização e à reciclagem dos produtos residuais da mineração (DINO *et al.*, 2018). No decorrer dos últimos anos, o uso dos resíduos passou a despertar maior interesse em função dos benefícios econômicos provenientes dos processos de recuperação de ferro e outros metais, entretanto tais atividades ainda enfrentam problemas de descarte de resíduos e poluição secundária. Uma alternativa eficiente e promissora para recuperação do recurso é a utilização dos resíduos de ferro para a fabricação de materiais construtivos, pois não gera resíduos (CHEN *et al.*, 2011), reduz a necessidade de extração de recursos naturais, disponibiliza uma nova matéria-prima às indústrias do setor da construção civil e possibilita a redução de custos na produção (CHEN *et al.*, 2011; KURANCHIE *et al.*, 2015).

Algumas técnicas já vêm sendo adotadas para recuperação do mineral de ferro ou extração do pó ou nanopartículas de magnetita dos resíduos (GIRI;

DAS; PRADHAN, 2011; KUMAR *et al.*, 2015; SAKTHIVEL *et al.*, 2010). Todavia, a quantidade reaproveitada é muito pequena. Portanto, é necessária a utilização mais ampla dos RM. Nesse cenário, pesquisas estão sendo desenvolvidas na busca por resíduos que possam ser utilizados como materiais alternativos em misturas asfálticas, amplamente aplicadas na estrutura de base e superfície de pavimentos. Na engenharia de pavimentação há grande demanda por misturas asfálticas e, por agregados como calcário e basalto, porém a oferta dessas matérias-primas está limitada em razão de fatores de produção e preservação ambiental. Outra alternativa promissora de aplicação dos RM consiste no uso como substituinte dos agregados naturais do concreto (CAI *et al.*, 2011b; KURANCHIE *et al.*, 2015). Sendo assim, a substituição desses agregados convencionais por resíduos representa expressivo impacto na reciclagem de produtos residuais e na proteção ao meio ambiente (WANG *et al.*, 2016c).

A aplicação dos RM nos materiais de construção civil supracitados ocorre por meio de tratamentos de solidificação e/ou estabilização nas distintas matrizes. Na mistura asfáltica, os resíduos incorporados como substituinte parcial dos agregados, ao serem misturados com os demais componentes e ao betume (agente ligante), aglutinam-se e geram uma matriz rígida (GIUSTOZZI *et al.*, 2018; PATTI *et al.*, 2018). No concreto, os RM são estabilizados por meio de reações químicas entre os componentes amorfos (óxidos de sílica e alumínio) dos RM com os íons Ca^+ (resultantes da hidratação do cimento), que promovem reações pozolânicas e a formação de produtos cimentantes e posteriormente o endurecimento e enrijecimento da matriz compósita (CAI *et al.*, 2011b).

Em razão do potencial de aplicação de resíduos da extração de ferro no setor de construção, os materiais naturais que contêm magnetita destacam-se por corresponder a uma matéria-prima de baixo custo, que apresenta excelentes propriedades magnéticas e mecânicas, tais como capacidade de absorção de micro-ondas, elevada resistência à compressão e maior durabilidade, que são fundamentais para o uso como agregados em misturas asfálticas (BOON; MARIATTI, 2014; GHAZANFARI; YAZDANI, 2015; WANG *et al.*, 2016b). No caso da utilização de resí-

duos de magnetita como agregados em concreto, alguns estudos apontam que a aplicação da magnetita é capaz de aprimorar propriedades de proteção contra a radiação desses materiais (GUR; ARTIG; CAKIR, 2017; HORSZCZARUK; SIKORA; ZAPOROWSKI, 2015; JASKULSKI *et al.*, 2019; KUBISSA; GLINICKI; DAŁBROWSKI, 2018), ou de melhorar determinadas propriedades mecânicas (CAI *et al.*, 2011a, 2011b; SILVA; MENDES; SILVA, 2016).

Ao considerar que os resíduos da mineração podem compreender partículas grosseiras, rochas intemperizadas, fragmentos de rochas recentemente expostas, sedimentos e argilas, a sua composição física e química apresenta significativa variabilidade conforme o composto extraído e a origem da formação geológica da jazida. Visando à aplicação em materiais de construção, a identificação das propriedades desse resíduo é essencial para poder definir necessidades de adequação de variadas frações, ou combinações delas, e técnicas de segregação para recuperação da concentração do mineral. Permite, ainda, detectar a possível presença de contaminantes adicionais que ao longo do tempo possam causar impactos ambientais negativos (YELLISHETTY *et al.*, 2008). A caracterização auxilia também na compreensão das interações físicas e químicas entre o resíduo e os demais compostos constituintes de um material (produto) e na conseqüente influência na estrutura e no comportamento do material compósito (GIUSTOZZI *et al.*, 2018). Segundo Borges, Luz e Ferreira (2008), as informações sobre as propriedades dos resíduos de minerais favorecem a viabilização do seu aproveitamento como subproduto no próprio local de geração ou em outro setor.

Nesse contexto, este trabalho aborda as principais técnicas utilizadas na caracterização dos RM, das misturas asfálticas e do concreto fabricados com a incorporação do mineral, bem como estudos da literatura sobre essa aplicação. Esta revisão fornece um panorama da caracterização tecnológica do resíduo mineral e das contribuições de sua incorporação em materiais construtivos, sendo de grande relevância para pesquisadores da temática de reaproveitamento de resíduos na construção civil e para despertar perspectivas de pesquisas futuras.

METODOLOGIA

Este estudo constitui-se de uma revisão bibliográfica referente às técnicas de caracterização e às aplicações de RM em misturas asfálticas e em concreto. O levantamento literário foi realizado mediante pesquisas nos bancos de dados Biblioteca Eletrônica Científica Online (SciELO), ScienceDirect, Scopus e Web of Science. Para tanto, pesquisou-se por título, resumo e palavras-chave utilizando os termos: “magnetita”, “resíduos de magnetita”, “caracterização”, “mistura asfáltica”, “pavimento asfáltico”

e “concreto”. Foram selecionados os estudos que realizaram a identificação das propriedades dos resíduos de minério de ferro/magnetita e do mineral extraído do reprocessamento de resíduos, bem como de pesquisas que também aplicaram esse subproduto em misturas asfálticas e em concreto. Considerando que o foco da aplicação é o reaproveitamento de resíduos da mineração, foram descartados trabalhos que não utilizaram magnetita extraída dos resíduos oriundos dessa atividade.

TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Na literatura, os estudos acerca da incorporação de RM em pavimento asfáltico ainda são muito recentes e escassos. Todavia, encontrou-se um número mais expressivo de trabalhos que realizaram somente a caracterização desse resíduo da mineração. Ambos os tipos de estudo utilizaram diferentes técnicas de caracterização, que em geral visavam determinar a distribuição granulométrica e a morfologia das partículas, além da composição química e mineralógica dos resíduos, bem como dos materiais fabricados com o uso do resíduo.

No Quadro 1 estão sumarizadas as técnicas utilizadas para caracterização dos RM ou do mineral de ferro extraído de resíduos da mineração, bem como das misturas asfálticas e de concreto fabricados com incorporação da carga mineral. Além disso, apresenta-se a resposta esperada para cada técnica e os respectivos estudos da literatura, que serão descritos após esse resumo.

Análise granulométrica e granulometria a laser

A caracterização mais básica de resíduos da mineração de ferro (que incluem a magnetita) consiste na determinação da distribuição granulométrica desses resíduos, sendo utilizada em associação com outras técnicas para complementação de informações. Com base nessa análise, é possível identificar necessidades de adequações ou seleção das frações granulométricas para reaproveitamento dos resíduos.

A granulometria de resíduos de minérios de ferro (Figura 1), oriundos de rocha carbonática, foi realizada por Borges, Luz e Ferreira (2008) seguindo a metodologia da NBR 7181 (ABNT, 1984), em que se constatou um d_{80} de 0,42 mm (80% da amostra passante em 420 μm). Tal característica potencializa o uso do subproduto como material de enchimento em pavimento asfáltico, conforme

será explicado em seguida. Essa análise, em conjunto com a microscopia ótica e a difração de raios X, permitiu constatar que o ferro estava presente de forma mais concentrada nas frações mais finas e revelou a presença de P_2O_5 em teor superior ao especificado para o minério de ferro ($P < 0,04\%$). Esse resultado demonstra a importância da caracterização dos resíduos para verificar a possível presença de um composto, que em teor acima do limite máximo exigido corresponde a um contaminante e nesse caso pode haver a necessidade de um pré-tratamento do resíduo, anterior à sua aplicação.

Patti *et al.* (2018) determinaram a distribuição granulométrica de duas amostras de magnetita (I e II) (Figura 2) para complementar as informações da morfologia das partículas obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura. Observou-se que a magnetita I apresentava menos partículas de tamanho médio (8–30 μm) do que a amostra II. Visando ao uso dessas partículas em mistura com betume, conhecer a granulometria torna-se fundamental para averiguar a necessidade de pré-tratamento para adequação do tamanho das partículas. Ao considerar que na pavimentação asfáltica usualmente o material de enchimento apresenta partículas de tamanho inferior a 75 μm (GIUSTOZZI *et al.*, 2018), não houve a necessidade de adequação da granulometria das partículas das amostras de magnetita.

Cabe destacar que Patti *et al.* (2018) demonstraram que é possível obter elevada taxa de aquecimento (50°C.s⁻¹) utilizando uma mistura composta (betume e magnetita) de 1 mm de espessura, sem a necessidade de pré-tratamento adicional para aumentar a área específica das partículas do mineral. Essa constatação aponta para um grande potencial dessa aplicação em usinas de asfalto. Também, visando à posterior apli-

Quadro 1 – Técnicas de caracterização de resíduos de magnetita (RM) e misturas asfálticas e concreto com carga mineral.

Técnica	Resposta	Estudo
Análise granulométrica e granulometria a laser	Distribuição granulométrica/tamanho de partículas de resíduo/magnetita	Borges, Luz e Ferreira (2008) Patti <i>et al.</i> (2018) Giustozzi <i>et al.</i> (2018) Dauce <i>et al.</i> (2019) Cai <i>et al.</i> (2011a) Cai <i>et al.</i> (2011b)
Microscopia eletrônica de varredura e Criomicroscopia eletrônica de varredura	Morfologia das partículas de resíduo/magnetita e distribuição do mineral na mistura asfáltica	Wang <i>et al.</i> (2016c) Patti <i>et al.</i> (2018) Giustozzi <i>et al.</i> (2018) Wang <i>et al.</i> (2016a)
Microscopia ótica	Morfologia dos minerais dos RM	Borges, Luz e Ferreira (2008)
Espectroscopia de dispersão de elétrons e Espectrometria de plasma	Composição química (óxidos ou elementar)	Gomes, Pereira e Peres (2011) Wang <i>et al.</i> (2016c) Patti <i>et al.</i> (2018) Giustozzi <i>et al.</i> (2018)
Espectrometria de infravermelho	Ligações químicas e de grupos funcionais moleculares das misturas asfálticas	Wang <i>et al.</i> (2016c)
Difração de raios X	Composição mineralógica dos resíduos da mineração de ferro/de magnetita e do concreto com carga mineral	Borges, Luz e Ferreira (2008) Gomes, Pereira e Peres (2011) Wang <i>et al.</i> (2016c) Dauce <i>et al.</i> (2019) Cai <i>et al.</i> (2011a) Wang <i>et al.</i> (2016a) Cai <i>et al.</i> (2011b) Tang <i>et al.</i> (2019)
Espectrometria Mössbauer	Quantificação de minerais da mineração de ferro (magnetita)	Borges, Luz e Ferreira (2008)
Calorimetria diferencial de varredura	Fluxo de calor e calor específico em função da temperatura do masticado asfáltico com magnetita	Patti <i>et al.</i> (2018)

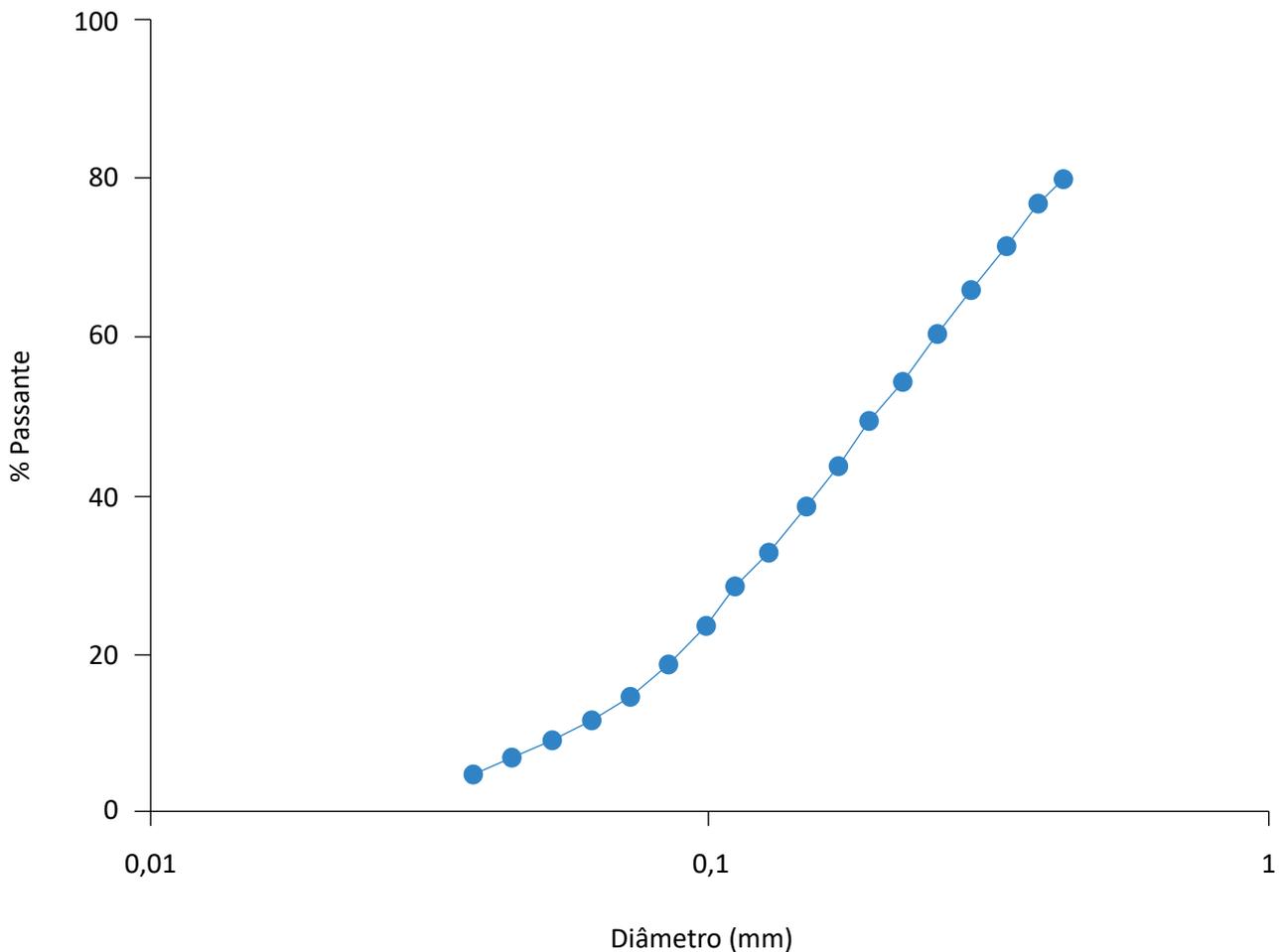
cação em material cimentício, Cai *et al.* (2011a) e Cai *et al.* (2011b) submetem os RM moídos à distribuição granulométrica (Figura 3) para determinação do módulo de finura e da gradação adequada para a incorporação da carga mineral no concreto. Verificou-se que os RM continham 2,2% de microfinos e módulo de

finura de 2,7. Em alguns casos, para a gradação ótima do material de enchimento do concreto, partículas do mineral com tamanho inferior a 75 µm não são utilizadas (CAI *et al.*, 2011b). Já na incorporação em concreto espumado, partículas de maior finura contribuem para a resistência do material (CAI *et al.*, 2011a).

Microscopia eletrônica de varredura e criomicroscopia eletrônica de varredura

Diversos estudos acerca da caracterização de RM visando a seu uso em substituição dos agregados naturais em misturas asfálticas têm utilizado a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para determinação da morfologia das partículas desses resíduos.

Por meio de imagem de MEV dos RM (Figura 4), Wang *et al.* (2016c) observaram que esses resíduos eram constituídos de partículas angulosas, característica que pode contribuir para formação de uma estrutura intertravada e elevar a capacidade do asfalto em suportar falhas pela formação de sulcos.

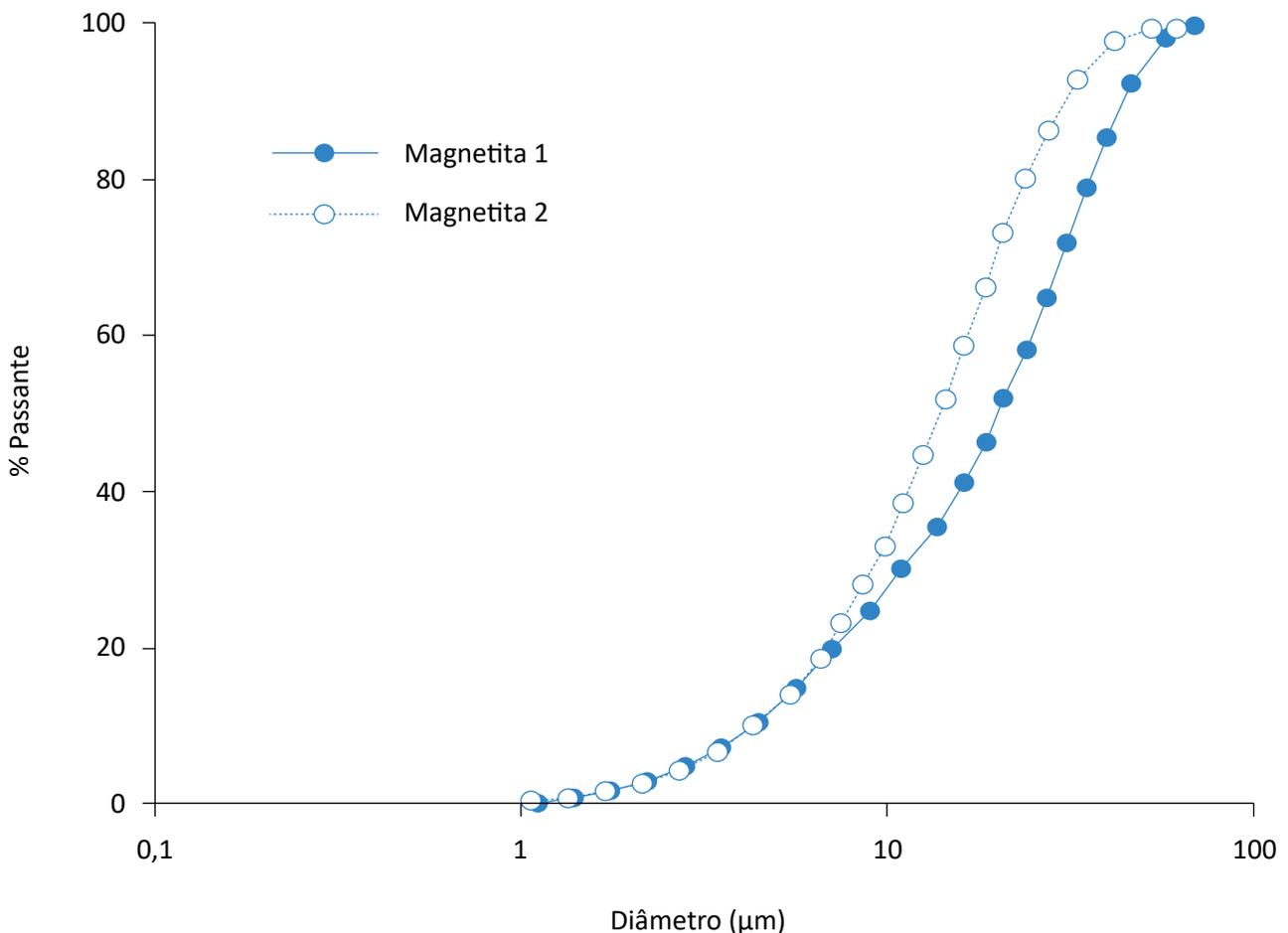


Fonte: adaptado de Borges, Luz e Ferreira (2008).

Figura 1 – Análise granulométrica do resíduo magnético de tapira.

No estudo de Patti *et al.* (2018), a análise de MEV de duas amostras de magnetita (magnetita I e II), oriundas de resíduos de diferentes locais de mineração, possibilitou observar que as amostras são constituídas por partículas de formato irregular e de tamanho variável, conforme Figura 5. As partículas da magnetita I apresentavam formato mais alongado e afiado nas bordas. Já a amostra II apresentava formato esférico e bordas arredondas. O formato das partículas do resíduo mineral irá contribuir para a rigidez da matriz do material em que ele será inserido como agregado. As partículas mais angulares (amostra I) tendem a influenciar a formação de uma estrutura com intertravamento, ângulo de atrito interno e resistência superiores em relação à amostra II (composta de partículas arredondadas). Esse comportamento também é favorecido pela granulometria bem graduada do resíduo, apresentada anteriormente.

Patti *et al.* (2018) também utilizaram a criomicroscopia eletrônica de varredura (Crio-MEV) para averiguar se houve distribuição homogênea da magnetita na matriz de betume, fator importante para obter um aquecimento uniforme do mastiche asfáltico. As imagens obtidas por meio de Crio-MEV (Figura 6) permitiram observar que não houve a formação de aglomerado (distribuição heterogênea) de magnetita nas misturas betuminosas. Ao comparar as imagens das amostras com distintas relações carga mineral/betume, é possível notar nas Figuras 6B e 6C, sobretudo na ampliação da Figura 6C, que uma relação mais elevada resultou em maiores áreas com superfície lisa (betume-fase única), enquanto na menor relação (Figura 6A) há maior presença de cristas e picos fragmentados (fase da magnetita).



Fonte: modificado de Patti *et al.* (2018).

Figura 2 – Análise granulométrica da magnetita I e da magnetita II.

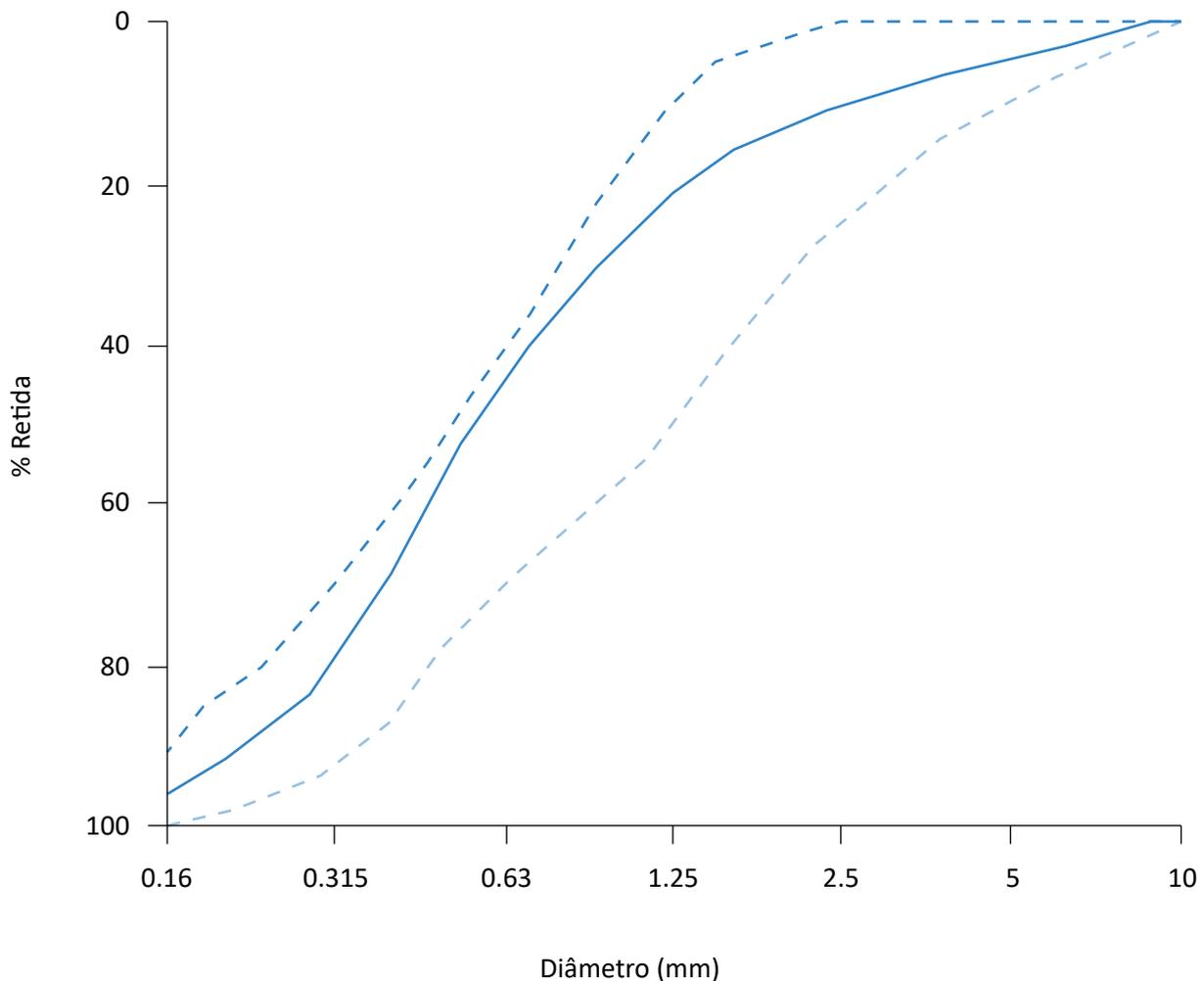
Segundo Giustozzi *et al.* (2018), é importante conhecer o tamanho e a morfologia das partículas da magnetita, pois essas características influenciam nas propriedades

Microscopia ótica

Borges, Luz e Ferreira (2008) utilizaram a microscopia ótica (Figura 7) de forma a complementar a técnica de difração de raios X (DRX), auxiliando na identificação dos minerais presentes na amostra de resíduos provenientes de uma rocha carbonática. Os autores notaram que a magnetita apresenta coloração rosada e está em fase

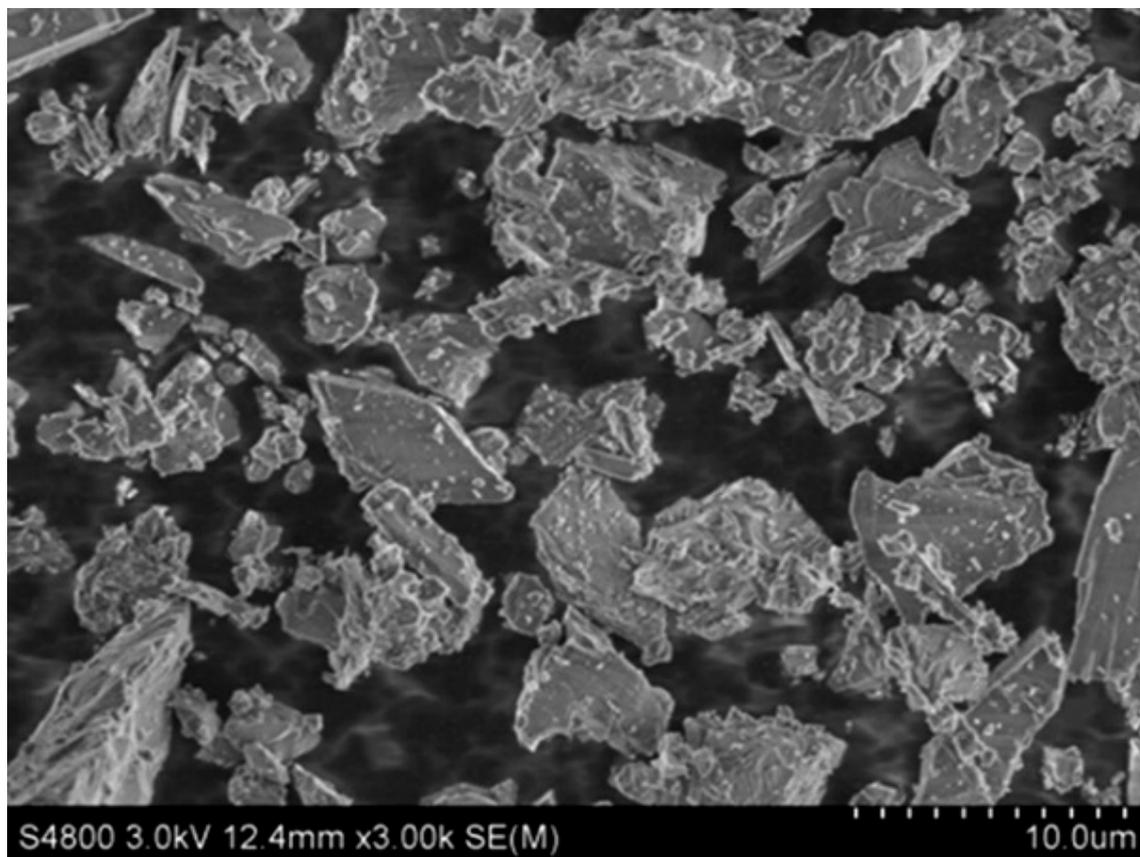
reológicas do mastique asfáltico compósito e consequentemente na trabalhabilidade desse material nas usinas de asfalto.

de martitização (processo de transformação em hematita pseudomórfica), desenvolvendo-se nas bordas em direção ao centro das partículas (Figura 7A). Já a ilmenita está presente de forma lamelar e intercrescida nas partículas de magnetita (Figura 7B), condição que pode dificultar a concentração seletiva dos dois minerais.



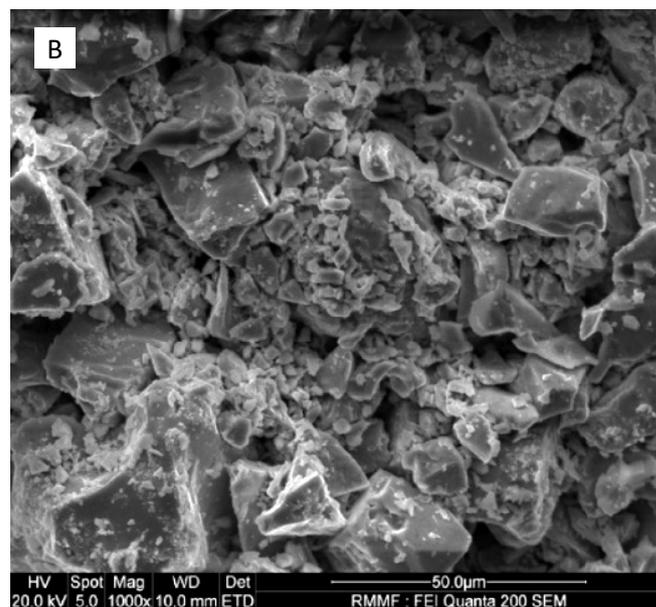
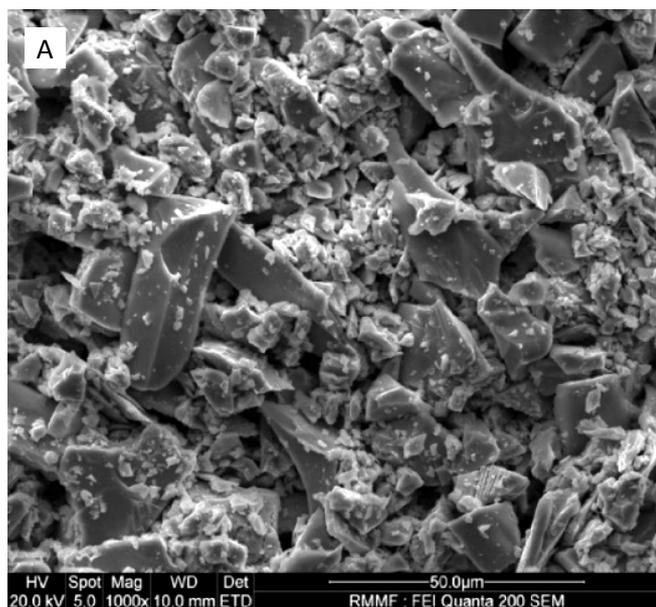
Fonte: modificado de Cai et al. (2011a).

Figura 3 – Análise granulométrica do resíduo de magnetita (RM) moído para ser utilizado como agregado fino na produção de concreto.



Fonte: Wang *et al.* (2016c).

Figura 4 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura dos resíduos de magnetita (RM).



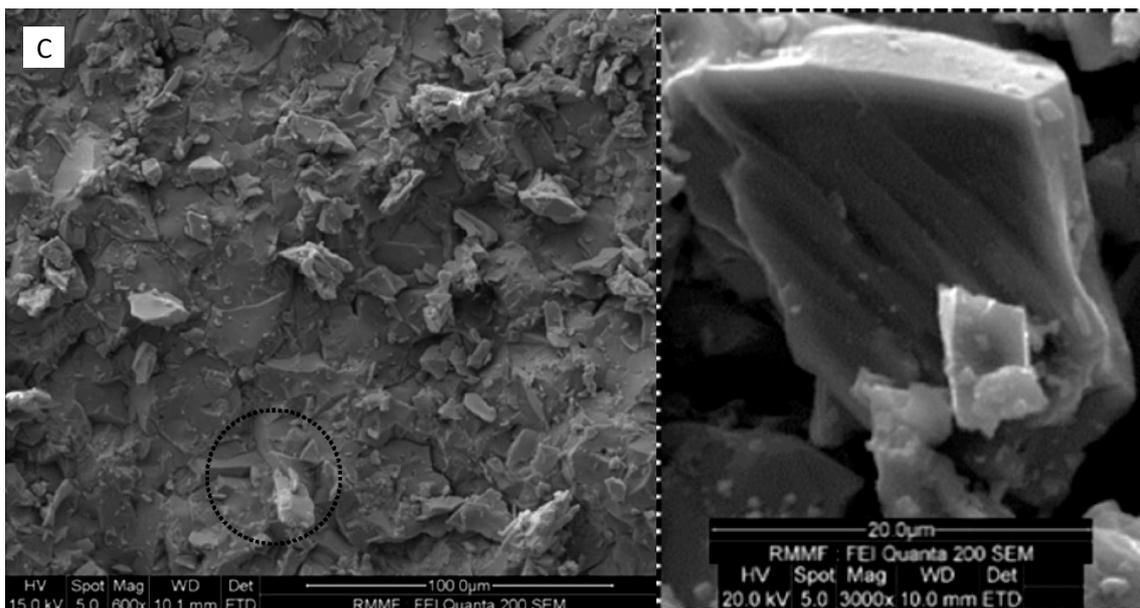
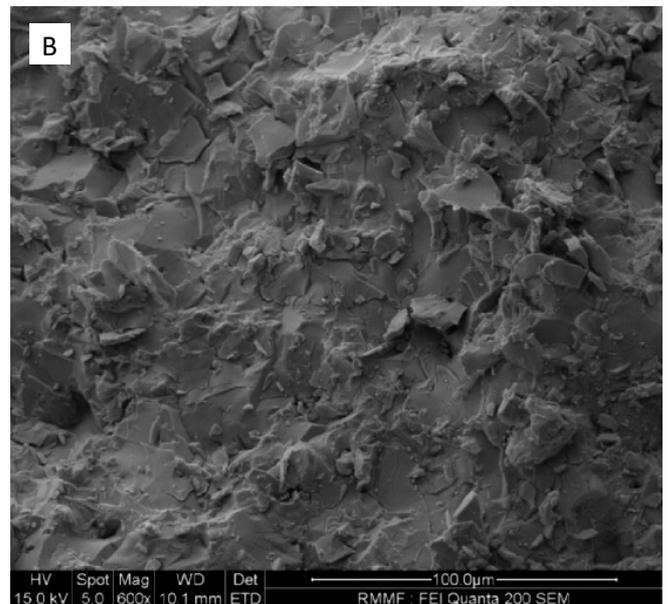
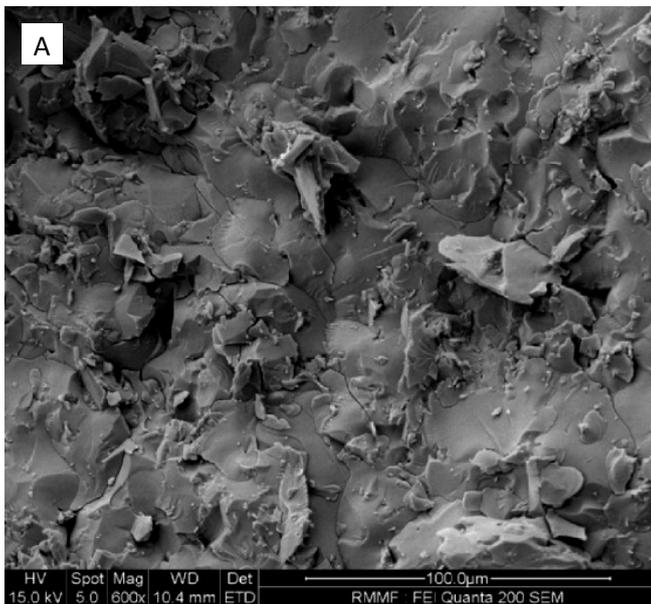
Fonte: Patti *et al.* (2018).

Figura 5 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura da (A) magnetita I e da (B) magnetita II.

Espectroscopia de dispersão de elétrons e espectrometria de plasma

A espectroscopia de dispersão de elétrons (EDE), ou também conhecida como espectroscopia de energia dispersiva, é uma técnica utilizada para determinação dos elementos químicos constituintes da amostra de magnetita, sobretudo para quantificação de ferro, além da possível presença de contaminantes.

Wang *et al.* (2016c) utilizaram a EDE para determinar quantitativamente a composição química dos RM moídos e observaram que a constituição majoritária consistia em óxidos e sílica (81,66%) e 4,82% de ferro. Além disso, não foi detectada a presença de metais pesados, os quais poderiam apresentar potencial de poluição e toxicidade ambiental.



Fonte: Patti *et al.* (2018).

Figura 6 – Imagem de criomicroscopia eletrônica de varredura de C170-magnetita I com carga/betume (A) 0,5, (B) 1,0 e (C) 1,5.

Na pesquisa de Patti *et al.* (2018), os resultados de EDE permitiram verificar que as duas amostras de magnetita avaliadas eram constituídas, de modo predominante, de ferro (79,1 e 71,4%) e oxigênio (20,7 e 23,1%), além de uma parcela residual de silício (0,2 e 1,0%), possivelmente em função de a superfície do suporte para acondicionar o resíduo na análise de EDE conter esse elemento. Uma das amostras apresentou 4,5% de

Espectrometria de infravermelho

A espectrometria de infravermelho tem sido utilizada em pesquisas que contemplam a incorporação de RM em asfalto, para fazer a caracterização de ligações químicas e de grupos funcionais moleculares das misturas asfálticas, como no estudo de Wang *et al.* (2016c). Com base nessa técnica, os autores examinaram a presença do íon hidroxila (OH⁻) gerado por meio da adição de cal hidratada na mistura asfáltica com RM e identificado pelo pico em 3644,09 cm⁻¹ (Figura 8). De acordo com os autores, íons hidroxila

Difração de raios X

A técnica de DRX foi realizada para identificação das fases cristalinas constituintes dos RM e para compreensão do comportamento mecânico dos RM e do material em que foram incorporados.

Em estudos como de Borges, Luz e Ferreira (2008), Gomes, Pereira e Peres (2011) e Dauce *et al.* (2019),

carbono, que pode ser proveniente do tratamento de lavagem após a extração no local da mineração.

Além da técnica de EDE, a composição química dos resíduos também pode ser determinada por espectrometria de plasma. Gomes, Pereira e Peres (2011) constataram que os resíduos apresentavam teores de Fe, SiO₂ e Al₂O₃ de 48,08, 20,58 e 3,16%, respectivamente.

elas podem contribuir para maior aderência entre as interfaces do asfalto com o agregado, melhorando a propriedade de estabilidade da água das misturas asfálticas. Isso pode ser explicado em função de os íons hidroxila (disponibilizados pela cal) promoverem a dissolução de sílica e alumínio amorfos presentes nos agregados, resultando na formação de géis de silicatos e aluminatos, que, por sua vez, atuam como ligantes (agentes cimentantes) das partículas, aumentando a resistência do material.

foram caracterizados os resíduos da mineração de ferro, visando analisar a composição mineralógica dos resíduos, incluindo a magnetita. Borges, Luz e Ferreira (2008) aplicaram a DRX em resíduos da concentração de minério para análise dos minerais presentes na amostra, o que possibilitou identificar a presença de magnetita, hematita e ilmenita.

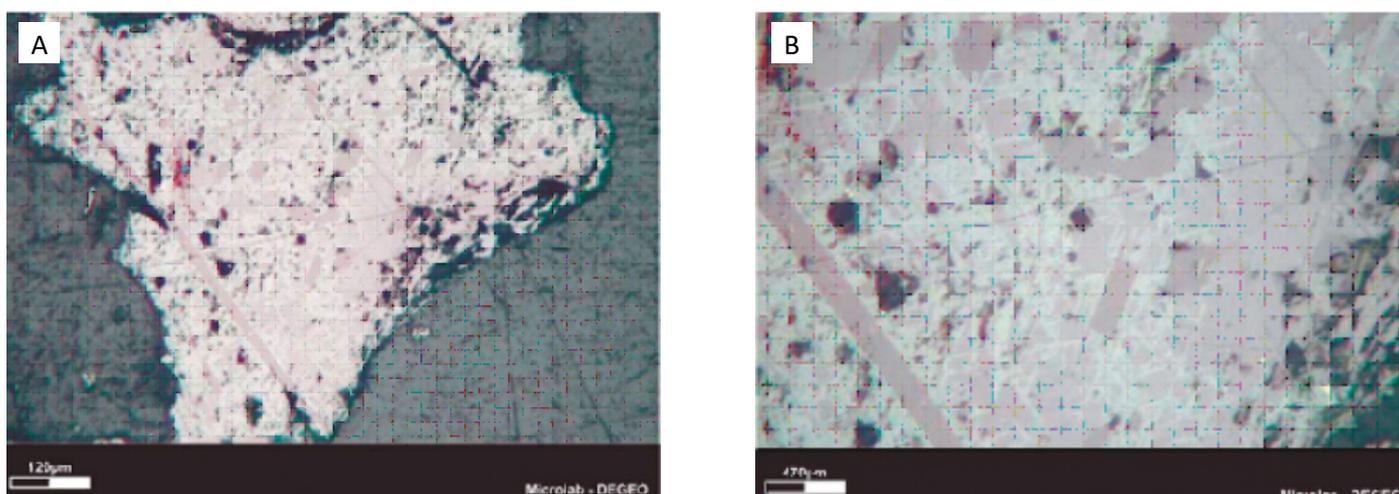
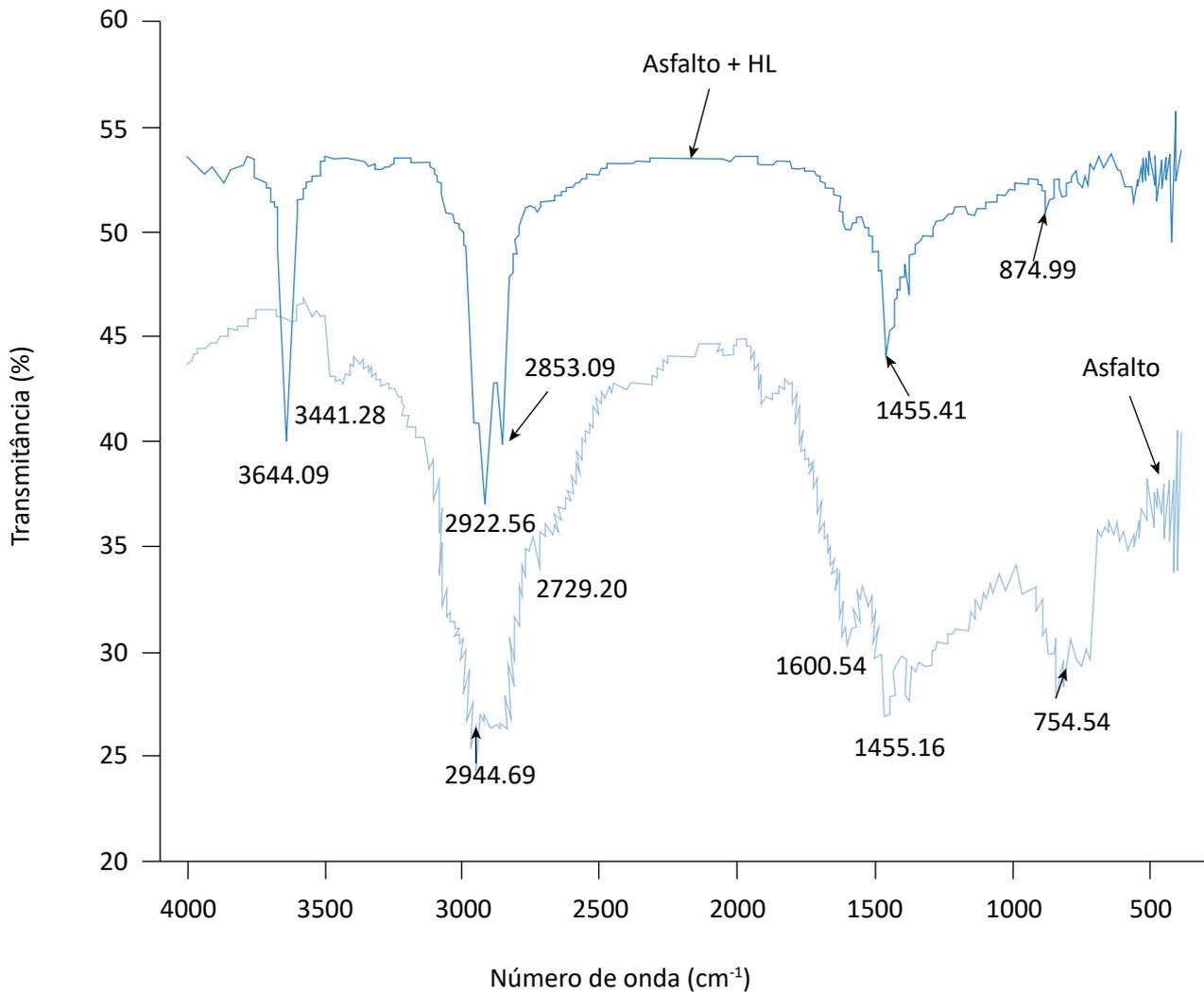


Figura 7 – Microscopia ótica de resíduos de rocha carbonática. (A) Partícula apresentando martitização e ilmenita intercrescida; (B) detalhe da fotomicrografia da figura (A).

Na determinação da composição mineralógica de resíduos de uma barragem de minérios de ferro, por meio de DRX, Gomes, Pereira e Peres (2011) verificaram a presença de magnetita, hematita, martita e goethita, além de quartzo, gibbsita e caulinita. Resultados semelhantes foram obtidos por Dauce *et al.* (2019), que detectaram a presença de quartzo, hematita, goethita e magnetita em resíduo de minério de ferro. Já no estudo de Tang *et al.* (2019), a análise qualitativa da composição mineralógica mostrou a presença quartzo, magnetita, hematita, clorita e hornblenda. Na mineralogia dos resíduos provenientes de diferentes jazidas, é notória a presença conjunta de quartzo e hematita associados à

magnetita. Caracterização adicional poderia ser realizada para quantificação dos minerais por meio do método de Reitveld (KÖNIG; PÖLLMANN; ANGÉLICA, 2002), o que auxiliaria na determinação da forma de aplicação mais adequada.

Já Wang *et al.* (2016c) observaram que os RM apresentam enstatita e anortita como minerais constituintes majoritários, além de tremolita e clorita. A enstatita e a anortita apresentam valores de dureza (5–6 e 6–6,5 mohs, respectivamente) superiores ao do agregado natural, calcário (calcita 3 mohs) e, como tais minerais são mais duros, os RM podem apresentar maior resistência à força de formação de sulcos ou deforma-



Fonte: Wang *et al.* (2016c).

Figura 8 – Espectro de infravermelho do asfalto antes e depois da adição de cal hidratada.

ções durante o teste de estabilidade dinâmica à alta temperatura, que é realizado em concordância com a especificação chinesa (CHINA, 2011).

Cai *et al.* (2011b) utilizaram a DRX para avaliar a mineralogia da argamassa do concreto contendo diferentes teores de RM em pó (5, 10 e 20%). Foi possível identificar que com o aumento do teor de RM há redução da presença de fases cristalinas de hidróxido de cálcio na amostra. Esse composto reage quimicamente com os constituintes pozolânicos dos resíduos em pó, o que implica redução da sua presença na argamassa. Em outro estudo, Cai *et al.* (2011a) apontaram que os RM

Espectrometria Mössbauer

A espectrometria Mössbauer é uma técnica não-destrutiva associada às medidas de ressonância em sólidos que possibilita analisar a estrutura mineralógica e identificar as fases minerais constituintes de agregados multifásicos, como rochas, sedimentos e solos (HERZENBERG; RILEY, 1970), sendo uma das ferramentas mais confiáveis para quantificação de magnetita em solos (VODYANITSKII; SAVICHEV, 2017), entretanto ainda é pouco utilizada para a caracterização de RM.

Quanto à caracterização de resíduos contendo magnetita, a técnica supracitada foi utilizada no estudo de

Calorimetria diferencial de varredura

Visando estudar o comportamento do mastique asfáltico composto de betume e magnetita, Patti *et al.* (2018) utilizaram a técnica de calorimetria diferencial de varredura (DSC) para avaliar as propriedades associadas ao aquecimento desse material compósito. Nessa análise, aferiu-se a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura da amostra, obtendo-se assim resultados de fluxo de calor e calor específico em função da temperatura. Os autores averiguaram que a magnetita extraída do reprocessamento de resíduos, em uma mineração na Austrália (amostra II) apresentava calor específico superior ao da extraída no Reino Unido (amostra I), sendo necessária assim maior quantidade de calor para gerar aumento de temperatura na amostra mineral II. Ao confrontar esses resultados com as informações

moídos eram compostos de quartzo, feldspato de potássio, anortita e magnetita.

Wang *et al.* (2016a) aplicaram a técnica supracitada para investigar as fases minerais dos resíduos de minério de ferro a serem aplicados na produção do concreto, em conjunto com ganga de carvão (GC). Com base nessa aplicação, foi possível observar a presença da magnetita e de outros minerais. A DRX também foi utilizada para avaliar a mineralogia das amostras de concreto antes e após serem submetidas ao processo de autoclavagem, sendo descrita na sequência deste artigo.

Borges, Luz e Ferreira (2008) para determinar compostos que contenham ferro em sua estrutura, em resíduos de uma rocha carbonática. Essa análise possibilitou quantificar o teor de magnetita, hematita e ilmenita presentes na amostra em 69, 23 e 6%, respectivamente. Para complementar essa caracterização, poderia ser realizada a quantificação dos diferentes estados de oxidação do ferro, sobretudo a razão de íons ferro ferroso e ferro férrico (Fe^{+2} e Fe^{+3}) (CETEM, 2010; MAASS *et al.*, 2019). Visando à aplicação em asfalto, tais informações seriam importantes para estudar as propriedades magnéticas do mineral e a taxa de aquecimento de misturas betuminosas contendo magnetita.

provenientes da granulometria e da espectroscopia de dispersão de elétrons, verificou-se que, apesar de a magnetita I apresentar granulometria maior e conseqüente menor área específica, ela apresenta maior teor de ferro (79,1%) do que o mineral II (71,4%). Portanto, o potencial de aquecimento em virtude do campo eletromagnético é aumentado com a maior presença de ferromagnético.

Ainda conforme Patti *et al.* (2018), correlacionar os dados de calor específico com a potência por unidade de superfície da mistura e com a corrente elétrica (do aquecedor por indução) possibilita obter informações valiosas para determinar a potência requerida para o aquecedor por indução aquecer um volume específico de pavimento asfáltico em larga escala.

APLICAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS E EM CONCRETO

O levantamento de trabalhos da literatura que aplicaram RM ou o mineral extraído do reprocessamento de resíduos da mineração em misturas asfálticas resultou em um número escasso, sendo o primeiro estudo publicado em 2016.

Wang *et al.* (2016c) avaliaram a substituição parcial e integral de calcário por RM moídos (mineração na China) como agregado na forma de *fillers* em misturas asfálticas, com e sem adição de cal hidratada (0 a 2%). Foram avaliados os efeitos dos resíduos nas propriedades de alta e baixa temperatura (estabilidade dinâmica e deformação, respectivamente das misturas). Investigou-se também a estabilidade em água para analisar a adesão da interface agregado-asfalto, conforme a metodologia da Norma JTG E20-2011. Os autores verificaram que a adição de cal hidratada melhora a adesão entre agregado e asfalto, bem como a estabilidade em água das misturas contendo RM. O uso desse resíduo demonstrou contribuir para a melhoria na resistência dinâmica a alta temperatura (anticorrosão) das misturas de asfalto e para a ligeira redução da resistência de divisão (rachadura) a baixa temperatura. Ainda, com o aumento do teor de resíduos nas misturas, observou-se o aumento da razão de resistência à divisão (rachadura) por ciclos de congelamento e descongelamento, superando a exigência mínima da regulamentação chinesa, que é de 80%.

A pesquisa de Giustozzi *et al.* (2018) utilizou pó de magnetita extraída do reprocessamento de resíduos em locais de mineração do Reino Unido e da Austrália, para substituir a carga de calcário natural na mistura asfáltica na forma de *fillers*. Posteriormente, avaliou a reologia de cisalhamento, conforme a Norma AASHTO T315 (AASHTO, 2010), e a microestrutura por meio de MEV, Crio-MEV e EDE. Foram testadas três relações de carga magnetita/betume no mastique: 0,5, 1,0 e 1,5. Os autores constataram que a incorporação do referido mineral na mistura melhora a rigidez e a resposta elástica (reduz ângulo de fase) à alta temperatura do material compósito, fornecendo maior suporte à deformação permanente. Não foi identificada melhoria na resposta de viscosidade dos mastiques ferrosos em relação aos mastiques contendo calcário natural, o que poderia ajudar a reduzir problemas com a formação de fissuras.

A magnetita proveniente dos processos de extração de minérios também está sendo estudada entre os materiais da mineração que visam, por meio de magnetização de betume, gerar indução nos considerados pavimentos rodoviários inteligentes. Com os objetivos de reduzir a necessidade de manutenção de pavimentos rodoviários, em virtude da formação de microfissuras, e de buscar um agente promotor de cura desses sistemas, Patti *et al.* (2018) realizaram a continuação do estudo de Giustozzi *et al.* (2018). Os autores avaliaram o uso de pó de magnetita (33,3%, 50% e 60% da mistura), extraído dos processos de mineração de ferro e sem pré-tratamento adicional, como substituinte do material de enchimento em mistura asfáltica. Nessa pesquisa, duas amostras de magnetita foram adicionadas de modo individual ao betume: magnetita I (Reino Unido) e magnetita II (Austrália). Verificou-se que as misturas que continham magnetita, sob aquecimento por indução, atingiram alta taxa de aquecimento correspondente a $50^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Com o rápido aquecimento das amostras betuminosas, ocorreu a redução da viscosidade do betume, promovendo a cura (fechamento) das microfissuras, como pode ser observado na Figura 9.

Segundo Hasan *et al.* (2019), embora os agregados convencionalmente aplicados nas misturas asfálticas apresentem tamanho e formato de partículas, granulometria e demais propriedades de engenharia semelhantes, ainda há uma lacuna referente à propriedade térmica. O uso de agregados com maior calor específico resultará em maior consumo de energia para fabricação do material asfáltico. Nesse sentido, o bom desempenho térmico das misturas asfálticas, em função do pó de magnetita, demonstra o benefício do uso desse mineral, não somente para reduzir a possibilidade de rachaduras no pavimento, como também para diminuir as emissões de poluentes atmosféricos e o consumo energético para produção do material.

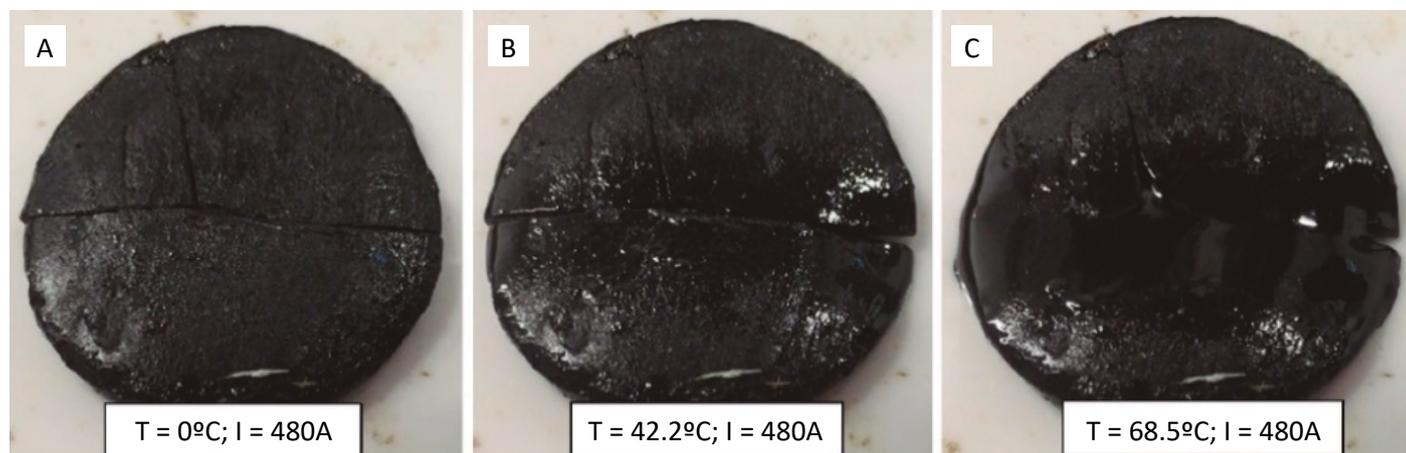
No que tange à incorporação de RM em concreto, tem-se como estudo pioneiro o trabalho desenvolvido por Cai *et al.* (2011a). Os autores avaliaram os efeitos dos RM em pó como substituinte dos agregados miúdos na trabalhabilidade e resistência do concreto. Na fabricação do concreto, utilizaram-se cimento Portland, escória de alto forno moída e RM moído (5, 10 e 20%). Quanto aos efeitos da relação água/pó de RM (0,40, 0,45, 0,50 e 0,55), observou-se que, quando a relação

é de 0,50, e tem o teor de 20% de RM, o que implica excelente microgradação e ótima trabalhabilidade. Já no teor de 0,40, tem-se redução do teor água/pó de RM e aumento no teor de micromiúdos (semelhante ao cimento), por conseguinte maior área superficial específica, o que resultou no aumento da resistência em sete e 28 dias, conferida por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump test*). Averiguou-se que a microgradação desses resíduos torna o concreto mais compacto, e os constituintes pozolânicos das micropartículas dos RM (68,63% SiO_2 e 6,72% Al_2O_3), ao reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), oriundos da hidratação do cimento, contribuem para a resistência do material de construção. O aumento do teor de RM em pó no concreto implica a incorporação de agregados miúdos de granulometria muito pequena (micro). Essa característica, por sua vez, contribui para a composição de agregados com partículas bem graduadas, as quais favorecem maiores contatos e intertravamento e em consequência um material com uma matriz mais resistente. Além disso, um teor superior de micropartículas de RM no concreto disponibilizou maior presença de sílica e de alumínio amorfo para gerar reações pozolânicas com o Ca(OH)_2 , atuando como agente cimentante. O consumo do hidróxido de cálcio foi verificado pela redução da sua fase cristalina no betão, identificada na análise de DRX.

Silva, Mendes e Silva (2016) também avaliaram a aplicação de RM como substitutos parciais do agregado miúdo na produção de concreto. Corpos de prova foram

produzidos com base na substituição de 10, 20 e 30% de magnetita, utilizada no lugar de areia. Adequação granulométrica foi realizada para que as partículas do resíduo permanecessem na mesma faixa granulométrica da areia a ser substituída. Mediante os resultados, constatou-se que os corpos de prova substituídos pela magnetita apresentaram melhores resultados nos ensaios de compressão (ensaio de abatimento do tronco de cone), quando comparados com os corpos de prova sem substituição.

Cai *et al.* (2011a) investigaram a viabilidade de utilização do pó de RM e de resíduos do destilador Solvay em concreto espumado *in situ*. Esse concreto, fabricado com cimento, material de enchimento e espuma pré-formada, é normalmente utilizado para isolamento térmico e proteção contra incêndio. A aplicação dos resíduos no concreto espumado visa substituir os materiais convencionais inflamáveis por isolantes térmicos orgânicos. Nesse estudo, os autores utilizaram os RM em pó como substituinte dos agregados miúdos e o resíduo do destilador Solvay (produção de carbonato de sódio) como acelerador do processo de endurecimento do concreto. A espuma pré-formada foi misturada com água, cimento Portland e material de enchimento, na mistura de proporção água/sólido de 0,15, e avaliou-se a resistência em sete e 28 dias. Por meio de ensaios de resistência à compressão, verificou-se que o concreto espumado do sistema de cimento-pó do mineral demonstrou resistência e relação força-densidade



Fonte: Patti *et al.* (2018).

Figura 9 – Cura de microfissuras com o uso de magnetita em misturas betuminosas por meio de aquecimento por indução: (A) $t = 0$ s; (B) $t = 0,8$ s; (C) $t = 1,3$ s.

Quadro 2 – Síntese dos estudos de aplicação de resíduos de magnetita (RM) em misturas asfálticas e em concreto.

Estudo	Técnica	Aplicação	Resultados
Wang <i>et al.</i> (2016c)	Microscopia eletrônica de varredura Espectroscopia de dispersão de elétrons Difração de raios X Espectrometria de infravermelho	RM moídos para substituição parcial e integral do calcário em mistura asfáltica	- Melhoria na resistência dinâmica a alta temperatura (anticorrosão) das misturas asfálticas; - Ligeira redução da resistência de divisão a baixa temperatura; - Aumento da razão de resistência à divisão (rachadura) por ciclos de congelamento e descongelamento
Giustozzi <i>et al.</i> (2018)	Granulometria Microscopia eletrônica de varredura Espectroscopia de dispersão de elétrons	Magnetita extraída do reprocessamento de resíduos na mineração, para substituir a carga de calcário natural na mistura asfáltica - Carga de magnetita/betume: 0,5, 1,0 e 1,5	- Melhora a rigidez e a resposta elástica (reduz ângulo de fase) do material compósito, a alta temperatura; - Não melhora da resposta de viscosidade dos mastiques ferrosos em relação aos mastiques contendo calcário natural
Patti <i>et al.</i> (2018)	Granulometria Microscopia eletrônica de varredura Espectroscopia de dispersão de elétrons	Magnetita extraída de processos de mineração de ferro como material de enchimento em mistura asfáltica - Carga de magnetita/betume: 0,5, 1,0 e 1,5	- Alta taxa de aquecimento da mistura betuminosa com magnetita (50°C.s-1); - Cura de microfissuras
Cai <i>et al.</i> (2011b)	Granulometria Difração de raios X	RM em pó (5, 10 e 20%) como substituinte do agregado miúdo no concreto	- Constituintes pozolânicos das micropartículas dos RM (68,63% SiO ₂ e 6,72% Al ₂ O ₃); - Efeito combinado da relação água/pó de RM com microgradação das partículas do resíduo; - O teor de água/pó de RM de 0,4, o aumento de teor de micro miúdos e os constituintes pozolânicos dos resíduos resultam em melhoria na trabalhabilidade e na resistência do concreto

Continua...

Quadro 2 – Continuação.

Estudo	Técnica	Aplicação	Resultados
Silva, Mendes e Silva (2016)	Não apresentaram técnicas analíticas de caracterização	Substituição do agregado fino por magnetita para produção do concreto	- Corpos de prova com substituição parcial da areia por RM apresentam melhores resultados aos ensaios de compressão que aqueles sem substituição
Cai <i>et al.</i> (2011a)	Granulometria Difração de raios X	Pó de RM e resíduos do destilador Solvay em concreto espumado <i>in situ</i>	- Concreto espumado do sistema de cimento-pó do mineral demonstrou resistência e relação força-densidade superior aos dos sistemas cimento-areia e sistema cimento-cal-areia
Wang <i>et al.</i> (2016a)	Difração de raios X Microscopia eletrônica de varredura	Concreto aerado autoclavado (CAA) foi desenvolvido utilizando ganga de carvão (GC) e resíduos de minério de ferro (RMF)	- Mistura ótima de 20% de GC, 40% de RMF, 25% de cal, 10% de cimento, 5% de dessulfurização de gesso e 0,06% de pó de alumínio, que resultou em resistência à compressão de 3,68 MPa

superior aos dos sistemas cimento-areia e sistema cimento-cal-areia. A incorporação do resíduo do destilador, agente espumante (XY-M-8) e fibra de polipropileno resultou em melhoria na coesão e resistência do betão. Além disso, o resíduo do destilador, composto de CaCl_2 , NaCl , CaCO_3 , CaSO_4 e Ca(OH)_2 , contribui para a redução do concreto durante o processo de fabricação do concreto espumado.

Já Wang *et al.* (2016a) estudaram um novo tipo de concreto aerado autoclavado (CAA) mediante a incorporação de GC e de resíduos de minério de ferro (RMF), contendo magnetita em sua composição. Os autores utilizaram diferentes técnicas aqui descritas, tanto para caracterização dos materiais e resíduos quanto para avaliação do produto final, como DSC, análise termogravimétrica (TG), DRX, MEV e resistência à compressão, conforme a Norma Chinesa GB/T 11968 (CHINA, 2008). Os testes resultaram em resistência à compressão ótima de 3,68 MPa com base em uma mistura de 20% de GC, 40% de RMF, 25% de cal, 10% de cimento, 5% de dessulfurização de gesso e 0,06% de pó de alumínio. Uma análise de DRX ainda permitiu identificar que, anteriores

ao processo de autoclavagem, os produtos de hidratação do concreto contendo GC e RMF eram tobermorita, hibschite, etringita e silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Durante a autoclavagem, a etringita foi decomposta e formou-se mais tobermorita acoplada aos C-S-H e ao hibschite.

Conforme a descrição supracitada dos estudos sobre as formas de reaproveitamento de RM em misturas asfálticas e concreto, o Quadro 2 apresenta uma síntese das principais técnicas utilizadas para caracterização do resíduo e do produto fabricado, a forma de aplicação da carga mineral no material de infraestrutura e os resultados obtidos.

Assim como no caso da aplicação de RM em misturas asfálticas, ainda há escassez de estudos que avaliam a aplicação desses materiais para a produção de concreto. Essa atividade apresenta um consumo de matérias-primas naturais em grande escala, o qual poderia ser reduzido mediante a incorporação de resíduos. Apesar dessa escassez os trabalhos existentes na literatura indicam que há bom potencial de aplicação de RM na produção de misturas asfálticas e concreto, tanto como substituto de agregados (es-

pecialmente miúdos) quanto como material de adição à mistura. Diante disso, ressalta-se a importância da utilização das técnicas de caracterização, de forma a identificar as principais características dos RM e averiguar a sua possibilidade de aplicação, visto a variedade de propriedades existentes entre os resíduos oriundos de diferentes jazidas.

Os estudos supracitados sobre o reaproveitamento de RM para produção de misturas asfálticas e concreto demonstram que se trata de temática muito atual, com resultados promissores sob perspectivas científica e tecnológica e que oportunizam o desenvolvimento de mais pesquisas, não somente para avaliação do comportamento mecânico como também da viabilidade ambiental e econômica.

CONCLUSÕES

Essa revisão apresentou as principais técnicas de caracterização de RM, do mineral extraído do resíduo da mineração e também do material asfáltico compósito e do concreto, considerando informações das propriedades físicas, químicas, mineralógicas e termodinâmicas. Além disso, abordou estudos da referida aplicação e respectivos resultados de comportamento mecânico e reológico.

De forma geral, os resultados de caracterização demonstraram que os resíduos de magnetita apresentam tamanho e morfologia de partículas e composição química e mineralógica adequados para incorporação à mistura asfáltica, não obstante em alguns casos há a necessidade de triturar o resíduo e possível presença de um contaminante. Já as misturas asfálticas, com incorporação da carga ferromagnética, demonstraram melhoria na resistência relacionada à anticorrosão e às rachaduras, na rigidez e na resposta elástica (resistência à deformação) e elevada taxa de aquecimento que promoveu o fechamento de microfissuras. Quanto à incorporação dos resíduos em concreto, todos os estudos levantados apresentaram bons resultados, indicando que esses materiais possuem potencial de aplicação, sobretudo quando utilizados como substitutos ao agregado miúdo.

As pesquisas de caracterização tecnológica e as que também aliam a aplicação, além de contribuírem para a redução de impactos ambientais pelo reaproveitamento da magnetita de resíduos da mineração, buscam a viabilidade técnica de misturas asfálticas e de concreto. Nesse aspecto, destaca-se a incorporação dos resíduos de magnetita com a utilização de pré-tratamento simples, como a trituração ou a moagem, ou uso de pó de magnetita extraído do reprocessamento dos resíduos no próprio local da mineração. Esse último fator, em conjunto com o atendimento dos requisitos técnicos do material fabricado com a carga mineral, favorecem a viabilidade de aplicação em escala industrial.

A incorporação do subproduto mineral na mistura betuminosa e cimentícia deve resultar em um material que atenda às especificações da engenharia de pavimentação e construção, potencializando o seu uso em larga escala para obtenção de um pavimento mais durável, como um agente promotor da cura de fissuras e de concretos mais resistentes.

Para otimização do uso do resíduo de magnetita, é fundamental a princípio conhecer a granulometria e a morfologia das partículas e a composição química e mineralógica das partículas constituintes. Entre as técnicas utilizadas para tais determinações, a granulometria a *laser*, a MEV, a EDE, a espectrometria de plasma, a espectrometria de infravermelho, a DRX e até mesmo a fluorescência de raios X (determinação da composição química) oferecem resultados precisos e coerentes para compreender o comportamento do resíduo e do material com carga mineral. Sob o ponto de vista tecnológico, deter o conhecimento das propriedades dos RM é imprescindível para definir a aplicação mais adequada. Resíduos constituídos majoritariamente de micropartículas e com elevado teor de ferro apresentam maior potencial de uso em misturas asfálticas, enquanto os constituídos de partículas mais graúdas e com maior teor de sílica e de alumínio podem ser moídos e incorporados ao concreto.

Contudo, as características e o comportamento dos resíduos de magnetita variam conforme especificidades da jazida de extração e das operações de processamento e reprocessamento submetidas. Portanto, ressalta-se a importância da caracterização tecnológica de cada amostra do resíduo, bem como de testes para avaliação da viabilidade técnica/ambiental e econômica do material produzido. Nesse último aspecto, atenta-se para a necessidade e a importância de realizar a análise de ciclo de vida do produto contendo resíduos de magnetita, para investigação da sustentabilidade dessa aplicação.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE AUTORIDADES ESTADUAIS DE RODOVIAS E TRANSPORTES (AASHTO). *AASHTO T315-10: Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Estados Unidos: AASHTO, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7181: análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- BOON, M. S.; MARIATTI, M. Optimization of magnetic and dielectric properties of surface-treated magnetite-filled epoxy composites by factorial design. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 355, p. 319-324, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.12.002>
- BORGES, A. A.; LUZ, J. A. M.; FERREIRA, E. E. Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito. *Revista Escola de Minas*, v. 61, n. 1, p. 29-34, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672008000100006>
- BURD, B. J. Evaluation of mine tailings effects on a benthic marine infaunal community over 29 years. *Marine Environmental Research*, v. 53, n. 5, p. 481-519, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(02\)00092-2](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(02)00092-2)
- CAI, J. W.; LÜ, Z. H.; HOU, G. X.; BAI, R. Y.; LIU, M. M. Application of magnetite mill tailings and solvay distiller waste in foamed concrete in situ. *Advanced Materials Research*, v. 335-336, p. 1312-1315, 2011a. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.1312>
- CAI, J. W.; WU, J. X.; LÜ, Z. H.; GAO, G. L. Effects of powdery mill tailings from magnetite on workability and strength of concretes. *Key Engineering Materials*, v. 477, p. 233-238, 2011b. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.477.233>
- CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). *Caracterização Mineralógica de Minérios: Parte 1*. Rio de Janeiro: Cetem, 2010. v. 3.
- CHEN, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, T.; ZHAO, Y.; BAO, S. Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 4, p. 2107-2111, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.025>
- CHINA. *GB/T 11968: Autoclaved aerated concrete blocks*. China, 2008.
- _____. *JTG E20-2011. Standard Test Methods of Asphalt and Asphalt Mixtures for Highway Engineering*. Beijing, 2011.
- DAUCE, P. D.; CASTRO, G. B. de; LIMA, M. M. F.; LIMA, R. M. F. Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 1, p. 1052-1059, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.015>
- DINO, G. A.; MEHTA, N.; ROSSETTI, P.; AJMONE-MARSAN, F.; DE LUCA, D. A. Sustainable approach towards extractive waste management: Two case studies from Italy. *Resources Policy*, v. 59, p. 33-43, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.07.009>
- GHAZANFARI, M.; YAZDANI, A. Influence of MWCNTs on the formation, structure and magnetic properties of magnetite. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 40, p. 152-157, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.06.055>
- GIRI, S. K.; DAS, N. N.; PRADHAN, G. C. Magnetite powder and kaolinite derived from waste iron ore tailings for environmental applications. *Powder Technology*, v. 214, n. 3, p. 513-518, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.09.017>
- GIUSTOZZI, F.; MANSOUR, K.; PATTI, F.; PANNIRSELVAM, M.; FIORI, F. Shear rheology and microstructure of mining material-bitumen composites as filler replacement in asphalt mastics. *Construction and Building Materials*, v. 171, p. 726-735, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.190>

- GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro. *Revista Escola de Minas*, v. 64, n. 2, p. 233-236, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672011000200016>
- GUR, A.; ARTIG, B.; CAKIR, T. Photon Attenuation Properties of Concretes containing magnetite and limonites ores. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, v. 53, n. 1, p. 184-191, 2017. <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp170115>
- HAMMARSTROM, J. M.; SEAL, R. R.; MEIER, A. L.; KORNFIELD, J. M. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: Recycling of metals and acidity in surficial environments. *Chemical Geology*, v. 215, n. 1, p. 407-431, 2005. <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.053>
- HASAN, M. R. M.; CHEW, J.-W.; JAMSHIDI, A.; YANG, X.; HAMZAH, M. O. Review of sustainability, pretreatment, and engineering considerations of asphalt modifiers from the industrial solid wastes. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 6, n. 3, p. 209-244, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.08.001>
- HERZENBERG, C. L.; RILEY, D. L. Current Applications of Mossbauer Spectrometry in Geochemistry. In: PEARSON, L. R.; GROVE, E. L. (orgs). *Developments in Applied Spectroscopy*. Nova York/Londres: Plenum Press, 1970. v. 8. p. 325.
- HORSZCZARUK, E.; SIKORA, P.; ZAPOROWSKI, P. Mechanical properties of shielding concrete with magnetite aggregate subjected to high temperature. *Procedia Engineering*, v. 108, p. 39-46, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.117>
- JASKULSKI, R.; GLINICKI, M. A.; KUBISSA, W.; DAJBROWSKI, M. Application of a non-stationary method in determination of the thermal properties of radiation shielding concrete with heavy and hydrous aggregate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 130, p. 882-892, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.050>
- KÖNIG, U.; PÖLLMANN, H.; ANGÉLICA, R. S. O Refinamento de Rietveld como um método para o controle de qualidade de minérios de ferro. *Revista Escola de Minas*, v. 55, n. 2, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672002000200007>
- KOSSOFF, D.; DUBBIN, W. E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S. J.; MACKLIN, M. G.; HUDSON-EDWARDS, K. A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, v. 51, p. 229-245, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
- KUBISSA, W.; GLINICKI, M. A.; DAJBROWSKI, M. Permeability testing of radiation shielding concrete manufactured at industrial scale. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 51, 2018. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1213-0>
- KUMAR, R.; SAKTHIVEL, R.; BEHURA, R.; MISHRA, B. K.; DAS, D. Synthesis of magnetite nanoparticles from mineral waste. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 645, p. 398-404, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.089>
- KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D.; MOHYEDDIN, A. Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. *Cogent Engineering*, v. 2, n. 1, 2015. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1083137>
- MAASS, D.; VALÉRIO, A.; LOURENÇO, L. A.; OLIVEIRA, D.; HOTZA, D. Biosynthesis of iron oxide nanoparticles from mineral coal tailings in a stirred tank reactor. *Hydrometallurgy*, v. 184, p. 199-205, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.01.010>
- MEHTA, N.; DINO, G. A.; AJMONE-MARSAN, F.; LASAGNA, M.; ROMÈ, C.; DE LUCA, D. A. Extractive waste management: A risk analysis approach. *Science of the Total Environment*, v. 622-623, p. 900-912, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.260>
- MORENO, L.; NERETNIEKS, I. Long-term environmental impact of tailings deposits. *Hydrometallurgy*, v. 83, n. 1-4, p. 176-183, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.052>
- PATTI, F.; MANSOUR, K.; PANNIRSELVAM, M.; GIUSTOZZI, F. Mining materials to generate magnetically-triggered induction healing of bitumen on smart road pavements. *Construction and Building Materials*, v. 171, p. 577-587, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.160>

- SAKTHIVEL, R.; VASUMATHI, N.; SAHU, D.; MISHRA, B. K. Synthesis of magnetite powder from iron ore tailings. *Powder Technology*, v. 201, n. 2, p. 187-190, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.03.005>
- SILVA, A. C.; MENDES, M. V. A.; SILVA, S. Substituição de areia por magnetita na formulação do concreto. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 13, n. 3, p. 265-269, 2016. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1022>
- TANG, C.; LI, K.; NI, W.; FAN, D. Recovering iron from iron ore tailings and preparing concrete composite admixtures. *Minerals*, v. 9, n. 4, p. 1-14, 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/min9040232>
- TOMÁZ, R. S.; SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; SOUSA, D. N. Produção de concentrado de magnetita por jigagem a partir do rejeito de rocha fosfática. *Holos*, v. 7, p. 72, 2015. <https://doi.org/10.15628/holos.2015.3715>
- VODYANITSKII, Y. N.; SAVICHEV, A. T. Magnetite contamination of urban soils in European Russia. *Annals of Agrarian Science*, v. 15, n. 2, p. 155-162, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.05.020>
- WANG, C. L.; NI, W.; ZHANG, S. Q.; WANG, S.; GAI, G. S.; WANG, W. K. Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailings. *Construction and Building Materials*, v. 104, p. 109-115, 2016a. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.041>
- WANG, Z.; WANG, H.; AN, D.; AI, T.; ZHAO, P. Laboratory investigation on deicing characteristics of asphalt mixtures using magnetite aggregate as microwave-absorbing materials. *Construction and Building Materials*, v. 124, p. 589-597, 2016b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.137>
- WANG, Z.; XU, C.; WANG, S.; GAO, J.; AI, T. Utilization of magnetite tailings as aggregates in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 392-399, 2016c. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.139>
- YELLISHETTY, M.; KARPE, V.; REDDY, E. H.; SUBHASH, K. N.; RANJITH, P. G. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 11, p. 1283-1289, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.007>

