

ESTADO DA ARTE IBERO-BRASILEIRA SOBRE A APLICAÇÃO DE AGREGADOS DE ESCÓRIAS DE ACIARIA EM MISTURAS BETUMINOSAS

The ibero-brazilian state of the art on the use of steel slag aggregate in bituminous mixtures

Ana Cristina Freire^a, Anabela Maia^a

^a Departamento de Transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

RESUMO – Na Europa, e de uma forma geral por todo o mundo, existe uma grande procura de agregados para a construção civil, principalmente para a construção de estradas. Existe também uma preocupação crescente com a conservação dos recursos naturais e com o ambiente, que tem levado à procura e utilização de agregados secundários, nomeadamente resíduos/subprodutos industriais cujas propriedades químicas, físicas, mecânicas e ambientais viabilizam a substituição dos agregados naturais, como é o caso desde há longa data dos agregados de escórias de aciaria. As escórias de aciaria são resíduos/subprodutos inevitáveis do fabrico do aço, os quais após um processamento adequado constituem agregados artificiais de excelente qualidade, segundo vários autores, para o fabrico de misturas betuminosas a aplicar em camadas de pavimentos rodoviários. A par do crescimento da indústria do aço a nível mundial, encontra-se assim a produção de escórias de aciaria e a necessidade de se identificarem soluções para o seu aproveitamento. A sua utilização na construção de estradas, como material alternativo aos agregados naturais é já há algumas décadas a sua principal aplicação em vários países, constituindo uma alternativa relativamente abundante e promissora. Este artigo caracteriza o estado do conhecimento na Península Ibérica e no Brasil, relativamente ao uso de escórias de aciaria (em particular, de forno de arco elétrico) em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários.

SYNOPSIS – In Europe, and in general throughout the world, there is a great demand for aggregates for civil construction, especially for roads construction. There is also a growing concern about the conservation of natural resources and the environment, which has led to the search and use of secondary aggregates, namely industrial wastes/by-products whose chemical, physical, mechanical and environmental properties enable the replacement of natural aggregates as has been the case, for a long time, of steel slag aggregates. Steel slags are unavoidable wastes/by-products of steel making process, which after suitable processing constitutes, according to several authors, artificial aggregates of excellent quality for bituminous mixtures to be applied in road pavements.

In line with the growth of steel industry worldwide, there is thus the production of steel slag and the need to identify solutions for its use. Its application in roads construction, as an alternative material to natural aggregates, has been for decades its main application in several countries, representing a relatively abundant and promising alternative.

This paper characterizes the state of knowledge, in the Iberian Peninsula and Brazil, on the use of steel slags (especially, of electric arc furnace) in bituminous mixtures for road pavements.

Palavras Chave – Escórias de aciaria, misturas betuminosas, conservação de recursos.

Keywords – Steel slags, bituminous mixtures, natural resources conservation.

E-mails: acfreire@lnec.pt (A. Freire), amaia@lnec.pt (A. Maia)

ORCID: orcid.org/0000-0002-7940-2648 (A. Freire), orcid.org/0000-0002-2472-9731 (A. Maia)

1 – ENQUADRAMENTO

De acordo com dados da *Worldsteel Association*¹, ao longo dos últimos 20 anos a produção mundial de aço mais que duplicou, passando de 799 milhões de toneladas, em 1997, para 1691 milhões de toneladas, em 2017 (EEF, 2018; Worldsteel Association, 2017). Apresentam-se na Figura 1, os dez maiores produtores mundiais de aço, dos quais se destaca a China com cerca de 50% da produção mundial (Worldsteel Association, 2017).

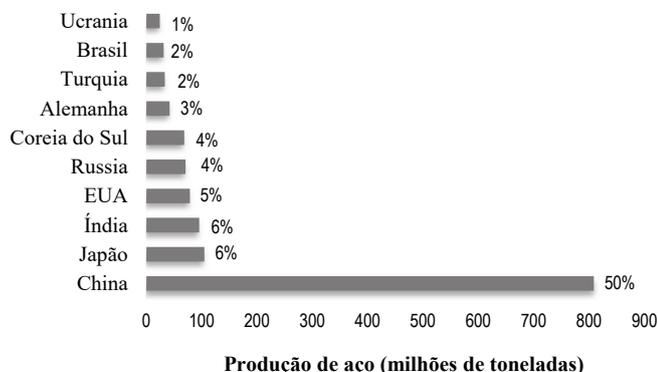


Fig. 1 – Dez maiores produtores de aço mundiais

Cerca de 70% da produção mundial de aço é realizada em alto forno e em forno conversor a oxigénio e cerca de 30% através do processo de reciclagem de aço em fornos de arco elétrico, dos quais resultam as escórias vulgarmente designadas BF (de alto forno), BOF (de forno conversor a oxigénio) e EAF (de forno de arco elétrico). Estima-se que por cada tonelada de aço produzido, se produzem cerca de 200 kg de escórias EAF e 400 kg de escórias BF/BOF e de alto forno (Worldsteel Association, 2018).

Estima-se, a nível mundial, uma produção anual de escórias de ferro e de aço superior a 400 milhões de toneladas. Algumas são recicladas internamente, alimentando de novo os fornos e cerca de 50% são utilizadas na indústria da construção, principalmente em estradas (Worldsteel Association, 2018).

A maior parte dos países produtores de aço produzem os dois tipos de escórias BOF e EAF, contudo, existem alguns países onde a produção de aço atualmente ocorre exclusivamente em fornos de arco elétrico, como é o caso da Bulgária, Croácia, Grécia, Luxemburgo, Portugal, Eslovénia, Venezuela e Arábia Saudita (Worldsteel Association, 2017).

Esta associação mundial refere ainda que, atualmente, o aproveitamento médio mundial de escórias de aciaria ronda os 80%, sendo expectável um aumento potencial em muitos países face aos benefícios económicos e ambientais que lhes são crescentemente associados (Figura 2).

Na Europa (EU28) são produzidos anualmente, cerca de 26 milhões de toneladas de escórias de alto forno (na maioria utilizadas na indústria do cimento) e cerca de 21 milhões de toneladas de escórias de aciaria (BOF, EAF e secundárias), utilizadas principalmente na construção de estradas (Euroslag, 2014).

A nível europeu a *Euroslag*, associação de produtores e transformadores metalúrgicos, tem promovido a aplicação das escórias de aciaria como agregados para pavimentação, essencialmente por terem resistência mecânica superior à dos agregados naturais, referindo que o processamento

¹ Órgão de comércio internacional para a indústria de ferro e aço. Os seus membros representam cerca de 85% da produção mundial de aço.

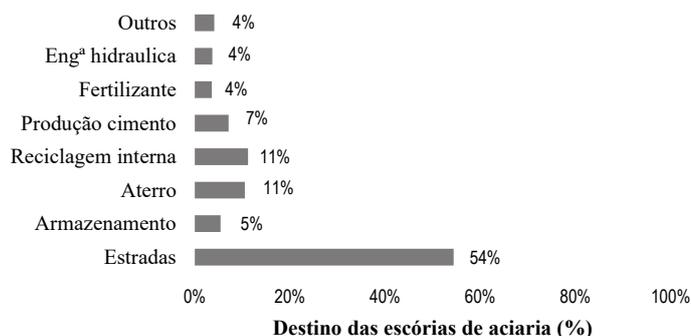


Fig. 2 – Utilização de escórias de aciaria na Europa (Euroslag, 2014)

das escórias para a produção de agregado (britagem e peneiração) lhes confere uma granulometria e propriedades em conformidade com os requisitos das normas europeias de produtos, incluindo a sua estabilidade volumétrica. Considerando que as suas propriedades são comparáveis às dos agregados naturais, ou são até superiores para determinados fins específicos, recomenda o seu uso para aplicações em camadas não ligadas, de base ou sub-base, ou em camadas ligadas, com a aplicação em misturas betuminosas (Euroslag, 2016).

Devido às suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, estas escórias têm tido numerosas aplicações na construção civil como agregados de elevada qualidade, sendo também usadas nomeadamente como fertilizantes de solos e no tratamento de águas residuais. Por esta razão, as escórias têm sido promovidas como materiais de construção “sustentáveis”, por substituírem direta ou indiretamente as matérias-primas naturais (Sofilic et al., 2012).

Têm sido realizados numerosos estudos sobre a viabilidade de utilização destes materiais em misturas betuminosas, um pouco por todo mundo, referindo-se nomeadamente Japão, Estados Unidos, Canadá, Brasil, Reino Unido, Grécia, Alemanha, Turquia, China, Austrália, Espanha e Portugal.

Estes estudos baseiam-se geralmente, na caracterização das propriedades químicas, físicas, mecânicas e ambientais dos agregados de escória produzidos em cada local, face à reconhecida variabilidade que a sua composição química e mineralógica pode apresentar em função das matérias-primas utilizadas, das especificidades dos processos siderúrgicos e do processamento a que são sujeitas; seguindo-se estudos de formulação de misturas betuminosas com incorporação de agregado siderúrgico, para cada tipo de aplicação (recorrendo ao método Marshall ou outros) e a avaliação do seu desempenho, comparando-o com o de misturas betuminosas convencionais e/ou de misturas com diferentes percentagens de incorporação de agregado de escória. Alguns estudos são complementados com a construção e monitorização de troços experimentais à escala real, apresentando resultados sobre a monitorização do seu desempenho ao longo do tempo.

A conformidade dos valores obtidos para as propriedades dos agregados de escória e das misturas betuminosas em que são incorporados é geralmente avaliada, na ausência de documentos específicos, em relação a requisitos de especificações nacionais e europeias aplicáveis a agregados naturais e a misturas betuminosas convencionais, para os vários fins a que se destinam. Não obstante existem em alguns países, há mais de 20 anos, normas específicas para a utilização de agregados de escória de aciaria em misturas betuminosas, nomeadamente na China, Japão, Estados Unidos, Alemanha e Brasil.

2 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS AGREGADOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA

Com base em fontes bibliográficas de vários países, incluindo alguns dos maiores produtores mundiais de aço, apresentam-se no Quadro 1, resumidamente, as principais características dos agregados de escória de aciaria, considerando o seu processo de fabrico, composição química, propriedades mineralógicas, físicas, geométricas e mecânicas e ainda características ambientais.

Verifica-se que as escórias de aciaria, apesar de poderem apresentar alguma variabilidade em termos da sua composição química, em função das matérias-primas e processos siderúrgicos que as originam, apresentam propriedades geométricas, físicas e mecânicas semelhantes entre si, satisfazendo globalmente as especificações existentes nos vários países para a aplicação de agregados naturais em pavimentos rodoviários sendo, contudo, importante o controlo adequado da sua expansão volumétrica, por ser este o fator determinante da viabilidade do seu uso.

Quadro 1 – Principais características dos agregados de escória de aciaria

1. Processo de produção do aço	<p>O processo mais utilizado a nível mundial para o fabrico do aço consiste na produção de ferro fundido no alto-forno (a partir de minério de ferro) e na sua transformação em aço, no forno conversor a oxigénio. Outro processo consiste na fusão de sucata de ferro num forno elétrico, cuja energia é fornecida por arcos voltaicos, e na transformação do metal fundido em aço (reciclagem). As escórias de aciaria são resíduos/subprodutos do fabrico do aço, gerados em alto forno (BF), fornos conversores a oxigénio (BOF) ou em fornos de arco elétrico (EAF).</p> <p>No Brasil, tal como na maioria dos países produtores de aço, a produção ocorre maioritariamente (cerca de 75%) em fornos conversores a oxigénio e apenas 25% em fornos de arco elétrico.</p> <p>Na Península Ibérica, verifica-se o inverso. Em Espanha, a produção de aço ocorre maioritariamente (cerca de 70%) em forno de arco elétrico e apenas 30% em forno conversor a oxigénio e em Portugal, a produção ocorre desde 2002 apenas em forno de arco elétrico, a partir da reciclagem de sucata (Worldsteel Association, 2017).</p> <p>Em Portugal, nas siderurgias de Paio Pires e da Maia, exclusivamente com fornos de arco elétrico, o processamento das escórias negras para o fabrico do designado <i>Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)</i>, é constituído, à semelhança de outros países, por arrefecimentos primários e secundários, eliminação de metais grosseiros, fragmentação e crivagem e neutralização da cal livre para evitar a possibilidade de expansão após aplicação (Marques, 2009).</p>
2. Composição química	<p>A composição química depende significativamente da composição do aço reciclado (sucata) e do processo siderúrgico do qual as escórias resultam.</p> <p>Os principais constituintes da escória negra, produzida no forno de arco elétrico, são a cal (CaO) e os vários óxidos formados a partir das impurezas presentes no metal fundido, como o óxido de ferro (FeO), a sílica (SiO₂) e o óxido de alumínio (Al₂O₃).</p> <p>Podem conter outros constituintes menores, como o óxido de magnésio (MgO), óxido de manganês (MnO) e o trióxido de enxofre (SO₃) (Yildirim e Prezzi, 2009). As escórias EAF contêm um teor de óxidos de cálcio e de magnésio livre mais baixo que as escórias BOF, contudo existe sempre um certo risco de expansão (Sherwood, 2001). O teor em metais das escórias EAF é superior ao das escórias BOF (Bohmer et al., 2008).</p>

Quadro 1 – Principais características dos agregados de escória de aciaria (cont.)

2. Composição química	A existência de CaO livre, Ca(OH) ₂ e CaCO ₃ pode indiciar um potencial para a formação de calcário precipitado (tufa), quando os teores de cal livre são superiores a 1% (Graffitti, 2002). Com pH entre 8 a 10, o seu lixiviado pode apresentar valores superiores a 11 e ser corrosivo (FHWA, 2008). A produção de lixiviados com pH elevado, contribui para a reduzida mobilidade dos metais existentes nas escórias (Grubesa et al., 2016; Bohmer et al., 2008).
3. Propriedades mineralógicas	<p>A existência de fases cristalinas nas escórias de aciaria deve-se à sua composição química e ao lento arrefecimento a que são sujeitas.</p> <p>A variedade de minerais existentes é função da natureza da sucata reciclada (Yildirim e Prezzi, 2011). Uma das principais fases minerais é a solução sólida de óxido ferroso (FeO), devido ao elevado teor de óxidos de ferro existente nas escórias. Existem tipicamente outros minerais como: Merwinite-Ca₃Mg(SiO₄)₂; Olivina-(Mg,Fe)₂SiO₄; Polimorfos da belite (silicato bicálcico, C2S-Ca₂SiO₄): β-C2S e α-C2S; Ferro-aluminato tetracálcico, C4AF-4CaO.Al₂O₃.FeO₃; Ferrite bicálcica, C2F-Ca₂Fe₂O₅; Cal livre, CaO; Periclase, MgO; Wustite (óxido ferroso), FeO; Silicato tricálcico, C3S-Ca₃SiO₅; Solução de CaO-FeO-MnO-MgO (Yildirim e Prezzi, 2011).</p> <p>Na presença de água, a cal livre existente nas escórias de aciaria hidrata e origina portlandite Ca(OH)₂, que sendo menos densa que a cal resulta no aumento de volume (Yildirim e Prezzi, 2011).</p>
4. Propriedades físicas, geométricas e mecânicas	As propriedades das escórias também dependem do método de arrefecimento a que são sujeitas. Se for muito rápido, o material terá uma estrutura amorfa devido ao aprisionamento de bolhas de ar no seu interior, conferindo-lhe menor densidade e uma maior porosidade e resultando num material menos resistente e com maior sensibilidade à água. Se o arrefecimento for lento, terá uma estrutura mais cristalina, elevada resistência mecânica, maior massa volúmica e menor sensibilidade à água (FHWA, 2008).
4.1 Granulometria e forma	<p>O processamento destes materiais permite, em geral, satisfazer os requisitos granulométricos aplicáveis aos agregados naturais. Os agregados de escórias de aciaria têm elevada angularidade e textura superficial rugosa, o que proporciona maior imbricamento e atrito entre partículas e, conseqüentemente, um elevado ângulo de atrito interno (40° a 45°) da mistura particulada, traduzindo-se numa maior estabilidade quando incorporados em misturas betuminosas (FHWA, 2008).</p> <p>No que respeita aos índices de forma e de achatamento, são cumpridos os critérios das melhores categorias de agregados (FI10 e SI15 respetivamente), previstas na EN 13043 (CEN, 2004) relativa a agregados a aplicar em misturas betuminosas (Fistric et al., 2010).</p>
4.2 Massa volúmica e absorção de água	De uma forma geral, têm massa volúmica elevada e absorção de água moderada (inferior a 3%) (FHWA, 2008). Estes materiais, com massa volúmica superior à dos agregados naturais, quando usados em misturas betuminosas originam misturas com baridades 15% a 25% superiores às das misturas convencionais, originando uma maior massa para o mesmo volume de mistura (FHWA, 2008). Deve considerar-se esta diferença na formulação das misturas betuminosas e nos respetivos custos de transporte (CEDEX, 2013).

Quadro 1 – Principais características dos agregados de escória de aciaria (cont.)

4.3 Dureza	As escórias de aciaria apresentam dureza elevada (6-7), próxima na escala de Moh's à dureza do quartzo (FHWA, 2008; Zumrawi e Khalil, 2015).
4.4 Expansibilidade/ Instabilidade volumétrica	<p>As escórias de aciaria por conterem CaO e MgO livres na sua composição mineralógica, podem apresentar instabilidade volumétrica, ou seja, quando hidratados estes compostos causam a expansão do volume da escória (Yildirim e Prezzi, 2009), sendo necessária uma adequada estabilização previamente à sua aplicação em obra. Além do CaO e MgO, a reação do silicato bicálcico (C2S) também pode causar expansão volumétrica (Yildirim e Prezzi, 2011). A hidratação dos óxidos livres pode aumentar até 10% a 14% o volume do agregado (Andrade, 2015; FHWA, 2008).</p> <p>A cal livre hidrata rapidamente, pelo que a sua maioria fica neutralizada em poucos dias. Contudo, se alguma cal residual ficar retida em pequenas bolsas, só a fricção permitirá a sua hidratação. O óxido de magnésio, hidratando mais lentamente, pode causar alterações de volume durante meses ou até anos, pelo facto de estar geralmente encapsulado por silicatos e óxidos ricos em ferro e manganês, que dificultam a sua hidratação. Consequentemente, a presença de óxido de magnésio livre é um problema mais sério que o da cal livre, sendo difícil de prever a extensão da sua expansão volumétrica. Geralmente as escórias produzidas com tecnologias mais modernas têm menores teores de óxido de magnésio (Yildirim e Prezzi, 2011; Andrade, 2015; Graffitti, 2002; Sherwood, 2001).</p> <p>Sabe-se, atualmente, que o risco de expansão diminui bastante com a intemperização da escória, deixando-a a céu aberto por determinado período de tempo (Sherwood, 2001). O envolvimento com betume, quando a escória é incorporada em misturas betuminosas, dificulta o contacto com a água e minimiza o seu potencial expansivo (CEDEX, 2013).</p>
4.5 Resistência ao desgaste e à fragmentação	Este tipo de agregados apresenta, em geral, elevada resistência à fragmentação e ao desgaste (ensaios de <i>Los Angeles</i> e de <i>micro-Deval</i>), superior à dos agregados convencionais, o que lhes confere uma maior durabilidade.
4.6 Resistência ao polimento	Os agregados de escória apresentam, em geral, boa resistência ao polimento, superior aos agregados convencionais, o que se traduz na maior durabilidade do agregado. O coeficiente de polimento (PSV) é uma medida da microtextura da superfície do agregado (Lafarge Canada, 2016). Um valor de PSV elevado assegura que o material irá sendo polido lentamente com a passagem dos pneus. Para os agregados a aplicar em camadas betuminosas superficiais são exigidos, por exemplo no CETO ² (EP, 2014), valores de PSV superiores a 50. Este tipo de agregados pode ter valores de PSV superiores a 60, possuindo uma proporção de vazios finamente distribuídos que se “abrem” quando são polidos pelos pneus, garantindo permanentemente uma superfície aderente e rugosa (FEhS-Institut, 2008).
4.7 Durabilidade (alterabilidade a	Estes materiais apresentam boa durabilidade, com resistência ao gelo/degelo e à meteorização. As perdas de massa nos ensaios do sulfato de magnésio e de sódio são muito pequenas, cumprindo os requisitos da categoria

² Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, SA (atual Infraestruturas de Portugal, S.A.)

Quadro 1 – Principais características dos agregados de escória de aciaria (cont.)

agentes externos)	mais alta de durabilidade dos agregados, prevista na EN 13043 (Fistric et al., 2010).
4.8 Afinidade agregado-betume	A composição e o caráter químico básico das escórias garantem uma boa adesividade com os betumes convencionais (CEDEX, 2013). Isto deve-se, em parte, à presença de cal hidratada na superfície dos agregados de escória maturada. A cal hidratada é, por vezes, adicionada ao betume para promover a resistência ao desrevestimento dos agregados, sendo que no caso do agregado de escória, essa cal hidratada já está presente na sua superfície (Australasian Slag Association, 1999). São os agregados de rochas alcalinas (em geral com 45% a 52% de sílica), que apresentam melhor adesividade ao ligante betuminoso (Bernucci et al., 2008) pelo que a presença de CaO livre aumentando a afinidade agregado-betume, contribui para aumentar a durabilidade das camadas de desgaste (Grubesa et al., 2016). O facto de estes materiais apresentarem uma superfície rugosa, com muitos vazios não-interligados, proporciona uma superfície maior do que a de igual volume de agregados naturais, favorecendo também a ligação com o betume (Zumrawi e Khalill, 2015).
4.9 Propriedades térmicas	Os agregados de escória retêm o calor mais tempo que os agregados naturais, pelo que a sua utilização em misturas betuminosas fabricadas a quente pode ser vantajosa, nomeadamente aquando da sua aplicação em tempo frio, favorecendo a manutenção da temperatura da mistura (FHWA, 2008).
5. Características ambientais	<p>Do ponto de vista ambiental, não existem, de forma geral, restrições ao uso de escórias de aciaria, não lhes sendo reconhecidas características de perigosidade. Verifica-se, pelo contrário, o interesse das várias partes interessadas no seu uso, pelas vantagens que lhe estão associadas em termos de sustentabilidade, ao contribuir simultaneamente para a conservação de recursos naturais e para a minimização da deposição de resíduos em aterro.</p> <p>As características alcalinas das escórias de aciaria (não favoráveis à lixiviação de metais) e o seu uso em misturas betuminosas (minimizando o seu potencial de lixiviação) são, reconhecidamente, aspetos favoráveis em termos ambientais. Os estudos de lixiviação efetuados sobre estes materiais permitem a sua classificação como inertes, não sendo expectáveis efeitos nefastos sobre a qualidade da água ou dos solos nos locais onde são aplicados, sendo este um dos principais argumentos para serem considerados subprodutos e não resíduos.</p>

Pode ainda referir-se que as escórias de aciaria (BOF e EAF), com diferentes origens na Europa, são geralmente comparáveis e independentes do seu produtor podendo ser usadas nas mesmas aplicações, com poucas exceções. A principal diferença entre elas é a razão cal/sílica, maior nas escórias BOF. Estas escórias, contendo, em geral, maior proporção de cal livre, têm maior potencial de expansão por hidratação, requerendo um maior período de intemperização do que as escórias EAF. Também significa que as escórias BOF tendem a originar maior quantidade de finos que as escórias EAF. Podem verificar-se ainda diferenças no teor de MgO das escórias, devido a reações com o revestimento refratário. Os teores de cal e óxido de magnésio livres são os fatores mais importantes a controlar, no que se refere à utilização das escórias na construção civil (FEHRL, 2008; Jones, 2011). Sendo a natureza expansiva das escórias de aciaria prejudicial a quase todas as aplicações da engenharia civil, provocando fissuras que levam à sua desintegração e dos materiais

onde são aplicadas (Graffitti, 2002), estas devem ser previamente submetidas a tratamento para reduzir a sua instabilidade volumétrica.

A alteração das propriedades químicas e/ou mineralógicas das escórias, pode ser obtida através do uso de aditivos, tratamento com vapor e envelhecimento e em geral, armazenamento em pilhas a céu aberto durante um determinado período de tempo, para proporcionar a exposição adequada à humidade (Yildirim e Prezzi, 2009). Este período de estabilização, depende dos teores de óxido de cálcio e de magnésio existentes na escória, pois o CaO, tendo uma expansão mais rápida, pode estabilizar em semanas, enquanto o MgO, com uma expansão mais lenta, pode demorar meses ou anos a estabilizar (Andrade, 2015; Graffitti, 2002).

Segundo a Indústria do Aço de *North-Rhine Westphalia* da Alemanha, depois de arrefecidas todas as escórias originam produtos semelhantes a rochas ígneas que constituem, à primeira vista, excelentes agregados artificiais (Sherwood, 2001).

Refere-se frequentemente que as propriedades destes materiais são até superiores às dos agregados naturais, favorecendo a sua aplicação quer em camadas de base e sub-base quer em camadas superiores da estrutura dos pavimentos, como camadas de desgaste (Sofilic et al., 2012; Nippon Slag Association, 2016; IHOBE, 1999; UK Environment Agency, 2014).

É consensualmente reconhecido que as propriedades geométricas, físicas e mecânicas destes materiais os tornam aptos ao seu uso em misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas com tráfego, por estarem em conformidade com os requisitos da norma europeia harmonizada EN 13043 (CEN, 2004), permitindo a substituição dos agregados naturais. Referem-se, nomeadamente, as seguintes características gerais, ideais para misturas betuminosas a aplicar em camadas superficiais (IHOBE, 1999; Sofilic et al., 2011; FHWA, 2008; Nippon Slag Association, 2016; Jones, 2011):

- Forma cúbica, favorecendo o imbricamento das partículas e a resistência à deformação.
- Natureza básica, proporcionando uma forte afinidade aos ligantes betuminosos e, conseqüentemente, resistência ao desrevestimento do betume.
- Elevada resistência à fragmentação e ao polimento, que confere durabilidade ao agregado.
- Resistência à derrapagem, mantendo as propriedades ao longo da vida da superfície.
- Elevada resistência às ações climáticas, especialmente ao gelo-degelo.
- Boa capacidade de carga.
- Microtexturas superficiais rugosas, favorecendo a aderência das camadas de desgaste.
- Maior resistência mecânica do que a dos agregados naturais, requerendo menos finos durante a compactação em obra.
- Melhor comportamento na presença da água do que a dos agregados naturais devido à inexistência de fração fina plástica; conseqüentemente melhor drenabilidade.

Do ponto de vista ambiental, não lhes são reconhecidas características de perigosidade. O seu envolvimento com betume, quando incorporadas em misturas betuminosas, dificultando o contacto com a água minimizará conseqüentemente o seu potencial de expansão e de lixiviação.

A dureza característica deste material (próxima do quartzo) permite que seja utilizado para executar pavimentos mais finos que os tradicionais e revestimentos superficiais finos resistentes à derrapagem (Nippon Slag Association, 2016).

Quadro 2 – Propriedades gerais das escórias de aciaria EAF

Constituintes	Xirouchakis & Manolakou (2011)	Pasetto & Baldo (2011)	FHWA (2008)	Wen et al. (2014)	WSDOT (2015)	Fistic et al. (2010), Sofilić et al. (2010)	Motz (2008)	Yildirim & Prezzi (2009)	Oluwasola et al. (2014)	Euroslag (2016a)	Australasian Association (2015)
Angulo de atrito interno	-	-	40-50°	40-50°	40-50°	-	-	40-50°	-	-	-
Dureza (Moh's)	-	-	6-7	6-7	6-7	-	-	6-7	-	-	-
Perda sulfato sódico, %	-	0,9-5,0	<12	<12	<4	0,4	<0,5	<12	<2,07	<0,5	<4
Equivalente areia, %	74	-	-	86	-	-	-	-	-	-	-
Índice de achatamento, %	1,4-10,4	14-15	-	1	-	2-4	-	-	2-4	-	<5
Índice de forma, %	0,9-9,1	14-26	-	-	-	1-3	<10	-	-	-	-
EN 1097-3											
Baridade, Mg/m ³	1,512-1,545	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6-2,10
Vazios, %	55,3-56,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Massa Secca p _{td}	3,159-3,523	-	-	-	3,300	3,41-3,68	-	-	-	-	-
Saturada, p _{sd}	3,234-3,557	3,94-4,03	-	-	3,400	3,49-3,73	3,500	3,1-3,6	-	3,600	3,30-3,45
Aparente p _a	3,408-3,645	-	-	-	-	3,69-3,88	-	-	-	-	-
Porosidade, %	5	-	-	-	-	-	-	≤3	-	-	-
Absorção água, %	0,9-2,4	0,5-0,8	≤3	2,5-3,7	1-2 grosso 2-4 fino	1,5-2,2	0,7	0,2-2	1,2-5,4	1	1-2 fino 2-4 grosso
MDE (EN 1097-1)	6,5-8,3	-	-	-	16	8	-	-	-	-	-
LA (EN 1097-2)	10,0-21,0	15-16	20-25	20-25	20-25	13	-	20-25	9,8-24,0	-	15-20
PSV (EN 1097-8)	53,4-67,9	52-54	-	-	58-63	70	61	-	54-56,6	57	58-62
Choque térmico	-	-	-	-	-	1,3	-	-	-	-	-
Expansão (EN 1744-1), %	0,0-0,7	-	-	-	-	2,2	-	-	-	-	Cal livre<3%
Afirdidade (EN 12697-11), %	75-95	-	-	-	-	95 (6h) 90 (24h)	>90	-	>95	-	-

Os resultados dos ensaios utilizados para a caracterização de agregados naturais, mostram que o agregado siderúrgico é um produto tecnicamente competitivo no mercado de agregados para a construção civil, em especial para pavimentação rodoviária (Tavares et al., 2011). As escórias EAF são atualmente consideradas equivalentes a materiais rochosos convencionais, tendo o seu uso aumentado exponencialmente nas últimas décadas (Mombelli, et al., 2014). Apresenta-se no Quadro 2 uma síntese de valores referidos em bibliografia, por vários autores, para as principais propriedades físicas, geométricas e mecânicas das escórias de aciaria EAF

3 – PROPRIEDADES DAS MISTURAS BETUMINOSAS CONTENDO AGREGADO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA

As propriedades das misturas betuminosas, que incorporam agregados de escórias em substituição dos agregados naturais (como o calcário, granito ou basalto), têm sido estudadas por diversos autores um pouco por todo o mundo, envolvendo vários tipos de misturas betuminosas, nomeadamente do tipo betão betuminoso ou do tipo SMA, com diferentes percentagens de incorporação de agregado de escória. A maioria destes estudos diz respeito à utilização do agregado de escória, como substituto da fração grosseira de agregado natural das misturas betuminosas a quente, demonstrando efeitos positivos no seu desempenho, nomeadamente no que se refere à resistência à fadiga e à deformação permanente, sensibilidade à água e atrito. Existe também referência à sua utilização com sucesso em revestimentos betuminosos e em misturas com emulsões a frio e em *slurry seals* (Australasian Slag Association, 2002).

A incorporação de escórias de aciaria em misturas betuminosas confere maior massa volúmica à mistura, estabilidade superior, maior resistência ao corte e à deformação permanente, retenção de calor, boa trabalhabilidade e compactação, comparativamente a misturas com agregados naturais. Refere-se também na bibliografia a possibilidade de se conceberem estruturas de pavimentos com espessuras mais finas de betão betuminoso com a incorporação de escórias de aciaria, para eventualmente compensar o custo de transporte associado ao aumento de 15% a 25% da massa do volume da mistura produzida (Grubesa et al., 2016).

Segundo alguns autores, as misturas betuminosas contendo escórias de aciaria apresentam maior teor ótimo de betume do que as misturas convencionais, aumentando este de 4,5% a 5,0% para 4,7% a 5,8%, uma vez que a maior porosidade da escória conduz à maior absorção de betume (Grubesa et al., 2016), referindo alguns autores que o aumento do teor ótimo se verifica com o aumento da incorporação do agregado de escória (Wu et al., 2007).

É ainda referido que o maior consumo de betume se deve à elevada absorção do agregado de escória fino e que substituindo o filer de escória por agregado natural, o teor ótimo reduz significativamente, situando-se dentro dos valores normais (Tavares et al., 2011). Outros autores, contudo, não confirmam o aumento significativo do consumo de betume com a incorporação da fração fina das escórias, referindo que o teor ótimo se situa dentro da variação de valores normal para misturas com agregados naturais (Pasetto e Baldo, 2011).

A *Australasian Slag Association* refere que a formulação de misturas betuminosas incorporando agregado de escória é muito semelhante à das misturas convencionais, havendo, contudo, algumas considerações devido à maior massa volúmica deste agregado. Refere, a título de exemplo, a determinação do teor de betume, expresso como uma percentagem da mistura total: este será ligeiramente superior ao de uma mistura com agregados naturais, se for expresso em termos de volume, e ligeiramente inferior, se for expresso em termos de massa. Refere ainda que a absorção de água é semelhante à dos agregados naturais, indicando não ser necessário betume adicional devido a este aspeto. Contudo, devido à área superficial dos agregados de escória ser ligeiramente superior à dos agregados naturais, pela sua forma cúbica e natureza vesicular, será necessário cerca de 0,5% em massa de betume adicional, para revestir a superfície do agregado.

A dureza característica do agregado siderúrgico favorece a utilização na execução de pavimentos mais finos que os tradicionais e ainda em revestimentos superficiais finos resistentes à

derrapagem. É reconhecida a sua boa trabalhabilidade e a vantagem de os pavimentos poderem ser sujeitos ao tráfego imediatamente após a conclusão dos trabalhos de pavimentação (Nippon Slag Association, 2016; Likoydis e Liapis, 2011).

É referido também, o efeito supressor de ruído que a incorporação das escórias de aciaria pode apresentar nas misturas betuminosas aplicadas em camadas de desgaste, em particular em misturas do tipo betão betuminoso drenante, considerando-se que os vazios estáveis que possuem são excelentes para as camadas superficiais, nomeadamente reduzindo a emissão de ruído (JERNKONTORET, 2015), (FEhS-Institut, 2008), (Australasian Slag Association, 1999).

4 – APLICAÇÃO DE AGREGADO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA NO BRASIL E NA PENÍNSULA IBÉRICA

Com a pressão crescente em muitos países relativa à necessidade do maior uso de agregados secundários, visando preservar os recursos naturais não renováveis, as escórias de aciaria constituem uma alternativa relativamente abundante e promissora, cuja disponibilidade depende significativamente da proximidade às unidades siderúrgicas existentes em cada região.

Apresenta-se de seguida o atual contexto do Brasil e da Península Ibérica, relativamente ao uso destes materiais em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários. Com realidades e níveis de implementação distintos, refere-se o exemplo do Brasil, um dos dez maiores produtores mundiais de aço, cujas dificuldades com a exploração e disponibilidade dos agregados naturais, (escassos e nem sempre com a qualidade necessária aos requisitos dos seus pavimentos, sujeitos a tráfego intenso e pesado e a elevadas temperaturas), favoreceram a utilização dos agregados de escórias na construção rodoviária há já algumas décadas; de Espanha, que sendo o quarto maior produtor de aço da UE28, também reconheceu, há já alguns anos, a possibilidade de valorização das escórias EAF em camadas de base, sub-base e leito de pavimento de estradas e em misturas betuminosas para camadas de desgaste, confirmando com a experiência adquirida a possibilidade da substituição dos agregados naturais pelas escórias siderúrgicas; e de Portugal, onde a aplicação deste material, com marcação CE desde 2011 (para aplicação em camadas granulares de pavimentos rodoviários), atravessa ainda uma fase de divulgação e reconhecimento das suas potencialidades pelo mercado.

4.1 – A experiência no Brasil

O Brasil é um dos dez maiores produtores mundiais de aço, tendo produzido em 2016 cerca de 31 milhões de toneladas, maioritariamente (cerca de 75%) em fornos conversores a oxigénio (Worldsteel Association, 2017).

Existem dados sobre a utilização de escórias de aciaria em pavimentação, desde a década de 70 (Freitas e Motta, 2008). A utilização deste tipo de escórias no meio rodoviário está bastante difundida no Brasil, sendo, há muitas décadas usada como material granular nas camadas de base e sub-base em estradas do Rio de Janeiro e Minas Gerais. A partir da década de 80, tem sido usada nas diversas camadas do pavimento no Estado do Espírito Santo (Branco et al., 2004).

Num estudo realizado em 2011 são listadas algumas das numerosas obras de pavimentação realizadas no Brasil desde 1978, com agregado de escória de aciaria aplicado nas várias camadas do pavimento: camadas de base, sub-base, regularização e superficiais (Rocha, 2011).

São referidos casos de sucesso como no Estado do Espírito Santo, onde foram realizados, em 1986, mais de 100 km de pavimentação urbana com agregado de escória nas camadas de base e sub-base, que se apresenta em bom estado após 14 anos de tráfego intenso. No Estado do Rio de Janeiro, no pavimento da BR 393, em Volta Redonda, foram usadas as escórias em todas as camadas do pavimento, assim como no trecho da BR 101 norte, nas proximidades do aeroporto de Vitória. Contudo, também são referidos alguns problemas devido à expansão dos materiais, em particular no Estado do Rio de Janeiro (Rocha, 2011).

Existem desde 1994, as normas DNER-EM 262/94 “Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários” e DNER-EM 263/94 “Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários” do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT), do Ministério dos Transportes. A primeira norma prevê requisitos para amostragem e aceitação de escórias de aciaria a aplicar em camadas de pavimentos rodoviários, estabelecendo, nomeadamente, um valor-limite para a expansão volumétrica e a segunda norma fixa as condições da sua aplicação em camadas de sub-base e de base e em misturas betuminosas. A norma DNER-ES 313/97 “Pavimentação – concreto betuminoso”, atual DNIT 031/2004-ES “Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico”, regulamenta o uso da escória de aciaria como agregado grosso em betão betuminoso. Apresentam-se no Quadro 3 os requisitos aplicáveis.

Estudos realizados em alguns Estados do Brasil, como a Bahia e o Ceará, sobre as propriedades das escórias de aciaria permitiram concluir da sua aplicabilidade tanto nas camadas inferiores como nas camadas superiores dos pavimentos rodoviários, estando em conformidade com as especificações técnicas aplicáveis aos agregados tradicionais para o mesmo fim, e salientando o bom desempenho mecânico das misturas produzidas (Fernandes, et al., 2014).

As propriedades mecânicas destes materiais são geralmente equivalentes ou superiores às dos agregados convencionais, conferindo propriedades superiores às camadas de pavimento (base e sub-base) onde são usados, nomeadamente maiores valores do módulo de deformabilidade e, conseqüentemente, maior capacidade de distribuição de carga do que o observado para os pavimentos convencionais (Freitas e Motta, 2008).

Tal como em outros países, também se considera que a principal limitação ao uso deste material em pavimentação, é a sua natureza expansiva (Branco et al., 2004; Bicalho et al., 2006). A expansão é em geral a causa dos problemas encontrados, tanto nas camadas inferiores como de revestimento. Se devidamente estabilizados, estes materiais apresentam melhores características que os convencionais (Fernandes et al., 2014).

Apesar disso, refere-se na bibliografia que a escória de aciaria também tem sido usada com sucesso sem cura prévia. Se forem usadas técnicas adequadas para a construção do pavimento, recorrendo a profissionais experientes, a expansão da escória pode ser controlada (Rohde, 2002).

A utilização de escórias de aciaria como agregados para a pavimentação está também associada às dificuldades que alguns Estados do Brasil têm com os seus pavimentos (sujeitos a tráfego intenso e pesado e a elevadas temperaturas) e com a disponibilidade dos agregados naturais, que sendo escassos nem sempre têm a qualidade necessária para esse fim. A Secretaria de Obras da Prefeitura do Rio de Janeiro é um dos vários órgãos públicos que aplica agregados siderúrgicos nas suas obras, para tentar ultrapassar as seguintes dificuldades:

- Deformações plásticas da camada de superficiais dos pavimentos das vias urbanas de tráfego pesado e intenso, sujeito a temperaturas muito elevadas.
- Escassez de agregados com desgaste de *Los Angeles* inferior a 40, apresentando geralmente baixa resistência à fragmentação.
- Elevado custo do agregado natural, devido a restrições ambientais à exploração mineral.

Estas dificuldades têm favorecido a substituição dos agregados naturais por agregados de escórias de aciaria, considerando que as suas melhores características proporcionam melhores propriedades às camadas dos pavimentos onde são utilizados, nomeadamente a aderência superficial, melhorando de uma forma geral o desempenho dos pavimentos (Ramos, 2009).

Face aos elevados custos de transporte, a utilização de agregados de escórias em pavimentação verifica-se essencialmente nas regiões siderúrgicas do país, tal como acontece noutros países do mundo. Com a perspetiva de ampliação do polo siderúrgico no Estado do Rio de Janeiro e no país, considera-se que este agregado poderá ser uma excelente alternativa para construção de camadas de pavimentos na extensa rede rodoviária que o Brasil tem ainda por pavimentar (Ramos, 2009).

Quadro 3 – Requisitos para utilização das escórias de aciaria em pavimentação (DNER, 1994; DNER, 1994a; DNIT, 2007)

Normas aplicáveis ao uso de escórias de aciaria em pavimentação	Requisitos
DNER-EM 262/94 “Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários”	<ul style="list-style-type: none"> - potencial de expansão máximo de 3% (ou conforme especificação de projeto) - isenta de impurezas orgânicas e contaminação com materiais que possam prejudicar os valores de projeto - granulometria (40% de agregado até 1,27 cm e 60% de agregado entre 1,27 e 5,08 cm e conformidade com projeto) <p>Condições específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - absorção de água (% em peso) de 1% - 2% - massa específica de 3,0 g/cm³ a 3,5 g/cm³ - massa unitária de 1,5 kg/dm³ a 1,7 kg/dm³ - desgaste LA ≤ 25% para sub-base e revestimento - durabilidade ao sulfato de sódio, 5 ciclos, de 0 % a 5 %
DNER-EM 263/94 “Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários”	<ul style="list-style-type: none"> - satisfazer os requisitos da norma DNER-EM 262/94 <p>Condições específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - podem ser empregues em camadas de sub-base, base e em misturas betuminosas, desde que em conformidade com as exigências de projeto e com controlo rigoroso da expansão (≤ 3%)
DNIT 031/2004-ES “Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico”	<p>Prevê o uso de escória de aciaria como agregado grosso a utilizar em betão betuminoso para revestimento, camada de ligação, base, regularização ou reforço do pavimento, desde que cumpra:</p> <ul style="list-style-type: none"> - desgaste LA (DNER-ME 035) ≤ 50 % - índice de forma (DNER-ME 086) >0,5 e partículas lamelares <10% - durabilidade, perda (DNER-ME 089) < 12 %

Os crescentes volumes de tráfego e o aumento das cargas por eixo nas estradas brasileiras têm mostrado a necessidade de novas técnicas de construção, com menos manutenção e mais duráveis. Neste contexto foi desenvolvido um estudo para avaliar a aplicabilidade de escórias de aciaria em misturas betuminosas de módulo elevado, para camadas de ligação ou de base. Os resultados foram favoráveis quanto às características físicas e mecânicas, equivalentes ou superiores às dos agregados convencionais. Contudo, relativamente ao teor de ligante obtido concluiu-se da necessidade de substituir a fração de agregado fino de escória por agregado natural, face aos seus valores de absorção elevados, para diminuir o teor de ligante necessário (Freitas e Motta, 2008).

No mesmo sentido, outro estudo realizado em 2011 também concluiu sobre a viabilidade do uso de agregado siderúrgico em misturas do tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*), tendo por base os resultados dos ensaios mecânicos realizados, nomeadamente para determinação do módulo de rigidez, da resistência à tração e da adesividade do ligante ao agregado; com valores superiores aos obtidos em SMA com agregados naturais. Verificou-se que devido à elevada absorção do agregado de escória fino, há um maior consumo de betume e que substituindo o filer de escória por filer de agregado natural, o teor ótimo de betume reduziu um valor percentual, situando o consumo de ligante dentro dos valores normais para misturas SMA (Tavares et al., 2011).

Um estudo realizado em 2015 comparou escórias de aciaria de cinco Estados brasileiros, tendo concluído da sua aplicabilidade tanto em camadas granulares, como camadas de revestimento betuminoso de pavimentos flexíveis ou até em misturas de betão betuminoso do tipo SMA, com base na caracterização geomecânica e química das escórias (durabilidade, abrasão, cal livre,

expansibilidade, índice de suporte californiano) e no comportamento mecânico (módulo de resiliência e resistência à tração) das misturas com agregado de escórias, comparando os resultados obtidos com os requisitos estabelecidos para cada um dos usos, nas especificações e normas existentes (Neto et al., 2015).

4.2 – A experiência em Espanha

A Espanha produziu em 2016 cerca de 14 milhões de toneladas de aço, das quais cerca de 70% foram produzidas em fornos de arco elétrico (Worldsteel Association, 2017). Em Espanha existem atualmente 24 aciarias de forno de arco elétrico, 14 das quais localizadas no País Basco, sendo esta província responsável por cerca de 50% da produção de aço espanhola (CEDEX, 2013).

Segundo o *Centro de Estudios Y Experimentación de Obras Publicas de Espanha* (CEDEX), está comprovado que as escórias, desde que tenham tratamento, classificação e seleção adequados, podem constituir agregados com a qualidade adequada para incorporação em para misturas betuminosas. Estes agregados possuem um bom coeficiente Los Angeles e excelente coeficiente de polimento acelerado, que os torna adequados para camadas de desgaste. A composição e o carácter químico básico das escórias garantem uma boa adesividade com os betumes convencionais. O principal problema que se coloca com o fabrico de misturas com estes agregados é a falta de finos. Uma proporção adequada de agregados, do ponto de vista técnico, combina agregado grosso de escória com agregado fino de origem calcária (CEDEX, 2013).

Em Espanha, construíram-se vários troços experimentais para analisar o comportamento das escórias negras em camadas de misturas betuminosas e em camadas granulares.

Refere-se a aplicação num troço experimental, em camada de desgaste com incorporação de 79% de escórias de forno elétrico, na estrada GI-3610, em Zizurkil (Gipuzkoa), numa extensão de 500 m. A avaliação efetuada, com base na recolha de carotes e análise laboratorial, medições com perfilómetro laser, ensaios pela técnica volumétrica da mancha, medições com pêndulo e avaliação da textura superficial e da irregularidade transversal, durante um período de 9 meses após a sua aplicação, permitiu concluir da viabilidade da sua aplicação em camadas de desgaste, por ter revelado um comportamento equiparável ao agregado convencional (IHOBE, 1999).

Além disso, na Comunidade Autónoma do País Basco realizaram-se nos últimos anos numerosos troços experimentais nos quais se utilizaram as escórias de aciaria de forno de arco elétrico em misturas betuminosas (camadas de desgaste S2 e F10 e camadas intermédias S20) e em camadas granulares (Z25), os quais se referem no Quadro 4 (CEDEX, 2013), evidenciando o interesse no estudo e utilização daqueles agregados.

Em 2009 foi publicado pelo Governo da Catalunha o Decreto 32/2009 (Departamento de Medio Ambiente Y Vivienda, 2009), sobre a valorização de escórias siderúrgicas provenientes de forno de arco elétrico, nomeadamente em camada de base, sub-base e leito de pavimento de estradas e como material para camada de desgaste em mistura betuminosa. Refere-se neste decreto, que a experiência adquirida ao longo dos anos com a valorização das escórias siderúrgicas confirmou a possibilidade do seu aproveitamento como material de construção, em substituição dos agregados naturais. Aqui se estabelece que estas escórias EAF não podem ser utilizadas como agregado na construção civil em zonas inundáveis com um período de retorno de cem anos; em terrenos com lençol freático a menos de 2,5 m da superfície da zona de aplicação das escórias; e em terrenos situados a menos de 100 m de poços de abastecimento de água potável para consumo humano.

Especificação técnica “PG-3” (Gobierno de Espana, 2015)

Em Espanha é aplicado um conjunto de especificações técnicas gerais para a construção de estradas e pontes que figura no documento PG-3 (*Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*), no qual se refere o possível uso das escórias como agregados na construção de estradas, desde que se cumpram os requisitos técnicos. Contudo, para a utilização destes materiais é necessário que as condições para o seu tratamento e aplicação estejam previstas

Quadro 4 – Troços experimentais construídos com agregado de escórias EAF (CEDEX, 2013)

Estradas	Material	Tipo de camada	Extensão	Tipo de tráfego	Data
<i>Eje Ballonti</i>	F-10	Desgaste (100% agregados escória)	300 m	T1	Set 2006
<i>Eje Ballonti</i>	F-10	Desgaste (grossos de escória e finos: 50% escória e 50% calcário)	300 m	T1	Set 2006
<i>Eje de la Ria, Carmen Galindo</i>	PA-12	Desgaste (grossos escória e areia calcária)	500 m	T1	Fev-mar 2007
<i>Acesso a Nervacero desde Ballonti</i>	S-20	Intermédia (grossos escória e areia calcária)	200 m	T2	Jun 2006
<i>Carmen Gallindo</i>	S-20	Intermédia (grossos e areia de escória)	500 m	T1	Set-dez 2006
<i>Acesso a Nervacero desde Ballonti</i>	ZA-25	Base granular (100% escória)	200 m	T2	Jun 2016
GI-3851	ZA-20	Base granular (100% escórias)	230 m	T4B	2006-2007
GI-3851	ZA-20	Base granular (grossos de escória e finos: 50% escória e 50% calcário)	180 m	T4B	2006-2007
GI-2133	S-20	Intermédia (100% agregados de escória)	715 m	T3A	2006-2007
GI-2133	S-20	Intermédia (grossos de escória e finos 100% calcário)	710 m	T3A	2006-2007
GI-2133	S-20	Intermédia (grossos de escória e finos: 50% escória e 50% calcário)	715 m	T3A	2006-2007
GI-2133	S-12	Desgaste (100% agregados de escória)	710 m	T3A	2006-2007
GI-2133	S-12	Desgaste (grossos de escória e finos 100% calcário)	740 m	T3A	2006-2007
GI-2133	S-12	Desgaste (grossos de escória e finos: 50% escória e 50% calcário)	740 m	T3A	2006-2007

na especificação técnica “*Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares*”, ou, na sua falta, o dono de obra defina especificações adicionais (Pina e García, 2011).

Neste documento são estabelecidos os requisitos a que os materiais tradicionais e os agregados siderúrgicos devem obedecer na execução de camadas granulares não ligadas. São referidos também os requisitos que se aplicam, de uma forma geral, aos agregados a utilizar em camadas ligadas de base, intermédias ou de desgaste. Esta especificação permite o uso de agregados naturais, artificiais e reciclados que cumpram os requisitos estabelecidos para cada fim.

Refere-se nesta especificação que os agregados não devem ser suscetíveis a nenhum tipo de meteorização ou alteração físico-química significativa, sob as condições mais desfavoráveis que podem ocorrer no local onde são aplicados. Deve-se garantir a durabilidade a longo prazo e que não sejam produzidas dissoluções passíveis de causar danos em estruturas ou outras camadas do pavimento, ou contaminar cursos de água.

Estudos da IHOBE especificando o cumprimento de critérios ambientais

Também em Espanha foi elaborado pela Sociedade de Gestão Ambiental da Região Autónoma do País Basco o estudo da IHOBE (2002), onde são definidos, nomeadamente, os critérios ambientais a serem respeitados na utilização de escórias de aciaria em camadas de pavimentos rodoviários.

Este estudo prevê um risco aceitável para a utilização do ASIC, quando se verificar que a sua influência na alteração da composição e componentes do solo subjacente for inferior a 1% em 100 anos. O material gerado nas aciarias pode ser utilizado em camadas granulares de pavimentos rodoviários, em camadas de base, sub-base e também em leito do pavimento (sendo referida a elevada capacidade de resistir a cargas pesadas; elevada resistência mecânica e à desagregação; agregados limpos, sem plasticidade ou material argiloso; equivalente de areia superior a 30; material britado e com as faces partidas, para um bom imbricamento; fuso granulométrico contínuo e expansibilidade inferior a 0,5% (ASTM -D4792).

Quanto às camadas de desgaste, refere-se a dificuldade em incorporar 100% de escórias, pela falta de finos, pelo que se aconselha a utilização de areia na fração 0/6 mm. Face aos excelentes valores de coeficiente de Los Angeles, coeficiente de polimento dos agregados e rugosidade, conclui-se existir boa adesão e atrito dos pneus ao material, logo uma adequada aplicabilidade em camadas de desgaste. É ainda reforçado neste estudo a importância de um bom envolvimento dos agregados pelo ligante, de forma a evitar o contacto com a água e a minimizar a sua expansão (IHOBE, 1999).

4.3 – A experiência em Portugal

Portugal é um pequeno produtor de aço tendo produzido em 2016 cerca de 2 milhões de toneladas, exclusivamente em fornos de arco elétrico (Worldsteel Association, 2017), nas duas unidades siderúrgicas existentes a nível nacional, em Paio Pires, no Seixal e na Maia, no Porto.

Desde 1998 que a *Harsco Metals CTS*, pertencente ao grupo americano HARSCO, com o objetivo de reciclagem/comercialização de agregado siderúrgico em todo o mundo, se dedica à comercialização do agregado siderúrgico produzido nas siderurgias nacionais, contando com algumas aplicações em camadas granulares, já realizadas em Portugal (Harsco, 2016).

Em Portugal, não estão definidos critérios comunitários ou nacionais para o fim de estatuto de resíduo, pelo que competiu ao Ministério do Ambiente autorizar a sua utilização como material de construção. Para ser comercializado como produto de construção, este material está em conformidade com as especificações existentes para os materiais de construção, nomeadamente as normas europeias harmonizadas de produto aplicáveis.

As escórias de aciaria das siderurgias nacionais estão atualmente classificadas, pelo Ministério do Ambiente, como material de construção, com a designação de *Agregado Siderúrgico Inerte para Construção* (ASIC). Este agregado, de granulometria extensa (0/40 mm), está certificado desde 2011 com a marcação CE, de acordo com a norma europeia harmonizada EN 13242 (CEN, 2007), para utilização como material granular nomeadamente em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterros em vias rodoviárias (Harsco, 2016).

Em Portugal não existem especificações ou critérios técnicos específicos para a utilização dos agregados siderúrgicos como materiais de pavimentação, aplicando-se os requisitos existentes para os materiais convencionais, estabelecidos no CETO (EP, 2014), o qual tem como referência as normas europeias aplicáveis aos agregados e às misturas betuminosas em que são incorporados, nomeadamente as EN 13043 (CEN, 2004) e EN 13108-1 (CEN, 2006).

Existem alguns estudos realizados a nível nacional sobre a viabilidade de aplicação do ASIC na construção de pavimentos rodoviários. Com base nesses estudos e nos resultados das determinações efetuadas e disponibilizadas pela Siderurgia Nacional no âmbito do seu controlo de produção, no período 2007-2015, considera-se que este material se encontra caracterizado do ponto de vista laboratorial, no que se refere às suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas, ambientais e

mecânicas. Assim, tendo em conta a norma europeia harmonizada EN 13043 (CEN, 2004) aplicável a agregados artificiais, o ASIC apresenta as seguintes características:

- Índice de forma, com valores entre 1% e 4%, permite colocar o ASIC na melhor categoria de agregados (SI_{15}) com valores inferiores ou iguais a 15%. O mesmo se aplicando ao Índice de achatamento, para o qual os valores entre 1% e 3%, permitem classificar o ASIC na categoria FI_{10} , com valores de índice de achatamento inferiores ou iguais a 10%.
- Coeficiente de *Los Angeles*, com valores entre 19 e 27, permite classificar o ASIC, em termos médios, na categoria LA_{25} (coeficiente *Los Angeles* ≤ 25).
- Massa volúmica e absorção de água, com valores de massa volúmica entre 3,12 Mg/m^3 e 3,81 Mg/m^3 e de absorção de água, WA_{24} , entre 0,8% e 1,3%. A EN 13043 não apresenta categorias para os valores da massa volúmica, contudo estabelece categorias para a absorção de água. Tendo em atenção os valores de WA_{24} obtidos no período em análise (inferiores a 1,3%, exceto em 2008 que foram de 2,7% e 3,5%), pode classificar-se o ASIC na categoria WA_{242} (absorção água $\leq 2\%$), sendo, por conseguinte, considerado como resistente ao gelo-degelo.
- Granulometria tipo agregado britado de granulometria extensa (ABGE) e dimensão 0/40 mm.
- Estabilidade volumétrica, com valores de expansão dos agregados entre 0,35% e 2,30%, o que permite classificar o ASIC na melhor categoria, $V_{3,5}$ (valores de expansão inferiores ou iguais a 3,5% em volume); anota-se que o valor mais elevado de expansão dos agregados (2,30%) se verificou em 2009, após o que se manteve sempre abaixo de 1,0%.
- Relativamente ao teor de enxofre foram apresentados os resultados de duas determinações, com valores inferiores a 0,1%.

O desempenho destes agregados em camadas granulares de base foi já avaliado, através da construção e monitorização de um troço experimental na EN 311. Existem também alguns estudos sobre a viabilidade da sua utilização em misturas betuminosas para camadas de base, não existindo, no entanto, muito trabalho realizado relativamente à sua aplicação em camadas de desgaste.

Tendo em conta os resultados favoráveis obtidos nos estudos realizados e a consulta bibliográfica efetuada, considera-se que existe um potencial elevado para a sua aplicação com sucesso em camadas ligadas de pavimentos rodoviários, nomeadamente em camadas de base, de ligação/regularização e em camada de desgaste.

Ao contrário de outros países, em Portugal a aplicação deste material atravessa ainda uma fase de divulgação e reconhecimento das suas potencialidades pelo mercado (Marques, 2009).

Apresentam-se de seguida os principais estudos realizados em Portugal, sobre a aplicação do agregado de escória de aciaria na construção de pavimentos.

O primeiro estudo de que se tem conhecimento foi realizado pelo LNEC, em 1985, a pedido da Siderurgia Nacional (SN) do Seixal, com o objetivo de obter um maior escoamento para as suas escórias de aciaria (LNEC, 1985). Neste estudo, intitulado “*Caracterização de escórias de aciaria para utilização em misturas betuminosas*”, foi analisada uma mistura de escórias, provenientes do forno conversor (BOF) e do forno elétrico (EAF)³, que não correspondem ao atual ASIC, a utilizar em camadas de regularização ou desgaste, com tráfego médio, tendo-se revelado mais favorável a mistura que estava de acordo com o fuso granulométrico da JAE⁴. Apresentam-se de seguida as principais conclusões deste estudo:

- As escórias de aciaria apresentam massa volúmica elevada (superior a 3,0 g/cm^3) relativamente à maioria dos agregados convencionais, o que pode representar um constrangimento ao seu uso em locais afastados da SN, devido aos custos de transporte.
- Obtidos valores de absorção de água, da fração 0/10 mm, de 4,0%.
- Obtidos valores de equivalente de areia, da fração 0/5 mm e 0/10 mm, de 89% e 97% respetivamente.

³ Atualmente, o forno de arco elétrico é o único em funcionamento.

⁴ Junta Autónoma de Estradas (entidade antecessora da Estradas de Portugal, atual Infraestruturas de Portugal).

- Obtidos valores do ensaio de Los Angeles elevados (32 a 36), limitando o uso das misturas betuminosas em camadas de regularização ou de desgaste, apenas em estradas secundárias
- Elevada percentagem de óxidos (sílica e cal) e de ferro, nas escórias de aciaria.
- As porosidades da mistura betuminosa compactada (com teor ótimo de betume 6,3%) são muito elevadas, o que se atribuiu à porosidade da escória associada à sua rugosidade superficial. Por esta razão o teor ótimo de betume, das misturas com escórias é mais elevado do que em misturas com agregados convencionais.
- Aumentando a energia de compactação, as várias características da mistura betuminosa melhoram significativamente (força de rotura Marshall, baridade e a porosidade).
- Os ensaios realizados para determinação da influência da água no comportamento da mistura betuminosa conduziram a resultados insatisfatórios.
- A expansibilidade da escória é, possivelmente, devida à hidratação da cal livre e/ou óxidos de magnésio que compõem a escória.
- A fraca adesividade obtida pode atribuir-se ao elevado teor de sílica associado à sua expansibilidade em presença da água.
- A substituição dos 6% de filler por cimento e a adição de 2% de estereato de alumínio, melhorou com sucesso a adesividade. A mistura betuminosa em estudo, com estes aditivos, apresenta comportamento idêntico ao de uma mistura betuminosa com agregado basáltico.
- Os aditivos melhoraram também a trabalhabilidade da mistura betuminosa, aumentando a sua baridade e diminuindo a porosidade.
- O emprego de escórias de aciaria em misturas betuminosas é viável, desde que se incorporem aditivos, recomendando-se um tempo de exposição das escórias ao ar livre, superior a 1 ano, para atenuar a sua expansibilidade e o estudo das escórias EAF e BOF em separado.

Com a criação da empresa *Harsco Metals CTS*, em 1998, com o objetivo de comercializar o agregado siderúrgico produzido ao nível nacional (ASIC), desenvolveram-se uma série de estudos de investigação para determinar as suas propriedades e avaliar a possibilidade do seu uso, em particular na construção rodoviária. Em 2011, com a marcação CE do ASIC de acordo com a norma europeia EN 13242 (CEN, 2007), este material demonstrou a sua conformidade para aplicação em camadas granulares de base, sub-base, leito de pavimentos e aterros em vias rodoviárias.

Referem-se de seguida, de uma forma resumida, os principais trabalhos desenvolvidos com o ASIC para estudar a viabilidade da sua aplicação na construção de estradas e em obras de geotecnia.

- **“Estudo de viabilidade de aplicação do agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC), em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro”**

Este projeto, desenvolvido pelo Centro de Valorização de Resíduos (CVR) com a colaboração da Universidade do Minho e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), entre 2006 e 2010, estudou a aplicação do ASIC em camadas granulares.

Na primeira fase deste projeto foi desenvolvido um vasto programa de caracterização laboratorial, que se resume no Quadro 5, no qual se apresenta uma síntese das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do ASIC produzido nas siderurgias de Paio Pires e da Maia, determinadas no âmbito do projeto (Correia et al., 2006). Neste estudo, foi também efetuado o ensaio do sulfato de magnésio para verificar a alterabilidade do agregado quando sujeito a agentes atmosféricos, em particular baixas temperaturas, tendo-se verificado perdas inferiores a 0,1%.

Apresentam-se também no Quadro 6 os resultados médios da análise química efetuada por fluorescência de RX, às escórias produzidas na Siderurgia de Paio Pires, alvo de um estudo realizado em 2006 sobre a viabilidade de aplicação do ASIC em camadas não ligadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro, relativamente aos quais os autores concluíram enquadrarem-se genericamente nos valores médios referidos em bibliografia (Correia et al., 2006)

Quadro 5 – Propriedades do ASIC produzido em Paio Pires e na Maia (Correia et al., 2006)

Propriedades	Parâmetro	ASIC	
		Paio Pires	Maia
Geométricas	D _{max} (mm)	38,1	76,1
	D ₁₀ (mm)	0,22	1,96
	D ₃₀ (mm)	2,63	8,50
	D ₆₀ (mm)	7,30	18,89
	Coefficiente de uniformidade	33,20	9,64
	Coefficiente de curvatura	4,30	1,95
	Índice de achatamento	5	10
	Índice de forma	6	7
Físicas	Equivalente areia (%)	80	100
	Azul de metileno (%)	0	0
	Limite de liquidez (%)	NP ¹	NP
	Limite de plasticidade (%)	NP	NP
	Densidade seca, Proctor modificado (10 ³ kg/m ³)	2,32	2,43
	Teor humidade, Proctor modificado (%)	5,0	3,45
	Massa volúmica material impermeável (10 ³ kg/m ³)	3,31	3,45
	Massa volúmica partículas saturadas (10 ³ kg/m ³)	3,05	3,25
	Massa volúmica partículas secas (10 ³ kg/m ³)	2,94	3,17
	Absorção de água (%)	3,87	2,59
Massa volúmica	3,07	3,29	
Mecânicas	<i>Los Angeles</i> micro-Deval (%)	23	28
	CBR imediato	11	11
	CBR c/ embebição	100	72
	Expansão determinada no ensaio CBR	51	48
	Expansibilidade (EN1744-1) (%) ²	0	0
		1,5	nd

¹ NP – não plástico² (Correia et al., 2012)

nd - não determinado

Quadro 6 – Análise química da escória produzida na SN de Paio Pires (Correia et al., 2006)

Amostras	Composição (% em peso)								
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂
Escórias (3 meses)	0,10	2,99	6,20	14,97	0,76	0,66	0,02	33,97	0,71
	V	Cr	Mn	Fe ₂ O ₃	Cu	Zn	Sr	ZrO ₂	Ba
	0,07	1,57	3,60	34,15	0,03	0,01	0,03	0,03	0,13

Foi também estudada a lixiviação do ASIC produzido na Maia e em Paio Pires, no âmbito do referido projeto, demonstrando claramente o carácter inerte deste agregado.

Procedeu-se ainda à análise mineralógica por difração de raios X, complementada por observação em microscopia eletrónica de varrimento, a qual permitiu identificar a presença de: Wustite, Fe_{0,965}O; Silicato de cálcio, Ca₂SiO₄ e Ghelenite, Ca₂Al(AlSiO₇).

Os resultados dos ensaios de laboratório realizados para avaliação do desempenho dos materiais incorporando ASIC, demonstraram que este tem propriedades mecânicas (rigidez e resistência à deformação permanente) superiores aos agregados convencionais para camada de base (Correia et al., 2012).

Ainda no âmbito deste projeto de investigação foi construído um trecho experimental, na EN 311 entre Fafe e Várzea Cova, constituído por secções com materiais naturais britados e por

secções com ASIC, aplicado em aterro, camada de base e sub-base do pavimento. Este troço foi monitorizado e avaliado o seu desempenho ao longo do tempo, tendo-se verificado uma melhoria significativa no comportamento das secções com a utilização do ASIC nas camadas granulares do trecho experimental, quando comparadas com a utilização de materiais naturais. Os ensaios realizados sobre o referido troço experimental, para avaliar o desempenho mecânico e ambiental do ASIC, validaram as conclusões retiradas com os ensaios de laboratório, quanto ao desempenho mecânico superior destes materiais relativamente aos convencionais. A nível ambiental, a análise dos lixiviados permitiu confirmar também o carácter inerte destes materiais (Correia et al., 2008).

Têm também sido realizados estudos visando a aplicação do ASIC em misturas betuminosas para camadas superiores dos pavimentos, nomeadamente:

- **“Avaliação da possibilidade de utilização de escória negra de siderurgia em misturas betuminosas para camadas de pavimentos rodoviários”**

A Universidade do Minho efetuou, a pedido do Centro para Valorização de Resíduos (CVR), o estudo de formulação de uma mistura betuminosa, incorporando 100% de ASIC (fração grossa e fração fina), para aplicação como camada de base de pavimentos rodoviários.

Concluiu-se neste estudo que o ASIC pode ser utilizado em substituição do agregado do macadame betuminoso, para camadas de base de pavimentos, desde que se assegure que a porosidade da mistura betuminosa está em conformidade com as especificações existentes, devendo para tal ser adicionada uma quantidade de material fino adequada à mistura em questão. Concluiu-se ainda que a incorporação de escória não aumenta a percentagem de betume da mistura betuminosa. Apresenta-se no Quadro 7 uma síntese dos resultados obtidos (Universidade do Minho, 2005).

- **“Estudos de formulação de misturas betuminosas incorporando ASIC, tipo betão betuminoso, com características de desgaste”**

A empresa Armando Cunha realizou em 2006 o estudo de formulação de uma mistura betuminosa com características de desgaste, para aplicação nas instalações da Siderurgia de Paio Pires. Foi formulada uma mistura betuminosa a quente, segundo a metodologia *Marshall*, com incorporação de 98% de ASIC (73% da fração 0/10 mm e 25% da fração 10/16 mm) e 2% de filer calcário. Apresenta-se no Quadro 7 uma síntese dos resultados obtidos (Cunha, 2006).

Esta mistura foi aplicada em fevereiro de 2007, numa camada com 4 cm junto ao edifício sede e numa camada com 10 cm junto ao armazém geral (SN Seixal, 2007). Esta aplicação, realizada numa zona de acesso condicionado, está sujeita a um tráfego pouco significativo. Após três anos de utilização observou-se um perfeito estado de conservação do pavimento (Crucho, 2011).

Em 2007, a mesma empresa realizou um outro estudo de formulação de uma mistura betuminosa incorporando ASIC, com as mesmas características, ou seja, do tipo betão betuminoso com características de desgaste, mas incorporando 100% de ASIC (73% da fração 0/10 mm e 27% da fração 10/16 mm). Apresenta-se no Quadro 7 uma síntese dos resultados obtidos (Cunha, 2007).

- **“Estudo da incorporação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) em misturas betuminosas para pavimentação”**

No âmbito de um protocolo de cooperação científica e técnica entre o LNEC e a Siderurgia Nacional foi desenvolvido um estudo para avaliar a viabilidade de incorporação de ASIC em betão betuminoso, do tipo macadame betuminoso para camada de base ou de ligação (MB), com uma taxa de incorporação de 75% de ASIC e 25% de agregado calcário.

Foram avaliadas laboratorialmente as características geométricas, físicas e mecânicas de três frações de ASIC, 0/6 mm, 6/12 mm e 12/18 mm, tendo os ensaios laboratoriais permitido confirmar

a conformidade das suas propriedades físicas, geométricas e mecânicas com os requisitos das especificações existentes para o seu uso em misturas do tipo betão betuminoso.

Foram também avaliadas as características químicas do ASIC utilizado e avaliada a libertação de contaminantes por lixiviação, tendo-se confirmado o caráter inerte deste material.

Complementarmente foram avaliados os dados relativos ao controlo de produção efetuado pela Siderurgia Nacional, no período 2007-2015, verificando-se ser possível classificar o ASIC nas melhores categorias previstas na EN 13043, relativamente aos parâmetros analisados incluindo a sua estabilidade volumétrica.

O estudo de formulação da mistura betuminosa foi realizado com base no método *Marshall* e tendo em conta o estabelecido no CETO (EP, 2014) e nas normas europeias EN 13108-1 e EN 13043, tendo-se obtido uma percentagem ótima de betume de 4,4%.

Nos ensaios laboratoriais realizados para caracterização do desempenho da mistura betuminosa produzida, obtiveram-se: valores de ITSR elevados permitindo concluir que a mistura ensaiada apresenta uma elevada resistência à ação da água, evidenciando assim uma boa adesividade/afinidade entre o ligante e o agregado siderúrgico; um bom comportamento à fadiga, tendo-se obtido uma lei de fadiga bastante consistente e com elevado número de ciclos até à rotura e um bom comportamento à deformação permanente.

Os resultados obtidos permitiram concluir sobre a viabilidade da aplicação do ASIC em camada de macadame betuminoso (MB), com características de base ou de ligação, de pavimentos rodoviários, prevendo-se a realização de um trecho experimental a breve prazo.

Apresenta-se no Quadro 7 uma síntese dos resultados obtidos (LNEC, 2017).

Referem-se em seguida algumas dissertações de mestrado e teses de doutoramento realizadas nos últimos anos, estudando a viabilidade da aplicação do ASIC produzido na Siderurgia Nacional, em misturas betuminosas para camadas de base.

- **“Contribuição para o estudo da viabilidade de escórias de aciaria em misturas betuminosas”** (Marques, 2009)

Foi desenvolvido um estudo no âmbito de uma dissertação de mestrado do Instituto Superior Técnico (IST/UL), em 2009, visando concluir sobre a viabilidade de substituição dos agregados naturais pelo ASIC, em misturas betuminosas para camadas de base.

O autor refere que o processo de produção do ASIC na SN do Seixal, assegura largamente os limites de expansibilidade existentes nas normas europeias, sendo este um dos principais fatores a controlar. Os ensaios de caracterização geométrica revelaram um material de granulometria extensa e bem graduado, constituído principalmente por partículas cúbicas e com pouco material argiloso, sendo assim um material limpo. Os ensaios de caracterização física e mecânica revelaram um material com resistência e dureza satisfatória para o fim em estudo. Revelaram também um material poroso e denso, apresentando valores de absorção de água e massa volúmica superiores aos agregados correntes utilizados em misturas betuminosas. O autor verificou que os valores de porosidade, VMA e baridade foram superiores nas misturas betuminosas com incorporação de ASIC. Foi possível verificar um aumento dos valores de carga de rotura, do valor da percentagem “ótima” de betume, assim como do intervalo de valores de deformação. Obtiveram-se resultados bastante satisfatórios, no que respeita à capacidade do betume aderir ao agregado.

O autor concluiu, assim, que é viável a aplicação de ASIC como agregado em misturas betuminosas para camadas de base.

- **“Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares. Aplicação às escórias de aciaria nacionais”** (Ferreira, 2010)

Foi desenvolvido um estudo no âmbito de uma dissertação de doutoramento da Universidade do Minho, em 2010, visando caracterizar o comportamento mecânico e ambiental dos agregados de escória de aciaria. Os resultados experimentais obtidos mostraram que os agregados processados das

escórias de aciaria nacionais são inertes e apresentam um desempenho mecânico superior ao dos materiais naturais, contribuindo decisivamente para a sua valorização em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas. Os valores obtidos para os ensaios de laboratório realizados para a caracterização dos agregados de escória das siderurgias da Maia e de Paio Pires estão em concordância com os valores apresentados no Quadro 7.

- **“Contribuição para o estudo da resistência à fadiga de misturas betuminosas com incorporação de ASIC”** (Crucho, 2011)

Foi desenvolvido um estudo no âmbito de uma dissertação de mestrado do IST, realizada em 2011, visando estudar a resistência à fadiga das misturas betuminosas contendo ASIC. Os resultados obtidos permitiram concluir que a mistura betuminosa com ASIC estudada teve um comportamento adequado à fadiga. O autor considerou que a lei de fadiga obtida evidenciava uma resistência aceitável e adequada para o tipo de material em estudo. Apesar de não ter sido possível estudar uma mistura idêntica sem ASIC, por comparação com leis previsionais habitualmente adotadas para estimar a fadiga, nomeadamente as leis propostas pela JAE e pela Shell, pôde-se concluir que o comportamento observado era adequado.

- **“Caracterização Laboratorial de Misturas Betuminosas com Incorporação de Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)”** (Andrade, 2015)

Estudo desenvolvido no LNEC no âmbito de uma dissertação de mestrado do ISEL, realizada em 2015, visando a caracterização laboratorial de misturas betuminosas incorporando ASIC para aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários.

Com o trabalho de caracterização laboratorial desenvolvido, o autor concluiu que o ASIC respeita todos os requisitos geométricos, físicos e mecânicos estabelecidos pelo CETO⁵ (EP, 2014) para incorporação em camadas betuminosas, apresentando resultados mais favoráveis que os obtidos com agregados naturais.

Os ensaios realizados evidenciaram um material com forma cúbica e excelente imbricamento entre as partículas, praticamente isento de finos e por isso com pouca sensibilidade à ação da água, valores de massa volúmica significativamente mais elevados, com valores médios na ordem do 3,6 Mg/m³ e uma absorção de água bastante reduzida, entre os 0,5 % e 0,9 %, um pouco abaixo do normalmente registado nos agregados naturais. Os ensaios de resistência à fragmentação e ao desgaste apresentaram valores bastante mais baixos do que os normalmente verificados nos agregados naturais, antevendo uma excelente capacidade mecânica das misturas betuminosas, principalmente no que se refere a deformações permanentes. Foi obtida boa afinidade agregado-betume, devido à forma cúbica, porosidade e rugosidade, garantindo elevada estabilidade nas misturas betuminosas.

Na formulação pelo método *Marshall*, cujo teor ótimo em betume foi de 5,1 %, verificaram-se valores de estabilidade, baridade, deformação, porosidade, vazios na mistura de agregados e quociente *Marshall*, um pouco cima dos tradicionalmente obtidos em misturas tradicionais. No caso da estabilidade, atribuiu-se esse facto à maior rigidez do ASIC, à sua forma cúbica (maior imbricamento) e à boa afinidade com o ligante. A elevada baridade deve-se à elevada massa volúmica do ASIC. No caso da porosidade, do VMA e da deformação, considerou-se que a compactação pelo método *Marshall* possa não ser a mais adequada. A dimensão máxima dos agregados utilizados, relativamente ao tamanho dos provetes, o maior imbricamento, a maior adesividade e a elevada rigidez do ASIC, poderão ter dificultado a compactação da mistura, tendo o índice de vazios obtido originado uma maior deformação dos provetes *Marshall*. A dificuldade de compactação deste material tinha já sido evidenciada aquando da utilização de ASIC em camadas granulares (Correia et al., 2008).

⁵ Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, SA (atual Infraestruturas de Portugal)

Na avaliação efetuada à mistura betuminosa observou-se um adequado desempenho na resistência à fadiga e na sensibilidade à água. No que se refere à deformação permanente, apesar dos resultados obtidos não comprometerem a sua utilização em camadas subjacentes à camada de desgaste, face às deformações verificadas, o autor entendeu que esta propriedade poderá ser alvo de melhoria, com uma formulação mais adequada e metodologia apropriada a este tipo de material alternativo.

O autor concluiu que a utilização do ASIC em camadas betuminosas tem um enorme potencial e que as conclusões a que chegou justificam a continuidade da investigação.

Apresenta-se no Quadro 7 uma síntese das características do ASIC e das misturas betuminosas em que é incorporado, determinadas no âmbito dos trabalhos referidos.

Da análise do Quadro 7 é possível constatar as características das escórias de aciaria estudadas em 1985 (mistura de escórias BOF e EAF) e as escórias de aciaria (ASIC) estudadas mais recentemente, provenientes unicamente do forno de arco elétrico (diferenciando-se em particular, a absorção de água).

5 – REQUISITOS NORMATIVOS APLICÁVEIS

A legislação sobre o uso eficiente de recursos, de subprodutos e materiais secundários é muito vasta. A nível europeu, o enquadramento tem sido feito pela Diretiva Quadro dos Resíduos (2008/98/EC), segundo a qual as escórias de aciaria são classificadas como resíduos. O estatuto legal das escórias ferrosas (alto forno e aciaria), ou seja, a sua classificação como resíduo, produto ou subproduto tem sido discutido em todo o mundo há mais de 25 anos.

A *Euroslag* e a *Eurofer* têm vindo a apresentar o ponto de vista da indústria do aço sobre este assunto desde 2006. Através do documento “*Legal status of Slags*”, declararam a discordância do setor com a classificação das escórias como resíduo, por ignorar as aplicações existentes no mercado, nomeadamente como material de construção e como fertilizante.

A transposição da Diretiva em 2010 definiu as condições para caracterizar um subproduto e para uma substância ou material deixar de ser considerado um resíduo e passar a ser considerado um produto/ matéria-prima secundária. Esta Diretiva veio assim introduzir a definição de subproduto no contexto dos resíduos, deixando em perspetiva a elaboração de um procedimento harmonizado no qual se definiriam os critérios comunitários para os países da União Europeia poderem comprovar a conformidade das suas escórias e solicitar o fim do estatuto de resíduo, o que nunca veio a ser publicado. Isto levou alguns países a criarem projetos legislativos próprios, definindo critérios nacionais, para obterem o fim do estatuto de resíduo para as suas escórias.

Em 2012, a *Euroslag* e a *Eurofer* elaboram o documento “*Position Paper on the Status of Ferrous Slag – complying with the Waste Framework Directive (articles 5/6) and Reach Regulation*”, no qual a indústria europeia do aço e das escórias (incluindo as empresas de processamento) assumem uma tomada de posição conjunta relativamente à classificação das escórias ferrosas, baseada nas definições da Diretiva Quadro dos Resíduos (2008/98/CE), para estas serem classificadas como subprodutos e ser-lhes retirado o estatuto de resíduos, o que, contudo, ainda não sucedeu. Assim, atualmente, o estatuto legal das escórias de aciaria, é diferente de país para país. Em alguns países são classificadas como resíduos e noutros como subprodutos/ produtos, causando alguma desigualdade no sector (*Euroslag* e *Eurofer*, 2012).

Não tendo sido definidos critérios comunitários nem nacionais para o fim de estatuto de resíduo, as escórias de aciaria em Portugal têm estado ainda abrangidas pela legislação de resíduos, tendo os seus produtores que cumprir o previsto para a gestão de resíduos, nomeadamente no que respeita à sua valorização e competindo às entidades competentes em matéria de resíduos autorizar a sua utilização como material de construção.

Quadro 7 – Propriedades do ASIC e das misturas betuminosas em que é incorporado, determinadas no âmbito de estudos realizados a nível nacional

Propriedades	Camada de desgaste			Camada de base - AC20 base ligante (MIB)				
	(LNEC, 1985) (escórias BOF+EAF)	(Cunha, 2006)	(Cunha, 2007)	(Universidade do Minho, 2005)	(Marques, 2009)	(Crucho, 2011)	(Andrade, 2015)	(LNEC, 2017)
Frações granulométricas	0/5 e 0/10	0/10 e 10/16	0/10 e 10/16	fração grossa e fina	0/10	-	0/6, 6/12 e 12/18	0/6, 6/12 e 12/18
Equivalente areia	89% - 97%	70%	70%	100%	78%	-	87%	87%
Azul de metileno	-	-	-	0,0 g/kg	0,2 g/kg	-	0,5 g/kg	0,5 g/kg
Índice de forma	-	16%	16%	(lamelação/alongamento)	1%	-	0%	0%
Índice de achatamento	-	4%	4%	10%	2%	-	1%	1%
Massa vol. material impermeável	3,09 - 3,05 g/cm³	3,43 g/cm³	3,43 g/cm³	-	3,84 Mg/m³	-	-	3,743-3,725-3,678 Mg/m³
Massa vol. partículas saturadas	-	3,25 g/cm³	3,25 g/cm³	-	3,69 Mg/m³	-	-	3,691-3,633-3,599 Mg/m³
Massa vol. partículas secas	-	3,17 g/cm³	3,17 g/cm³	-	3,63 Mg/m³	-	-	3,569-3,672-3,672-3,600-3,569 Mg/m³
Absorção de água	4,0%	2,38%	2,38%	2,58%	1,7%	-	0,5-0,9%	0,5%-0,9%-0,8%
Coefficiente <i>Los Angeles</i>	32 a 36	20	20	27	25	-	14	14
Coefficiente micro-Deval	-	-	-	-	-	-	7%	7%
Afinidade agregado-betume	baixa	-	-	-	-	-	80%-70%-60% (6h-24h-48h)	70%-60% (24h-48h)
Composição da mistura	43% fração 0/10 32% fração 0/5 12% areia 13% filler	73% ASIC 0/10 25% ASIC 10/16 2% filler calcétrio	73% ASIC 0/10 27% ASIC 10/16	74% fração grossa 26% fração fina	20% ASIC 0/10 25% brita 14/20 20% brita 8/14 35% pó pedra	45% ASIC 0/10 32% brita 14/20 23% pó pedra	38% ASIC 12/18 22% ASIC 6/12 32% ASIC 0/6 8% filler 0/2	75% ASIC (0/6-6/12-12/18) 25% calcétrio (brita 4/12, pó, de pedra 0/4, filler 0/2)
Tipo de ligante betuminoso	60/70	50/70	50/70	50/70	50/70	-	50/70	50/70
Percentagem de betume	6,3%	5,3%	5,3%	4,0%	5,4%	-	5,1%	4,4%
Baridade provetes	2,38 g/cm³	2,707 g/cm³	2,708 g/cm³	2,77 g/cm³	2,51 g/cm³	-	-	-
Baridade máxima teórica	-	2,855 g/cm³	2,843 g/cm³	3,28 g/cm³	2,63 g/cm³	-	-	3,103 Mg/m³
Porosidade	10,3%	5,2%	4,9%	15,5%	4,1%	-	-	4,2%
Volume vazios agregados (VMA)	-	19,1%	18,9%	32,1%	24,3%	-	-	17,2%
% volumétrica de betume	-	13,9%	13,9%	-	-	-	-	-
Grau de saturação do betume	59%	72,8%	73,8%	51,7%	-	-	-	-
Relação ponderal filler/betume	-	1,08	1,1	-	-	-	-	-
Deformação	4,5 mm	3,7 mm	3,6 mm	3,0 mm	3,51 mm	-	-	3,7 mm
Estabilidade Marshall	8300 N	1500 kgf	14,5 kN	9820 N	12,2 kN	-	-	15,8 kN
Índice resistência conservada	-	-	93%	-	71,1%	-	-	86%
Resistência à fadiga (módulo de rigidez)	-	-	-	-	-	-	-	Comportamento adequado à fadiga
Resistência à deformação permanente	-	-	-	-	-	-	-	Maior nº de ciclos para os mesmos níveis de extensão que as misturas tradicionais WTS _{MR} = 0,22 mm/10³ ciclos PRD _{MR} = 16,5%

Com a recente publicação da Diretiva Quadro de Resíduos, Diretiva (UE) 2018/851 de 30 de maio de 2018, definem-se novas condições para subprodutos e para o fim do estatuto de resíduo. A nova Diretiva prevê que sejam “ponderados critérios específicos para a atribuição do fim do estatuto de resíduo pelo menos para os agregados, papel, pneus e têxteis”, ficando certamente facilitada a classificação dos materiais, como é o caso das escórias de aciaria, como subprodutos.

Para ser comercializado como produto de construção, o agregado siderúrgico deverá estar em conformidade com as especificações existentes para os materiais de construção, nomeadamente as normas europeias harmonizadas de produto.

A utilização da escória de aciaria na construção de estradas, um pouco por todo o mundo, tem demonstrado a conformidade das suas propriedades como agregado artificial, estando abrangido pela obrigatoriedade de marcação CE. Os agregados de escórias atualmente colocadas no mercado cumprem os requisitos nacionais e as normas europeias harmonizadas que especificam os aspetos técnicos e ambientais aplicáveis ao respetivo uso.

Para garantir a uniformidade da qualidade do agregado de escória, ou ajustar as suas propriedades aos requisitos para determinado uso específico, são aplicadas diferentes medidas durante a produção da escória, nomeadamente: adição de substâncias estabilizadoras ou exposição às ações atmosféricas para o cumprimento do requisito de estabilidade volumétrica; arrefecimento moderado ou rápido; separação do ferro por processos magnéticos; britagem e peneiração para obter granulometrias específicas para determinados fins (Euroslag e Eurofer, 2012).

O controlo de produção contínuo efetuado pelos produtores, de acordo com o controlo de produção em fábrica (CPF) adequado, contribui para garantir a qualidade da escória para determinados fins. Todas as normas europeias relevantes para a escória contêm critérios de conformidade baseados num sistema CPF. Na maioria dos países da UE, o sistema CPF dos produtores é certificado por uma terceira parte e a maioria dos produtos de escória são marcados e comercializados com a marca CE (Euroslag e Eurofer, 2012).

Apesar de não existirem, ao nível da UE, normas específicas para a construção de pavimentos com misturas betuminosas incorporando agregados de escórias de aciaria, cada país usa as especificações nacionais aplicáveis aos agregados naturais e misturas betuminosas convencionais, como é o caso do CETO em Portugal (EP, 2014), o qual tem como referência as normas europeias de produto que especificam as características dos agregados (naturais, artificiais ou reciclados) a utilizar em misturas betuminosas e o desempenho dessas misturas betuminosas.

Há exemplos noutros países de alterações efetuadas em especificações nacionais, para incluírem valores limite para materiais alternativos, como é o caso, nomeadamente de Espanha que, no seu Caderno de Encargos (PG3), inclui critérios para a utilização de agregados siderúrgicos em camadas granulares de pavimentos rodoviários, e do Reino Unido, que prevê a sua utilização nas especificações de construção de estradas “*Highway Works series 900*” (Highways England, 1992).

Atualmente não existe regulamentação específica para as escórias ou esta não tem sido aplicada uniformemente na UE. É necessária cooperação entre os parceiros europeus, não só para partilhar conhecimento e melhores práticas, mas também para colaborar no estabelecimento de regulamentação comum. A segurança e a possibilidade de aplicação de uma escória são determinadas com base na regulamentação existente, podendo até dentro do mesmo país serem aplicados diferentes regulamentos pelas entidades governamentais locais. O que significa que o uso de uma determinada escória não depende apenas das suas propriedades, mas dos requisitos aplicáveis no local onde a escória é produzida ou usada (Unamuno e Morillon, 2013).

A nível internacional, tal como já referido, alguns países publicaram normas específicas para a aceitação e utilização das escórias de aciaria em pavimentos, como é o caso do Brasil, China, Japão, Estados Unidos e Alemanha.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A procura crescente de agregados naturais, nomeadamente para a construção rodoviária, é em muitos países um constrangimento real, onde, além de serem recursos escassos, dispendiosos, com restrições ambientais crescentes à sua exploração, não têm a qualidade adequada às exigências da construção. A aplicação de agregados de escória de aciaria na construção de estradas foi iniciada há já algumas décadas em vários países, com o objetivo de escoar os resíduos/subprodutos que se amontoavam nas unidades siderúrgicas e que representavam uma potencial alternativa aos agregados naturais.

A indústria siderúrgica tem produzido por todo o mundo resíduos/ subprodutos cuja aplicação tem sido bem-sucedida como substituto dos agregados naturais, em particular na construção rodoviária.

As escórias EAF são atualmente consideradas equivalentes a materiais rochosos convencionais, tendo o seu uso aumentado exponencialmente nas últimas décadas (Mombelli et al., 2014). As escórias BOF e EAF, com diferentes origens na Europa, são geralmente comparáveis e independentes do seu produtor podendo ser usadas nas mesmas aplicações, com poucas exceções (FEHRL, 2008).

O bom desempenho do agregado siderúrgico tem garantido a sua utilização crescente em setores diversificados em todo o mundo. Além do uso em pavimentação, este material é usado na indústria de cimento, agricultura, sistemas de tratamento de água e engenharia hidráulica.

Os primeiros estudos sobre a utilização de escórias de aciaria em misturas betuminosas são do início da década de 60, do século XX. A maioria dos estudos nesta área incidiu na determinação das propriedades químicas, físicas e mecânicas das escórias e na sua comparação com as dos agregados naturais. Os estudos realizados revelaram propriedades superiores às dos agregados convencionais, havendo consenso quanto ao facto de estes materiais, se devidamente estabilizados, conferirem propriedades também superiores às camadas dos pavimentos onde são incorporados, nomeadamente maior durabilidade, aderência superficial, resistência à deformação permanente, melhorando de uma forma geral o desempenho dos pavimentos, a segurança e a sua vida útil.

Nesta área, como em muitas outras, evoluiu-se com os erros do passado. A aplicação deste tipo de materiais na construção de estradas, na década de 70 e 80, mobilizou entidades governamentais, empresas siderúrgicas, fabricantes de misturas betuminosas e a comunidade científica para a identificação das causas dos problemas encontrados, procura de soluções e implementação de melhorias que garantem atualmente a qualidade dos agregados siderúrgicos produzidos em todo o mundo, com aplicações na construção.

Verifica-se um consenso generalizado, na bibliografia consultada, quanto à principal limitação do uso de escórias de aciaria na construção ser a sua expansão volumétrica, salientando-se a importância do adequado tratamento e controlo, previamente à sua utilização.

Durante duas décadas, o principal objetivo de investigação na Europa, no que se refere às escórias de aciaria, relacionou-se com a sua estabilidade volumétrica. Atualmente esta questão está ultrapassada com a maturação adequada das escórias (hidratação da cal livre), permitindo a sua utilização nas várias camadas do pavimento, ligadas e não ligadas. Refere-se que, depois de estabilizadas, as escórias podem ser tratadas de forma segura com ligante betuminoso em camadas de desgaste de pavimentos (FEHRL, 2008), sendo o seu uso em camadas ligadas considerado mais favorável, por ficar dificultada a hidratação dos óxidos existentes (SAMARIS, 2006).

A indústria siderúrgica a nível mundial melhorou, ao longo do tempo, o processo de fabrico do aço e o processamento dos agregados de escória, ao mesmo tempo que se desenvolveram, um pouco por todo o mundo, trabalhos de investigação e especificações técnicas visando o uso adequado das escórias, principalmente no que se refere à sua estabilidade volumétrica, em particular na construção de estradas.

A publicação de normas de produto a nível da UE, aplicáveis às misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, estabeleceu regras uniformes e requisitos para os agregados

naturais, artificiais (como o agregado siderúrgico) ou reciclados, usados na sua construção. É atualmente possível fornecer um material seguro, com características homogêneas, estável ao longo do tempo e que não exige técnicas de construção especiais, indo ao encontro da regulamentação da União Europeia (Federacciai, 2012).

O agregado siderúrgico é um produto tecnicamente competitivo no mercado dos agregados para a construção civil, em especial para pavimentação rodoviária (Tavares et al., 2011).

A quantidade considerável de dados disponíveis atualmente sobre o comportamento das estradas construídas com materiais de escória, permite considerar estes materiais de qualidade superior, comprovado pela experiência dos seus utilizadores (Australasian Slag Association, 2002).

Evidenciando-se a nível mundial a viabilidade de aplicação destes materiais, devidamente estabilizados, como substitutos dos agregados naturais na construção de estradas, as escórias de aciaria são atualmente aceites como materiais de construção, cumprindo os requisitos aplicáveis aos agregados naturais, para os vários fins em que são usados. A necessidade da marcação CE, para a sua comercialização, veio proporcionar aos produtores uma forma de garantir a uniformidade e conformidade das propriedades destes produtos, nomeadamente a expansibilidade.

Por forma a promover o uso deste tipo de agregados, ainda frequentemente considerados resíduos, vários autores salientam também a sua contribuição para a redução da pegada ambiental de pedreiras e da desflorestação (FICCI, 2014) e defendem a preferência pelo seu uso nos contratos de obras públicas e a sua inclusão nas estratégias nacionais de compras públicas ecológicas, como contributo para o desenvolvimento sustentável (Federacciai, 2012).

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, R. (2015). *Aplicação de ASIC Em Camadas Betuminosas de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Australasian Association. (2015). *Electric Arc Furnace Slag - Quick Reference Guide 4-2015*. Australasian (Iron and Steel) Slag Association. Austrália.
- Australasian Slag Association (1999). *A Guide to the Use of Steel Furnace Slag in Asphalt and Thin Bituminous Surfacing*s. Australasian Slag Association Inc, ISBN 0 9577051 31. Australia.
- Australasian Slag Association (2002). *A Guide to the Use of Slag in Roads*. Australasian Slag Association Inc, ISBN 0 9577051 58. Australia.
- Bernucci, L.; Motta, L.; Ceratti, J.; Soares, J. (2008). *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro.
- Bicalho, K.; Oliveira, F.; Raposo, C.; Castelo, R.; Silva, M. (2006). *Avaliação de três métodos de determinação da expansão de escórias de aciaria brasileiras para pavimentação*. 10 Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, V3, P. 777-786. Lisboa.
- Bohmer, S.; Moser, G.; Neubauer, C.; Peltoniemi, M.; Schachermayer, E.; Tesar, M.; Winter, B. (2008). *Aggregates Case Study: Final Report - Slags from ferrous metal production*. Final Report referring to contract n°150787-2007 F1SC-AT. Institute for Prospective Technological Studies. Vienna, Austria.
- Branco, V.; Motta, L.; Soares, J. (2004). *O efeito da heterogeneidade do agregado de escória nas propriedades de misturas asfálticas*. 18º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 8-12. Brasil.

- CEDEX, C. (2013). *Escorias de aceria de horno de arco electrico*. Catálogo de resíduos utilizables en construccion. Ministerio de Fomento; Ministério de Medio Ambiente Medio Rural Y Marino.
- CEN (2004). *EN 13043 Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas*.
- CEN (2006). *EN 13108-1 Bituminous mixtures; Material specifications; Part 1: Asphalt concrete*.
- CEN (2007). *EN 13242 Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction*.
- Correia, A.; Roque, A.; Ferreira, S.; Fortunato, E. (2012). *Case Study to promote the use of industrial byproducts: The relevance of performance tests*. Journal of ASTM International, Vol.9, nº2. Paper ID JAI 103705.
- Correia, A.; Roque, A.; Martins, J.; Caldeira, L.; Ferreira, S.; Fortunato, E. (2008). *Trecho experimental no itinerário EN311. Fafe/ Várzea Cova*. CVR 2/2008, Relatório Final.
- Correia, A.; Ferreira, S.; Castro, F.; Trigo, L.; Roque, A.; Fortunato, E.; Santayana, F. (2006). *Estudo de viabilidade de aplicação do ASIC da Siderurgia Nacional do Seixal em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro. Comparação com as características do agregado da Siderurgia Nacional da Maia*. CVR 24/2006, Relatório Final.
- Crucho, J. (2011). *Contribuição para o estudo da resistência à fadiga de misturas betuminosas com incorporação de ASIC*. p.135. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Cunha, A. (2006). *Estudo de execução de betão betuminoso. Betão betuminoso com características de desgaste*. Documento disponibilizado pela Siderurgia Nacional.
- Cunha, A. (2007). *Estudo de execução de mistura betuminosa com características de desgaste, (ASIC) em betão betuminoso*. Documento disponibilizado pela Siderurgia Nacional.
- Departamento de Medio Ambiente Y Vivienda (2009). Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorizacion de escorias siderurgicas. Diario Oficial de Cataluña Número 5328, Cataluña.
- DNER (1994). *DNER-EM 262/94. Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Especificação*. Departamento Nacional de Estradas Rodoviárias. Brasil.
- DNER (1994a). *DNER-EM 263/94. Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários. Procedimento*. Departamento Nacional de Estradas Rodoviárias. Brasil.
- DNIT (2007). *DNIT 031/2004-ES. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasil.
- EEF (2018). *Steel-Key statistics*. Obtido de EEF The manufacturers' organisation: <http://www.eef.org.uk/uk-steel/key-statistics>
- EP (2014). *Características dos materiais. Caderno de Encargos Tipo Obra*. 14.03 - Pavimentação. Estradas de Portugal.
- Euroslag & Eurofer (2012). *Position Paper on the Status of Ferrous Slag complying with the Waste Framework Directive (articles 5/6) and the REACH Regulation*.
- Euroslag (2014). *Statistics 2014*. Obtido de: <http://www.euroslag.com/products/statistics/2014/>
- Euroslag (2016). *Aggregates*. Obtido de <http://www.euroslag.com/applications/aggregates/>
- Euroslag (2016a). *Properties*. Obtido de <http://www.euroslag.com/products/properties/>

- Federacciai (2012). *La Valorizzazione degli aggregati di Origine Siderurgica - La scoria siderúrgica: da problema a risorsa*. Itália. Obtido de: <http://www.federacciai.it/wp-content/uploads/2017/06/Documento-scoria-Federacciai-maggio-2012.pdf>
- FEHRL (2008). *New Road Construction Concepts (NR2C)*. Project supported through the Sixth Framework Programme of the European Union. Obtido de: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/projects_sources/nr2c_final_report.pdf
- FEHS-Institut, DSU, HKM, Arcelor Mittal, ThyssenKrupp Stee. (2008). *Slag: A sound choice in favour of ecology*. Publication of Steel Industry in North-Rhine Westphalia, Germany. Obtido de: http://www.fehs.de/uploads/media/slag_english.pdf
- Fernandes, G.; Caliman, R.; Barbosa, M.; Fernandes, D.; Hilário, R.; Alves, H. (2014). *Caracterização da escória de aciaria LD para emprego como agregado asfáltico para pavimentos no estado da Bahia*. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Brasil.
- Ferreira, S. (2010). *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares. Aplicação às escórias de aciaria nacionais*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- FHWA (2008). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction – Steel slag*. REPORT - Publication Number: FHWA-RD-97-148. Obtido de: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/ssa1.cfm>
- FICCI (2014). *Using Steel slag in infrastructure development*. Obtido de FICCI blog: <http://blog.ficci.com/steel-slag/5291/>
- Fistic, M.; Strineka, A.; Roskovic, R. (2010). *Properties of steel slag aggregate and steel slag asphalt concrete*. SLOVENSKI KONGRES O CESTAH IN PROMETU, Portoroz. Croácia.
- Freitas, H.; Motta, L. (2008). *Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado*. TRANSPORTES, volume XVI, nº2. ISSN: 1415-7713.
- Gobierno de Espana (2015). *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes - Instrucciones de construcción (PG3)*. Espanha.
- Graffitti, D. (2002). *Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica*. Dissertação para obtenção de título de mestre em engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Grubesa, I.; Barisic, I.; Fucic, A.; Bansode, S. (2016). *Characteristics and uses of steel slag in Building Construction*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. ISBN: 978-0-08-100376-3.
- Harsco (2016). *ASIC- Agregados artificiais. Materiais avançados para um Mundo Sustentável*. Obtido de <http://www.ecoasic.com/apresentacao/>
- Highways England, 1992. *Manual of Contract Documents for Highway Works (MCHW)*. Volume 1 - Specification for Highway Works. Series 900, Road Pavements - Bituminous Bound Materials.
- IHOBE, S. (1999). *Libro Blanco para la minimizacion de residuos e emisiones - Escorias de acerías*. Departamento de Ordenacion del Território, Vivenda e Medio Ambiente del Gobierno Vasco. País Basco, Espanha.

- JERNKONTORET, S. (2015). *Slag, a very usable product*. Obtido de:
<http://www.jernkontoret.se/en/the-steel-industry/production-utilisation-recycling/steel-production-residues/slag/>
- Jones, N. (2011). *Slag product applications*. Obtido de Global Slag:
<http://www.globalslag.com/magazine/articles/655-slag-product-applications>
- Lafarge Canada. (2016). *Aggregate specifications- Building better cities*. Obtido de:
[http://lafargesimcoe.buildingbettercities.ca/media/documents/Ontario%20Sand,%20Stone%200&%20Gravel%20Association%20of%20Ontario%20\(OSSGA\)/Aggregate%20Specification%20s.pdf](http://lafargesimcoe.buildingbettercities.ca/media/documents/Ontario%20Sand,%20Stone%200&%20Gravel%20Association%20of%20Ontario%20(OSSGA)/Aggregate%20Specification%20s.pdf)
- Likoydis, S.; Liapis, I. (2011). *Use of electric arc furnace slag in thin skid-resistant surfacing*. 5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements. Thessaloniki, Greece, 1-3 June 2011.
- LNEC (1985). *Caracterização de escórias de aciaria para utilização em misturas betuminosas*. Relatório nº 249/85-NPR. Lisboa: LNEC, 60 p.
- LNEC (2017). Estudo da incorporação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) em misturas betuminosas para pavimentação. Relatório 419/2017 - DT/NIT.
- Marques, P. J. (2009). *Contribuição para o estudo da viabilidade de escórias de aciaria em misturas betuminosas*. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Mombelli, D.; Mapelli, C.; Barella, S.; Gruttadauria, A.; Le Saout, G.; Garcia-Diaz, E. (2014). *The efficiency of quartz addition on electric arc furnace (EAF) carbonsteel slag stability*. Journal of Hazardous Materials 279C:586-596, July 2014.
- Motz, H. (2008). *Utilization of steel slag in Germany – Technical and Environmental aspects*. II Workshop “Sustainability of steel sector”. São Paulo, Brasil.
- Neto, J.; Oliveira, F.; Aguiar, M. (2015). *Revisão de estudos sobre a aplicação de escória de aciaria na pavimentação rodoviária*. 44ª Reunião Anual de Pavimentação e 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Foz do Iguaçu, Brasil.
- Nippon Slag Association. (2016). *About Iron and Steel Slag*. Obtido de:
<http://www.slg.jp/e/slag/index.html>
- Oluwasola, E.; Hainin, M.; Aziz, M. (2014). *Characteristics and Utilization of Steel Slag in Road Construction*. Jurnal Teknologi 70:7, 117-123 (eISSN 2180-3722). Malásia.
- Pasetto, M.; Baldo, N. (2011). *Mix design and performance characterization of asphalt concretes with electric arc furnace slags*. Construction and Building Materials 25, 3458-3468, 748-757. Elsevier.
- Pina, A.; García, M. (2011). *Proyecto sobre residuos: Utilizacion de escorias como sustitutos de áridos*. Master Professional en Ingeniería Y Gestion medioambiental 2010-2011. Escuela de Organizacion Industrial. Gobierno de Espana. Ministerio de Industria, Turismo e Comércio.
- Ramos, F. (2009). *O Uso do Agregado Siderúrgico (Escória de Aciaria) em Bases e Revestimentos Asfálticos de Pavimentos – Conceitos e Características. Da aciaria para o pavimento*. Portal Metálica –Construção civil. Obtido de: <http://wwwo.metallica.com.br/da-aciaria-para-o-pavimento>.
- Rocha, F. (2011). *Utilização do Agregado Siderúrgico (Escória de Aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial*. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.

- Rohde, L. (2002). *Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo laboratorial*. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia. Porto Alegre, Brasil.
- SAMARIS (2006). *Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure*. Competitive and Sustainable Growth Programme. Final Summary Report (D32), SAM-D32. Project funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 5th Framework Programme.
- Sherwood, P. (2001). *Alternative Materials in Road Construction: A guide to the use of recycled and secondary aggregates*. London: Thomas Telford, ISBN: 0727730312.
- SN Seixal (2007). *Relatório da pavimentação realizada com ASIC da SN do Seixal*. Documento disponibilizado pela Siderurgia Nacional de Paio Pires.
- Sofilić, T.; Mladenović, A.; Sofilić, U. (2011). *Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production*. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 19:2, 148-157, DOI: 10.3846/16486897.2011.580910.
- Sofilić, T.; Rastovčan-Mioč, A.; Ćosić, M.; Merle, V.; Mioc, B.; Sofilic, U. (2010). *EAF Steel Slag Application in Croatian Asphalt Mixture Production*. Proceedings of International Scientific Conference MOTSP 2010. Croácia.
- Sofilic, T.; Sofilic, U.; Brnardic, I. (2012). *The Significance of iron and steel slag as by-product for utilization in road construction*. 12th International Foundrymen Conference. May 24th, 25th, 2012, Opatija, Croatia.
- Tavares, D.; Oda, S.; Motta, L. (2011). *Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em pavimentação asfáltica*. COPPE–Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ilha do Fundão–Rio de Janeiro, Brasil.
- UK Environment Agency. (2014). *Consultation on the draft Quality Protocol for Steel Slag*. Obtido de: www.environment-agency.gov.uk
- Unamuno, I.; Morillon, A. (2013). *Recent and former European RFCS slag research projects*. Proceedings of 7th European Slag Conference "Don't waste your secondary resources". Euroslag Publication nº6.
- Universidade do Minho (2005). *Avaliação da possibilidade de utilização de escória negra de siderurgia em misturas betuminosas para camadas de pavimentos rodoviários*. Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Pavimentos Rodoviários. Documento disponibilizado pela Siderurgia Nacional.
- Wen, H.; Wu, E.; Bhusal, S. (2014). *Evaluation of Steel Slag as Hot Mix Asphalt Aggregate*. Final Report. Washington Center for Asphalt Technology (WCAT). Washington State University.
- Worldsteel Association (2017). *World Steel in Figures 2017*. ISBN 978-2-930069-88-3. Obtido de: <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2017/world-steel-in-figures-2017.html>
- Worldsteel Association (2018). *Steel Industry by-products - factsheet 2017*. Obtido de: https://www.worldsteel.org/publications/factsheets/content/01/text_files/file0/document/Fact_By-products_2016.pdf
- WSDOT (2015). *WSDOT Strategies Regarding Use of Steel Slag Aggregate in Pavements*. A Report to the State Legislature in Response to 2ESHB 1299. Construction Division Pavements Office.

- Wu, S.; Xue, Y.; Ye, Q.; Chen, Y. (2007). *Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures*. Building and Environment 42 (2007) 2580–2585. Elsevier (Science Direct).
- Xirouchakis, D.; Manolakou, V. (2011). *Properties of an EAF slag produced in Greece: A construction material for sustainable growth*. 5th International Conference “Bituminous Mixtures and Pavements”. Thessaloniki, Grécia.
- Yildirim, I.; Prezzi, M. (2009). *Use of steel slag in subgrade applications*. Joint Transportation Research Program, FHWA/IN/JTRP-2009/32. Final Report.
- Yildirim, I.; Prezzi, M. (2011). *Chemical, Mineralogical and Morphological Properties of Steel Slag*. *Advances in Civil Engineering*. Volume 2011. Article ID 463638, 13 pages.
- Zumrawi, M.; Khalill, F. (2015). *Experimental study of steel slag used as aggregate in asphalt mixture*. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol. 9, nº6. World Academy of Science, Engineering and Technology. Sudão.