

## **AVALIAÇÃO DA ADESIVIDADE ESCÓRIA-LIGANTE E SEUS EFEITOS NA RESISTÊNCIA AO DANO POR UMIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONTENDO ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E FÍLERES DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES QUÍMICAS**

**Julia Rodrigues Barbosa de Sousa Paula**

**Rodolpho Medeiros Frossard**

**Jamilla Lutif Emi Sudo Teixeira**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC)

### **RESUMO**

Estudos vem sendo desenvolvidos com a intenção de substituir o agregado natural das misturas asfálticas por escória de alto-forno resfriada ao ar (EFRA). Esta escória, apesar de possuir boas características mecânicas, não apresenta boa adesividade ao ligante asfáltico segundo resultados visuais após procedimento ABNT NBR 12583. Buscando melhorar a adesividade ligante-EFRA, este artigo estuda a influência da adição de fileres (cal hidratada e dois pós provenientes da siderurgia) em misturas asfálticas por meio do ensaio de dano por umidade induzida e de análise de processamento digital de imagens (PDI) de amostras após ensaios de adesividade ao ligante betuminoso. Os resultados obtidos revelaram que adições dos fileres aumentaram a RRT das misturas estudadas. Pela análise do PDI verificou-se uma forte relação entre a adesividade agregado-ligante e a composição química dos materiais, com destaque para os óxidos de ferro e cálcio, que mostraram potencial para reduzir o dano devido a umidade induzida.

### **ABSTRACT**

Studies have been carried out with the intention of partially replacing the natural aggregate in asphalt mixtures by air-cooled blast furnace slag (ACBFS). This slag, despite having good mechanical characteristics, does not present good adhesiveness to the asphalt binder according to the visual results obtained after the ABNT NBR 12583 procedure. Seeking to improve the binder-ACBFS adhesiveness, this paper studies the influence of the addition of fillers (hydrated lime, and two powders from steel industry) in the asphalt mixture through the moisture damage test (DNIT 180) and digital image processing analysis (DIP) in samples after the adhesiveness to bituminous binder tests. The results obtained revealed that the additions of fillers increased the TSR of the studied mixtures. Also, the PDI analysis showed a strong relationship between aggregate-binder adhesiveness and the chemical composition of the materials, highlighting the iron and calcium oxides, which reduce the moisture induced damage.

## **1. INTRODUÇÃO**

Durante o processo de fabricação do aço são gerados grandes volumes de resíduos. De acordo com estimativas realizadas pelo Instituto Aço Brasil (IAB), cerca de 450 kg de coprodutos e resíduos são originados para cada tonelada de aço produzido. Dentre estes, destacam-se as escórias de alto-forno e de aciaria. Esta última vem sendo empregada na pavimentação, desde que atendidas as normas do DNIT 031/2006-ES Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço e DNER-EM 262/94 - Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Uma das grandes limitações do uso de escórias de aciaria é seu potencial expansivo. As escórias de alto-forno, no entanto, não são expansivas. Estas são formadas pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes e as cinzas do coque, durante a produção de ferro gusa. Quando resfriadas bruscamente, possuem características químicas e mineralógicas adequadas para a produção de cimentos, sendo este coproduto absorvido pelo setor de cimenteiras. No entanto, parte das escórias de alto-forno não sofrem resfriamento bruto, sendo resfriadas de forma lenta. Estas são denominadas escórias de alto-forno resfriadas ao ar (EFRA). Estudos realizados no Brasil e em outros países mostram que o seu uso é viável na pavimentação (IAB, 2019). A EFRA possui características como boa resistência à fricção, à decapagem e ao desgaste (FHWA, 2019). Entretanto, Moura et al. (2020) mostram que a EFRA, embora tenha boas características mecânicas, possui adesividade

insatisfatória ao ligante betuminoso, o que pode dificultar seu uso em misturas asfálticas.

A adesividade entre materiais, na maioria dos casos, é resultado do efeito sinérgico entre a adesão mecânica, o arranjo molecular, as energias de superfície e as reações químicas que ocorrem entre os materiais (Aguíay-Moya et al., 2016; Caro et al., 2008). Caro et al. (2008), estudando os mecanismos de adesão ligante-agregado, citam que esses quatro mecanismos de adesão são afetados pelas propriedades dos agregados, destacando a composição química dos mesmos. Em misturas asfálticas, a perda de adesão entre o agregado e o ligante é intensificada pela presença da umidade, sendo que para agregados ácidos, com grande percentual de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), a perda de adesão é maior (Cala et al., 2019). Dados obtidos por Moura et al. (2020) corroboram ao mostrar que a EFRA possui cerca de 37,1% de sua massa composta por  $\text{SiO}_2$ , o que atribui ao agregado um caráter ácido e com má interação ao ligante. O contrário pode ser visto em materiais que apresentam altos teores de óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), compostos químicos que contribuem para a ligação entre agregado e betume (Cala et al., 2021).

Para viabilizar o uso da escória de alto forno resfriada ao ar em misturas asfálticas, surge a necessidade da adição de fileres melhoradores de adesividade. Segundo Kumar e Varma (2021), na mistura, o filer interage de forma físico-química com o betume, formando uma mástique, que influencia na rigidez da mistura, no teor ótimo de ligante e na adesividade entre agregado e betume. Os autores ainda afirmam que a interação físico-química depende do tamanho, alcalinidade, forma e características da superfície do filer.

Moura et al. (2020) produziu misturas asfálticas com substituição de 25% de agregado natural por EFRA, utilizando como aditivo a cal hidratada e pó EP – proveniente do precipitador eletrostático, em um percentual referente a 1,5% da massa de agregado. Além de ensaios físicos, químicos e termodinâmicos, os autores também avaliaram a adesividade através do ensaio de Dano por Umidade Induzida (DNIT 180/2018-ME), encontrando resultados positivos quanto às misturas com presença de filer em sua composição, com valores de Resistência à Tração Retida (RRT) superiores às misturas asfálticas sem adição de fileres, porém abaixo do RRT de 70%, recomendado por norma.

A presente pesquisa tem como objetivo dar continuidade aos estudos de Moura et al. (2020), produzindo misturas asfálticas com substituição parcial de agregado natural pela EFRA, mas fazendo o uso de 2% de adição de melhoradores de adesividade, com intuito de obter resultados satisfatórios quanto ao critério de RRT. É ainda objetivo dessa pesquisa, estudar o pó GCBF – proveniente do *Gas Cleaning Bag Filter*, resíduo siderúrgico que, assim como a cal hidratada, possui um alto teor de óxido de cálcio em sua composição, analisando sua eficácia como melhorador de adesividade.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 ilustra o planejamento experimental adotado neste estudo.



Figura 1: Planejamento experimental

## 2.1 Agregados e Ligante Asfáltico

Para a produção das misturas asfálticas a serem estudadas foram utilizados agregados naturais (AN) de origem granítica, nas formas de brita 1 (B1), de brita 0 (B0) e de pó-de-pedra, fornecidos pela empresa Brasitália, localizada em Cariacica (ES). Parte dos agregados naturais foram substituídos por EFRA para produção de misturas asfálticas. Assim amostras de EFRA com tamanho nominal máximo de 12,5mm foram fornecidas pela siderúrgica Arcelor Mittal Tubarão, localizada na Serra (ES). O ligante betuminoso utilizado nessa pesquisa foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) classificado como CAP 30/45, fornecido pela empresa Vilabetume situada na Marca Ambiental, município de Cariacica - ES.

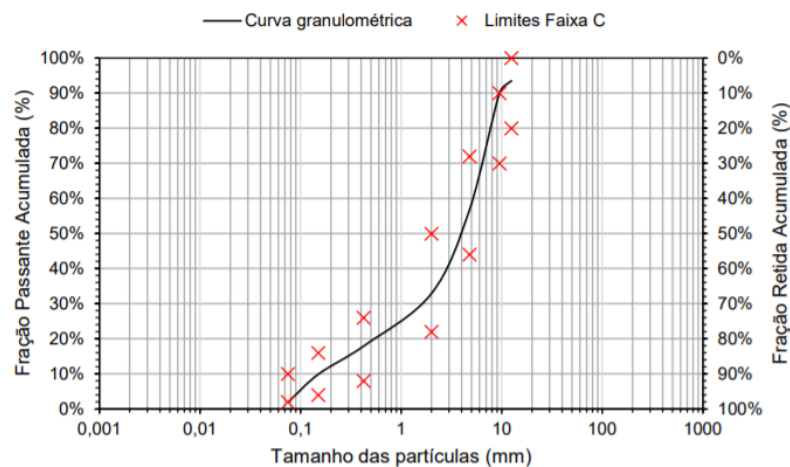
As misturas com EFRA receberam adição de fíleres melhorados de adesividade. Foi utilizada cal hidratada e dois resíduos da indústria siderúrgica, denominados pó EP e pó GCBF, também fornecidos pela ArcelorMittal Tubarão. Os dois resíduos provenientes da siderurgia foram selecionados devido a sua composição química, com óxidos de ferro e cálcio presentes em quantidades significativas sendo a presença desses compostos relacionada a uma boa adesividade ao ligante asfáltico segundo estudos recentes (Caro et al., 2008; Moura et al, 2020; Cala et al., 2021; Lucas Júnior, 2018). O pó EP é proveniente do precipitador eletrostático, formado durante a etapa de sinterização da siderurgia, no sistema de exaustão. Possui alto teor de óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ) em sua composição. O pó GCBF é originado no equipamento *Gas Cleaning Bag Filter*, instalado a jusante dos precipitadores eletrostáticos, intensificando ainda mais a retenção de substâncias particuladas. Esse material possui elevada concentração óxido de cálcio (CaO), fato decorrente da injeção de cal hidratada aplicada imediatamente antes da entrada do *Bag Filter*, com intuito de remover materiais como  $SO_x$ , HCl e HF do aço (REMUS et al., 2013).

Para a caracterização dos agregados graúdos, foram realizados os ensaios seguindo as normas ABNT NBR NM 053, para o ensaio de massa específica e de absorção de água, ABNT NBR

NM 51, para o ensaio de abrasão Los Angeles, e ABNT NBR 12583, para o ensaio de adesividade. Para os agregados miúdos, os ensaios realizados seguiram as normas DNER 084/1995 - ME, para o ensaio de massa específica, e ABNT NBR 12052, para o ensaio de equivalente de areia. Os fileres também foram avaliados quanto a sua composição química através do ensaio de Fluorescência de Raios-X.

## 2.2 Dosagem das Misturas Asfálticas

Foi feito o estudo de dosagem das misturas propostas, segundo a metodologia Superpave, utilizando o compactador giratório Superpave (CGS) para a moldagem dos corpos de prova (CP). Foi adotada uma composição de agregados enquadrada na Faixa C especificada pela norma do DNIT 031/2006-ES, conforme mostra a Figura 2.



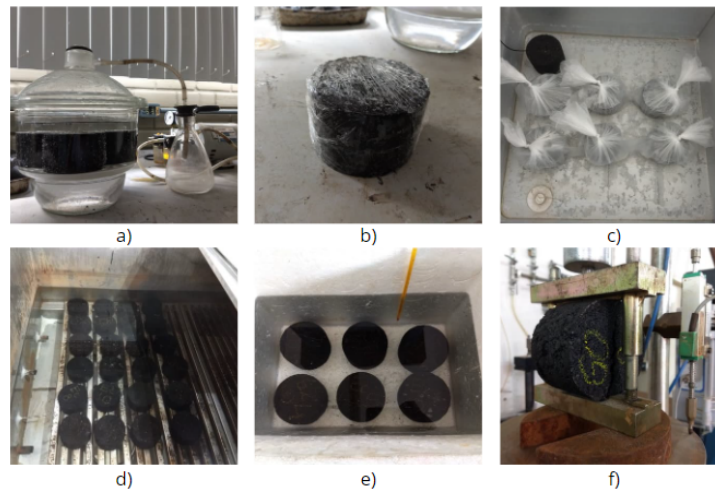
**Figura 2:** Curva granulométrica da composição da pesquisa

Antes da compactação dos CPs, foi determinado o número de giros do CGS, que, segundo a metodologia Superpave, deve ser de acordo com o tráfego escolhido. Nessa pesquisa, foi considerada a condição de tráfego médio, obtendo  $N_{projeto}$  de 75 giros. Prosseguiu-se com os procedimentos estabelecidos pela norma do DNIT 178/2018 - PRO para a moldagem dos CPs. Segundo as especificações exigidas pela norma DNIT 031/2006-ES, o teor de projeto ( $P_b$ ) é aquele que corresponde ao volume de vazios ( $V_v$ ) de  $4\% \pm 1\%$ , com esforço de compactação referente ao número de giros de projeto ( $N_{projeto}$ ). É preciso ainda que a mistura compactada atenda a relação betume/vazios (RBV) entre 75 e 82, e possua vazios de agregado mineral (VAM) mínimo de 16. Um teor de ligante inicial de 5,8% foi usado com base nos resultados de Moura et al. (2020) e ajustes foram feitos para atingir os limites especificados pela norma DNIT 031/2006-ES.

## 2.3 Ensaio de Dano por Umidade Induzida

O teor ótimo encontrado foi utilizado para moldar os CPs utilizados no ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI), regido pela norma DNIT 180/2018 – ME. A norma determina que a amostra para a execução do ensaio deve ser constituída de seis CPs, divididos em dois grupos, um condicionado e outro não, e devem apresentar um  $V_v$  de  $7\% \pm 1\%$ . Na Figura 3 são mostrados alguns registros desta pesquisa com as etapas do condicionamento, que é finalizado com a determinação da resistência à tração por compressão diametral (RTCD), realizado de acordo com a norma DNIT 136/2018 - ME. Como resultado, o DUI é avaliado pela razão entre a RTCD dos corpos de prova condicionados e não condicionados, denominada razão de

resistência à tração retida (RRT). O valor mínimo de RRT recomendado para misturas asfálticas corresponde a 70% (Bernucci et al., 2008).

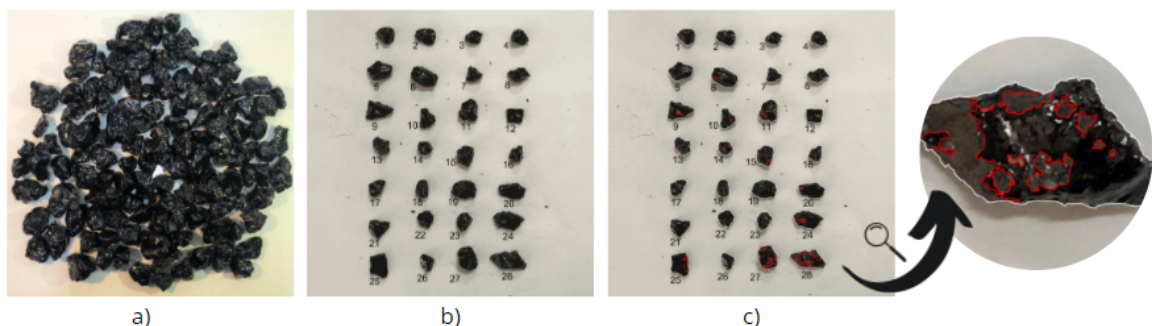


**Figura 3:** Ensaio de Dano por Umidade Induzida. a) saturação CPs b) CPs envolvidos com plástico filme e com sacola, c) congelamento no freezer a  $-18\pm 3^{\circ}\text{C}$  por 16 horas, d) banho térmico a  $60\pm 1^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, e) CPs em banho a  $25^{\circ}\text{C}$  por 2 horas, f) ensaio de RTCD.

#### 2.4 Percentual de Área de Agregado não Recoberta pelo Ligante por PDI

Buscando uma resposta quantitativa para o ensaio de adesividade (ABNT NBR 12583), Lucas Junior et al. (2019) desenvolveu em sua pesquisa uma metodologia baseada no Processamento Digital de Imagens (PDI), que determina o percentual de área de agregado graúdo recoberta pelo ligante asfáltico. Nessa pesquisa, foi utilizado o método em questão de forma adaptada, que determina o percentual de área de agregado não recoberto pelo ligante, através do uso do software AutoCAD, uma vez que não foi possível o uso do programa Matlab proposto pelo autor neste estudo em função do aspecto das imagens obtidas.

A amostra que se encontrava sobre uma superfície lisa foi reorganizada, afastando os agregados uns dos outros, e fotografada pela câmera de um smartphone de 12 megapixels. A imagem obtida foi exportada para o programa AutoCAD, onde os agregados foram numerados (Figura 4).



**Figura 4:** a) Amostra após ensaio ABNT NBR 12583. b) Agregados reorganizados e numerados. c) Mapeamento das áreas.

Primeiramente, foi feita uma análise individual para cada um desses agregados. Através das ferramentas do AUTOCAD “poli linha” e “área”, foi mapeada a área total, representada por

$A_{T,i}$ , em que  $i$  corresponde ao número de cada agregado. Da mesma forma, foram mapeadas as áreas onde ocorreram deslocamento da película betuminosa. A soma referente a todas as áreas onde ocorreu tal deslocamento é representada por  $A_{d,i}$ . A partir da Equação 1, é possível encontrar o percentual de área de agregado graúdo não recoberta pelo ligante asfáltico ( $P_i$ ).

$$P_i = \frac{A_{d,i}}{A_{T,i}} \cdot 100 \quad (1)$$

Após a análise, deve-se fazer a verificação de possíveis agregados *outliers*. Para tanto, foi feito o Teste Tau ( $\tau$ ) de Thompson modificado. Esse teste é recomendado pela *Measurement Uncertainty, Part I*, PTC 19.1-1998, da *American Society of Mechanical Engineers*, em ocasiões que há incertezas (Lucas Junior et al., 2019). A primeira iteração do teste é realizada com todos os agregados da amostra que possuem  $P_i > 0$ . O Tau de Thompson ( $\tau_i$ ) de cada agregado é determinado pela Equação 2, e a *Região de rejeição* é determinada pela Equação 3, considerando  $\alpha = 0,05$  e  $(n - 2)$  graus de liberdade.

$$\tau_i = \frac{P_i - x}{\alpha} \quad (2)$$

$$\text{Região de rejeição} = \frac{t_{\alpha, n-2}(n-1)}{\sqrt{n} \cdot \sqrt{n-2 + (\alpha, n-2)^2}} \quad (3)$$

Se  $\tau_i$  for menor que o valor Tau encontrado na tabela, o agregado analisado não é um *outlier* e o teste é finalizado. Caso contrário, o agregado é considerado um *outlier* e é retirado da amostra, sendo feita uma nova iteração analisando o próximo agregado que tem potencial de ser um *outlier*. Esse procedimento se repete até que  $\tau_i < \text{Região de rejeição}$ . O procedimento segue para uma análise da amostra inteira, dessa vez, excluindo os *outliers* encontrados. É feita a soma dos valores obtidos de  $A_{T,i}$  e de  $A_{d,i}$ , sendo possível encontrar, através da Equação 4, a área total da amostra não coberta pelo ligante ( $A_{Total}$ ).

$$P_{Total} = \frac{\sum A_{d,i}}{\sum A_{T,i}} \cdot 100 \quad (4)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Caracterização física dos agregados

Os resultados obtidos com os ensaios de caracterização estão dispostos na Tabela 1.

**Tabela 1:** Resultado dos ensaios de caracterização.

		Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Equivalente de Areia (%)	Abrasão Los Angeles (%)
AN	19mm - 9,5mm	2,752	0,82		
	9,5mm - 4,8mm	2,666	1,38	90	43,84
	<0,075mm	2,852	-		
EFRA	19mm - 9,5mm	2,199	6,23		
	9,5mm - 4,8mm	2,182	7,83	84	30,58
	<0,075mm	3,075	-		
Cal	<0,075mm	2,327	-	-	-
Pó EP	<0,075mm	3,672	-	-	-
Pó GCBF	<0,075mm	2,601	-	-	-

Os resultados da Tabela 1 mostram que a EFRA possui uma absorção maior que o agregado natural (NA). Este resultado contribui para um aumento no teor de ligante quando substituiu-se agregados naturais por EFRA, conforme constatado por Moura et al. (2020), que verificou um aumento de 5,1% para 5,8% quando substituiu 35% de NA por EFRA. Ressalta-se a melhor resistência mecânica da EFRA em comparação ao NA, como constatado pelo ensaio de perda por abrasão Los Angeles. Por fim, as massas específicas dos fileres é reportada, mostrando que a cal hidratada possui menor massa específica que os demais fileres. A maior massa específica do pó EP pode ser atribuída a presença de elementos metálicos em sua composição.

### 3.2. Caracterização química dos fileres

Na Tabela 2 estão dispostos os resultados da análise quali-quantitativa por Fluorescência de Raios-X (FRX) das amostras de cal hidratada (CH) e dos pós EP e GCBF, que permite inferir sobre os possíveis efeitos da composição química dos fileres na adesividade ligante-agregado. Para o GCBF, são reportados os valores de Vinco e Benevenuti (2019), que caracterizaram o material proveniente da mesma indústria siderúrgica que forneceu material para o presente estudo.

**Tabela 2:** Resultado FRX dos fileres.

Óxido (%)	CH	EP	GCBF
			Vinco e Benevenuti (2019)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,41	1,76	0,29
CaO	66,83	12,14	66,13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	62,92	2,04
SiO <sub>2</sub>	1,28	5,55	0,59
MnO	<0,01	0,53	0,00
K <sub>2</sub> O	0,19	0,33	5,35

A cal hidratada apresenta grande porcentagem de CaO, cerca de 66%, enquanto o EP apresenta mais de 62% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em sua composição. Os resultados de FRX do GCBF atestam o esperado, i.e., o material possui grande concentração do CaO em sua composição.

### 3.3 Resultados da Dosagem Superpave das Misturas Estudadas

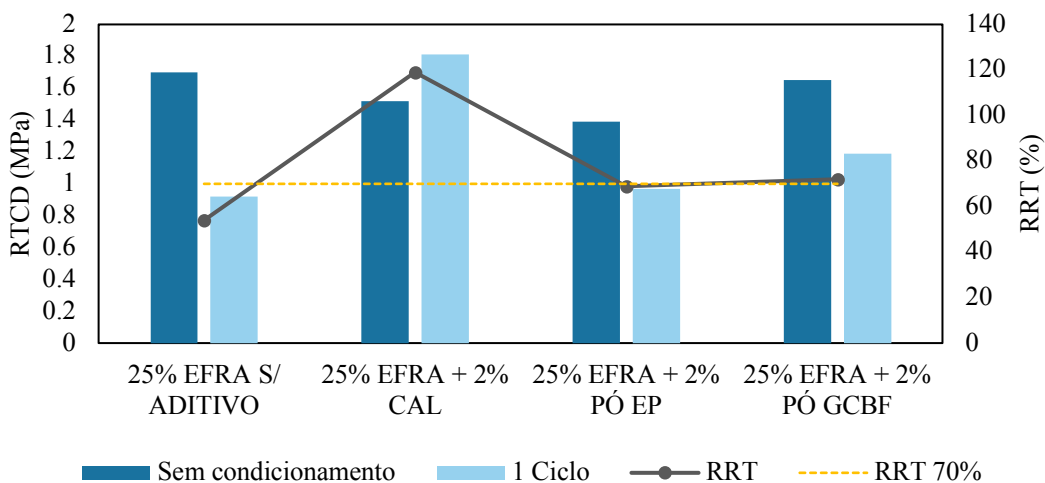
A Tabela 3 fornece o teor ótimo de ligante e os parâmetros mencionados para cada mistura. É possível observar a redução do teor ótimo de projeto (Pb) das misturas com adição de fileres. É sabido que estes agem preenchendo os poros dos agregados, o que leva a redução do teor ótimo nas misturas com adição de filer. Como os fileres foram adicionados em mesmo volume, não houve alterações no Pb.

**Tabela 3:** Teores ótimos de projeto e parâmetros volumétricos das misturas.

Propriedades	DNIT 031/2006-ES	EFRA	EFRA+CAL	EFRA+EP	EFRA+GCBF
<b>Pb (%)</b>	-	6,20	5,95	5,95	5,95
<b>Vv (%)</b>	4,0 ± 1,0	4,1	4,0	4,5	4,5
<b>RBV (%)</b>	75 – 82	77,5	77,7	75,5	75,4
<b>VAM (%)</b>	≥ 16	18,4	17,7	18,3	18,2
<b>DMT</b>	-	2,535	2,536	2,561	2,541
<b>Gmb</b>	-	2,430	2,436	2,454	2,427

### 3.4 Dano por umidade induzida

O Figura 5 apresenta os resultados de RTCD dos CPs que passaram por 1 ciclo do condicionamento estabelecido no ensaio de dano por umidade induzida, abordado na norma DNIT 180/2018 – ME, bem como os valores de RRT.



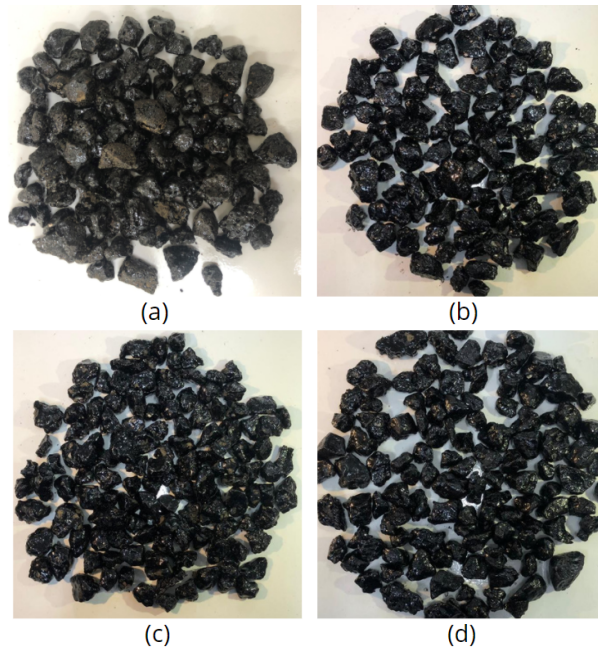
**Figura 5:** Resultados RTCD e RRT.

O RRT das misturas produzidas contendo adição de fileres apresentou-se maior do que na mistura de referência (sem aditivo), o que comprova a eficácia da cal hidratada e dos pós EP e GCBF como melhoradores de adesividade. A mistura que contém 2% de adição de cal hidratada apresentou RRT equivalente a 134%, aumentando a resistência à tração em 34% depois de sofrer o condicionamento de umidade. Segundo Acharya (2018), esse resultado pode ocorrer devido ao fato de que a cal reage com a água e com outros minerais, desenvolvendo um composto cimentício como resultado da hidratação, o que possibilita a mistura asfáltica obter uma maior resistência a tração. Vale notar ainda que, apesar da mistura com adição de pó EP apresentar um RRT equivalente a 69%, inferior ao recomendado de 70%, o valor encontrado foi bem próximo ao permitido. Esta melhora na RRT com a adição de EP pode ser atribuída a presença de óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ). Assim como a cal, o pó de GCBF também resultou em aumento de resistência à tração, obtendo RRT de 72%, o que pode ser atribuído aos efeitos de adição química pela presença de óxido de cálcio (CaO) neste material. No entanto, o incremento na RRT não foi tão significativo quanto das misturas com cal e pode estar relacionado a cal livre presente nos materiais. Esta hipótese precisa ser aprofundada, não sendo inicialmente feita a quantificação de cal livre neste estudo.

### 3.5 Resultados de Percentual de Área de Agregado não Recoberta pelo Ligante por PDI

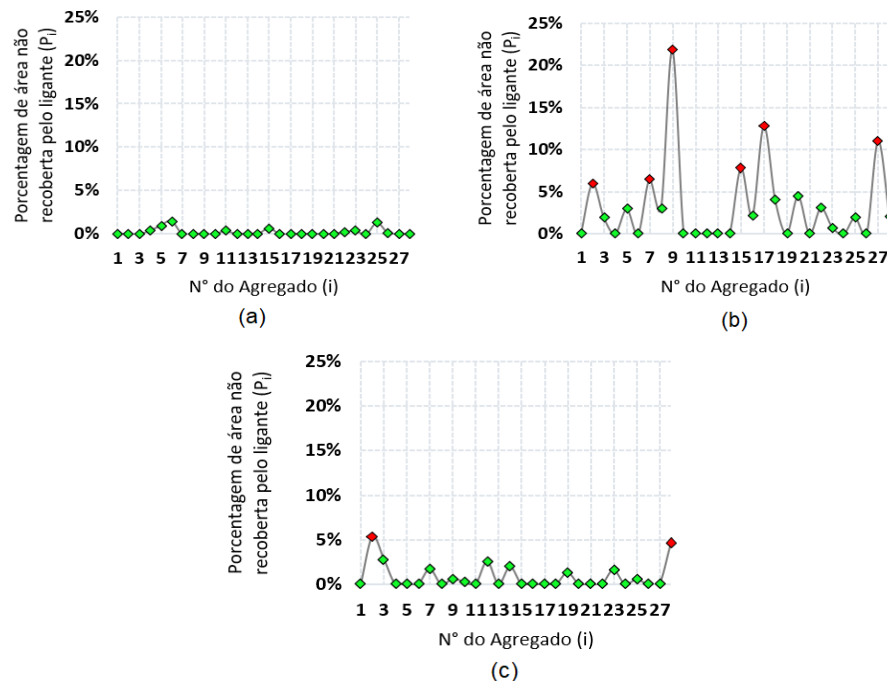
O ensaio de adesividade foi realizado com as quatro misturas estudadas, seguindo a norma ABNT NBR 12583. Primeiramente foi ensaiada a mistura contendo 25% de substituição de agregado natural por EFRA e sem nenhum tipo de aditivo. Como pode-se observar na Figura 6, o resultado foi considerado insatisfatório, visto o deslocamento da película betuminosa. Com intuito de melhorar a adesividade agregado-ligante, repetiu-se o procedimento adicionando 2% de cal hidratada em relação a massa dos agregados. O ensaio também foi realizado adicionando, em mesmo volume que a cal hidratada, os pós EP e GCBF. Na Figura 6, pode-se observar visualmente uma melhora na adesividade, porém para quantificar o resultado, é feita a análise do ensaio com o uso de PDI.





**Figura 6:** Ensaio de adesividade de EFRA (a) sem filer e recoberta com 2% de (b) cal hidratada, (c) pó EP e (d) pó GCBF.

Foi verificado o efeito dos fileres na adesividade agregado ligante através do método de análise quantitativa dos resultados do ensaio de adesividade (ABNT NBR 12583). Na Figura 7 está identificado a porcentagem de área de cada agregado não coberta pelo ligante ( $P_i$ ), após a realização do ensaio de adesividade.



**Figura 7:**  $P_i$  dos agregados das misturas a) contendo adição de cal hidratada, b) contendo adição de pó EP, c) contendo adição de pó GCBF.

A mistura que contém adição de cal hidratada não apresentou agregados *outliers*, e a

porcentagem de área total da amostra não recoberta pelo ligante ( $P_{Total}$ ) resultou em 0,22%. Na mistura contendo pó EP, os agregados 2, 7, 9, 15, 17 e 27 identificados com o marcador vermelho, são *outliers*, e obteve-se valor de  $P_{Total}$  igual à 1,27%. Analisando a amostra com adição de pó GCBF, são *outliers* os agregados 2 e 28, e o  $P_{Total}$  encontrado foi de 0,57%. Esses resultados estão em concordância com os obtidos com o ensaio de DUI. Verifica-se que a amostra que apresentou maior RRT, apresentou menor  $P_{Total}$ , o que mostra que as misturas que apresentam menor sensibilidade ao dano por umidade, são aquelas que possuem seus agregados com maior área recoberta pelo ligante betuminoso.

Assim como proposto por Lucas Junior et al. (2019), foi verificada as relações da adesividade com os óxidos presentes nos aditivos utilizados. Os resultados estão dispostos no Figura 8. A partir da análise do Figura 8 (a) e (b), notou-se que a presença de óxido de cálcio (CaO) e o óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ) na composição dos fileres possui forte correlação com o percentual de área da mistura não recoberta pelo ligante ( $P_{Total}$ ), com  $R^2 = 90\%$  e  $91\%$ , respectivamente. O óxido de silício ( $SiO_2$ ) também apresentou boa correlação com o  $P_{Total}$ , com  $R^2 = 80\%$ , diferente do resultado obtido para o óxido de potássio ( $K_2O$ ), que apresentou  $R^2 = 3\%$ .

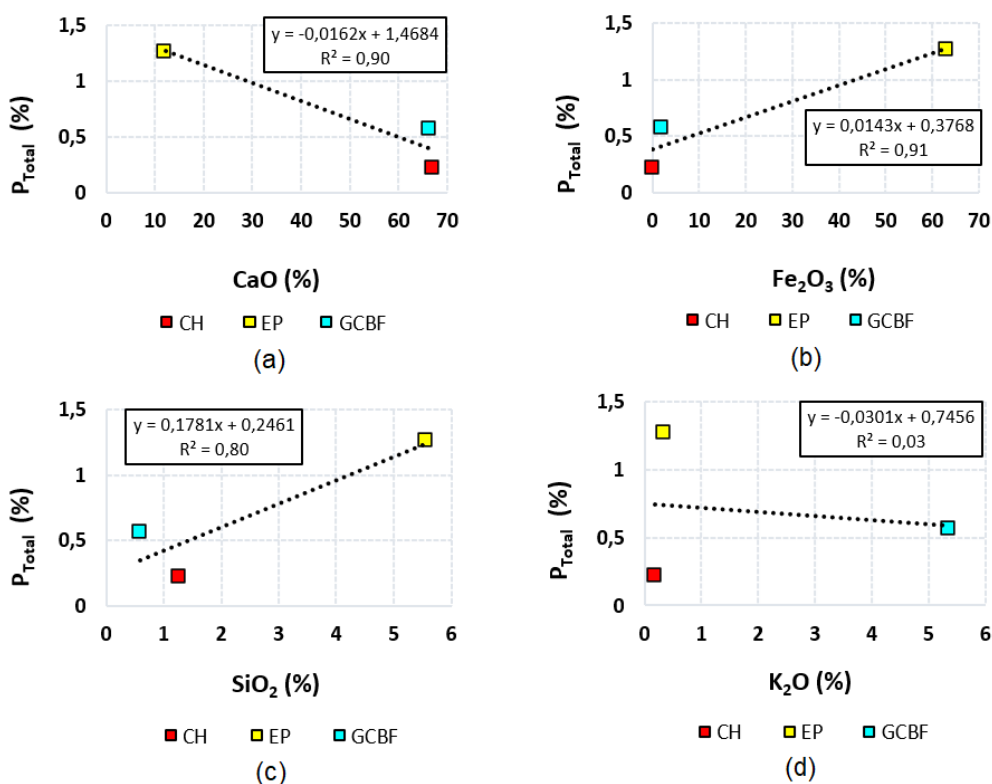


Figura 8: Relações da adesividade com os óxidos presentes

#### 4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dessa pesquisa foi possível entender como as características físicas, químicas e mineralógicas dos agregados e fileres influenciam na adesividade agregado-ligante e na resistência ao dano por umidade induzida. Os fileres utilizados nessa pesquisa minimizaram o dano por umidade induzida, comprovando a sua eficácia como melhoradores de adesividade. As misturas contendo as adições apresentaram significativo aumento de RRT, quando comparados a amostra sem adição. O uso da cal hidratada e do pó GCBF resultaram em misturas

asfálticas com RRT superior ao mínimo recomendado de 70%, viabilizando o uso da EFRA na pavimentação.

A análise da adesividade baseada no Processamento Digital de Imagens se mostrou eficaz, visto que os resultados obtidos corroboram com os encontrados pelo ensaio de DUI. Através do estudo, é possível inferir sobre a relação entre os óxidos presentes na constituição dos fileres e a adesividade. Quanto maior o teor de CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na amostra, melhor será a adesividade agregado-ligante, e maior será a área recoberta dos agregados pelo betume.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Arcelor Mittal Tubarão pelo apoio financeiro para realização deste estudo, ao Programa Institucional de Iniciação Científica da UFES (PIBIC), à CAPES (Código 001) e ao CNPQ (pela bolsa de produtividade em pesquisa - PQ-2 da terceira autora). Agradecemos aos parceiros Vix Asfaltos e Brasília pelo CAP e agregados naturais cedidos como cortesia a este estudo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, RAJAN. Evaluation of the Moisture-Induced Damage Potential of Asphalt Mixes and Asphalt Binder-Aggregate Systems. Electronic Theses and Dissertations. 2682. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 51: Agregado graúdo: Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, p. 6. 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, p. 8. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12052: Solo ou agregado miúdo: Determinação do equivalente de areia – Método de ensaio. Rio de Janeiro, p. 10. 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12583: Agregado graúdo: Determinação da adesividade ao ligante betuminoso. Rio de Janeiro, p. 2. 2017.
- BERNUCCI, L. B.; DA MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B., 2008, Pavimentação asfáltica, Universidade federal de Juiz de Fora.
- CARO, S.; MASAD, E.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. International Journal of Pavement Engineering. v. 9, 81–98 (2008).
- CALA, A.; CARO, S.; LLERAS, M.; ROJAS-AGRAMONTE, Y. Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems. Construction and Building Materials, v. 216, p. 661–672, 2019.
- CALA, A.; CARO, S. Predictive quantitative model for assessing the asphalt-aggregate adhesion quality based on aggregate chemistry, Road Materials and Pavement Design, DOI: 10.1080/14680629.2021.1900896, 2021.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006-ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, p.14. 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 136/2018-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, p.9. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER 084/95 – Agregado miúdo – determinação da densidade real. Mato Grosso, 1995. 03 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 178/2018-PRO: Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro, p.19. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 180/2018-ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro, p.9. 2018.
- FHWA - Federal Highway Administration, US Department of Transportation. User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction. 2019. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/bfs1.cfm>>. Acesso em: 16 jun. 2021.
- IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. Produção Siderúrgica Brasileira, 2019. Disponível em: <

- <http://www.acobrasil.org.br/site2015/estatisticas.asp>>. Acesso em: 07 jul. 2021.
- KUMAR, H., VARMA, S. A review on utilization of steel slag in hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Research Technology*. 14, 232–242 (2021).
- LUCAS JÚNIOR, J. L.; SOARES, J. B. Desenvolvimento de metodologia para avaliação da adesividade agregado-ligante com o uso de processamento digital de imagem. *Transportes*, v. 27, p. 82–95, 2019.
- MOURA, B. L. R. DE; TEIXEIRA, J. E. S. L.; SIMÃO, R. A.; KHEDMATI, M.; KIM, Y. R.; PIRES, P. J. M. Adhesion between steel slag aggregates and bituminous binder based on surface characteristics and mixture moisture resistance. *Construction and Building Materials*, v. 264, 2020.
- MOYA, J. P. A., SEVILLA, A. B., DELGADO, J. S., FALLAS, J. F. P., SALAZAR, L. L., LIZCANO, F. R., LEAL, N. C. Adhesive properties of asphalts and aggregates in tropical climates. *International Journal of Pavement Engineering*. 2016.
- REMUS, R.; MONSONET, M. A. A.; ROUDIER, S.; SANCHO, L. D. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre, European Commission, 2013.
- VINCO, J. H., BENEVENUTI, J. M. N. Caracterização do pó proveniente do despoejamento primário da sinterização recolhido pelo *Gas Cleaning Bag Filter*. TCC (Graduação). Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Alegre. ES. 2019.

---

Julia Rodrigues Barbosa de Sousa Paula (juliasjag1@hotmail.com)  
Rodolpho Medeiros Frossard (rodolpho.ifesnv@gmail.com)  
Jamilla Lutfi Emi Sudo Teixeira (jamilla.teixeira@ufes.br)  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514 - CT I, Goiabeiras, 29060-970, Vitória, ES, Brasil