

Desempenho mecânico e térmico de misturas asfálticas do tipo CBUQ com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de polietileno tereftalato (PET)

Mechanical and thermal performance of bituminous asphalt concrete with partial replacement of fine mineral aggregate by polyethylene terephthalate waste (PET)

Rendimiento mecánico y térmico de mezclas de asfalto del tipo CBUQ con reemplazo parcial del agregado fino por residuos de tereftalato de polietileno (PET)

Camila Raia Santos Bastos

Engenheira Civil, UFMT, Brasil
camilaraia1@gmail.com

Ivan Julio Apolonio Callejas

Professor Doutor, UFMT, Brasil
ivancalejas1973@gmail.com

Carol Cardoso Moura Cordeiro

Professora Mestre, UFMT, Brasil.
carolcardoso.eng@gmail.com

Luciane Cleonice Durante

Professora Doutora, UFMT, Brasil.
carolcardoso.eng@gmail.com



RESUMO

Esta pesquisa visa avaliar o desempenho térmico de misturas asfálticas de Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) com substituição parcial do agregado miúdo por *flakes* de PET. Foi moldado um corpo de prova com o traço convencional de CBUQ (32,5% de brita 1, 28% de pedrisco, 32,5% de pó de pedra e 7% de Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP - 30/45) e mais três corpos de prova, nos quais substituiu-se o pó de pedra por *flakes* de PET passantes na peneira de 4,8 mm, nos teores de 5%, 10% e 15%. Realizaram-se ensaios mecânicos de estabilidade, fluência e resistência à tração e o comportamento térmico das misturas foi avaliado por meio de medições de temperatura superficial nas faces superior e inferior dos corpos de prova. Os resultados evidenciaram que a adição de *flakes* de PET em até 5% influenciou positivamente no desempenho térmico das misturas.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos. Sustentabilidade urbana. Condutividade térmica.

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate the thermal performance of bituminous asphalt concrete with partial replacement of fine mineral aggregate with partial replacement of the small aggregate by PET flakes. The conventional trait of bituminous asphalt concrete consisted of 32.5% of crushed stone, 28% of small stones, 32.5% of stone dust, and 7% of petroleum asphalt cement (PAC) 30/45, and for the other traces the stone dust was replaced by PET flakes passing through the sieve of 4.8 mm, in the contents of 5%, 10% and 15%. Mechanical tests of stability, creep and tensile strength were performed and the thermal behavior of the mixtures was evaluated by surface temperature measurements on the upper and lower faces of the specimens. The results showed that the addition of PET flakes up to 5% positively influenced the thermal performance of the blends.

KEYWORDS: Solid waste, Urban Sustainability, thermal conductivity.

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo evaluar el rendimiento térmico de las mezclas de asfalto de hormigón bituminoso mecanizado en caliente con reemplazo parcial del agregado fino por escamas de PET. Se moldeó una muestra con la traza convencional de CBUQ (32.5% de piedra triturada 1, 28% de grava, 32.5% de polvo de piedra y 7% de Asphalt Petroleum - CAP - 30/45) y tres muestras más, en las cuales el polvo de piedra fue reemplazado por escamas de PET que pasaron a través del tamiz de 4.8 mm, en contenidos de 5%, 10% y 15%. Se llevaron a cabo pruebas mecánicas de estabilidad, fluencia y resistencia a la tracción y se evaluó el comportamiento térmico de las mezclas mediante mediciones de temperatura superficial en las caras superior e inferior de las muestras. Los resultados mostraron que la adición de escamas de PET hasta en un 5% influyó positivamente en el rendimiento térmico de las mezclas.

PALABRAS CLAVE: Resíduos sólidos. Sostenibilidad urbana. Conductividad térmica.



1 INTRODUÇÃO

A urbanização modifica e fragmenta a paisagem natural e a geometria dos centros urbanos, substituindo vegetação e solo por construções e pavimentos, alterando as propriedades térmicas da atmosfera e contribuindo com o aquecimento e formação das Ilhas de Calor Urbana (ICU) (AMORIM, 2017).

O revestimento asfáltico, amplamente utilizado nas cidades, favorece consideravelmente a formação desses fenômenos pois, devido à cor escura, absorve cerca de 80% da radiação solar incidente e, também, irradia mais calor. Nesse sentido, a busca por um revestimento asfáltico que mantenha suas propriedades mecânicas, imprescindíveis ao tráfego urbano de veículos e que minimize os problemas térmico ambientais decorrente de seu uso, encontram justificativa, principalmente, em regiões de clima quente (CALLEJAS; DURANTE; ROSSETI, 2015).

Pesquisas recentes relacionam a incorporação de polietileno tereftalato (PET) em materiais de construção e o comportamento térmico. O Conselho Nacional de Pesquisa Científica (CONICET) da Argentina desenvolveu placas de concreto não estruturais incorporando resíduos de garrafas PET, o que aumentou a capacidade de isolamento térmico em, aproximadamente, cinco vezes. Incorporado em tijolos, o PET possibilitou melhora na capacidade de isolamento térmico e redução da densidade do material (GAGGINO et al., 2015).

Existem estudos que incorporaram PET a materiais de pavimentação com foco no desempenho mecânico, comprovando a viabilidade do uso como material alternativo em misturas asfálticas, sem comprometer a eficácia das propriedades mecânicas do pavimento. Dentre esses, cita-se Moghaddam e Karim (2012), que avaliaram a influência mecânica da adição de PET com diâmetro máximo de 2,36 mm, nos teores de 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% e 1,0% de misturas asfálticas do tipo Stone Mastic Asphalt (SMA). Os autores verificaram o aumento da estabilidade e fluência, com melhor resultado para estabilidade no traço com 0,4% de PET.

Almeida e Silva (2015) propuseram a incorporação de PET em proporções de 4%, 5% e 6% relativas ao peso do teor de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Os resultados indicaram que o resíduo do PET micronizado no teor de 5% pode ser utilizado como agente modificador do CAP, sendo o mesmo capaz de promover ganhos nas propriedades mecânicas de revestimentos asfálticos. Arao (2016) verificou que a adição de resíduos de PET em revestimentos asfálticos a quente promoveu melhoras no desempenho mecânico deste material. A adição de 1% de PET de 2 mm aumentou em 16% a estabilidade e 35% a resistência a tração em relação a mistura asfáltica convencional. Serra et al. (2018) também avaliaram o comportamento de misturas asfálticas usinadas a quente com substituição parcial do agregado miúdo com a incorporação de PET nas proporções de 1%, 2% e 3%. A pesquisa indicou que a adição de material PET é satisfatória quando adicionado a baixas porcentagens.

Räder et al. (2018) analisaram as propriedades de misturas asfálticas modificadas com teores de 0,7% e 1,5% de resíduos provenientes da moagem de garrafas PET, em pó e em flake, em substituição de uma fração do agregado miúdo, concluindo que as misturas com 0,7% do resíduo apresentaram melhores resultados e aplicação em pavimentação.

2 OBJETIVOS

Esse estudo visa avaliar experimentalmente se a substituição de parte dos agregados miúdos do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) por resíduos de reciclagem de garrafas PET (*flakes*) proporciona melhoria das propriedades térmicas, mantendo as propriedades mecânicas nos limites estabelecidos pelas normas técnicas. O estudo, que se fundamenta nas potenciais contribuições para melhoria do ambiente térmico urbano, agrega valor sustentável ao propor a utilização de resíduos de PET tendo em vista que, tal qual a maioria dos plásticos, esse polímero causa prejuízos ao meio ambiente quando descartado na natureza, uma vez que seu processo de decomposição é longo e de elevado impacto global.

3 MÉTODO DE ANÁLISE

Para a composição do CBUQ, foi utilizado Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 30/45; agregados provenientes de empresas do município de Cuiabá-MT: brita 1; pedrisco; pó de pedra; e, flakes de PET passantes na peneira de malha 4,8 mm. Utilizaram-se quatro traços de CBUQ, sendo um deles o de referência, sem adição de PET, denominado T1. Nos demais traços foram adicionados os *flakes* de PET em substituição ao agregado miúdo (pó de pedra), com quantidades de 5%, 10% e 15%, respectivamente, em massa, doravante denominados T2, T3 e T4. Todos os procedimentos foram realizados em concordância com as condições estabelecidas pela norma técnica DNIT 031/2006, que trata de pavimentos flexíveis, nos ensaios abaixo relacionados.

Os equipamentos e procedimentos metodológicos são: Caracterização dos materiais utilizados na pesquisa; Enquadramento da granulometria dos agregados em uma das faixas estabelecidas por DNIT 031/ 2006; Determinação do teor ótimo de ligante no traço convencional do CBUQ; Confecção de corpos de prova nos seguintes traços: T1 - CBUQ convencional; T2 - CBUQ com substituição parcial de 5% de pó de pedra por *flakes* de PET; T3 - CBUQ com substituição parcial de 10% de pó de pedra por *flakes* de PET; T4 - CBUQ com substituição parcial de 15% de pó de pedra por *flakes* de PET; e, Realização dos ensaios mecânicos e térmicos.

3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E MECÂNICOS

Realizou-se a amostragem dos materiais com auxílio de um separador mecânico. Para a determinação da composição granulométrica dos materiais pétreos e flakes de PET, seguiram-se os procedimentos experimentais especificados na NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizando a série de peneiras da norma técnica DNIT 031/2006.

A massa específica real dos materiais, necessária para a dosagem do teor ótimo de asfalto para o CBUQ, foi determinada segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2002) e NBR NM 52 (ABNT, 2002). Para

os flakes de PET, aplicou-se mesmo método especificado para o agregado miúdo, utilizando picnômetros. Para que agregados graúdos possam ser utilizados em pavimentos flexíveis, a abrasão dos grãos deve ser inferior a 50%, portanto foram seguidos os procedimentos estabelecidos na NBR NM 51 (ABNT, 2001). O índice de forma dos agregados graúdos, relação entre o comprimento e a largura de seus grãos, foi determinado pelo método do paquímetro, conforme NBR 7809 (ABNT, 2006). Por fim, o ensaio de equivalente de areia, que avalia a quantidade e a qualidade de elementos finos plásticos presentes na amostra, foi realizado apenas para o pó de pedra, não sendo aplicável aos flakes de PET. Seguiu-se a metodologia especificada da norma técnica DNER-ME 054/1997.

O ligante asfáltico do tipo CAP 30/45 foi caracterizado de acordo com os parâmetros estabelecidos por DNIT 031/2006. Realizou-se primeiramente o ensaio de penetração, que determina quantos milímetros uma agulha padrão penetra no material betuminoso em condições estabelecidas por DNER-ME 003/1999. Para o CAP 30/45, o valor esperado deve estar entre 30 mm e 45 mm. Optou-se pela determinação da viscosidade por meio do viscosímetro Brookfield, seguindo-se as orientações da NBR 9277 (ABNT, 2014). A determinação da massa específica real seguiu as recomendações da NBR 6296 (ABNT, 2012). Esse ensaio é semelhante ao de determinação da massa específica dos agregados miúdos, pois utiliza um picnômetro para a pesagem seca e submersa dos materiais, para posterior cálculo da densidade. Para a compactação dos corpos de prova, fixou-se a massa de agregados por mistura em 1100 g, seguindo a composição granulométrica de cada traço. Após mistura manual, foi feita a moldagem, com compactação de acordo com DNER-ME 043/1995.

A dosagem da mistura, que consiste na determinação da composição granulométrica e do teor de asfalto ótimo da mistura, foi realizada a partir dos parâmetros volume de vazios (Vv) e relação betume-vazios (RBV), conforme DNER-ME 043/1995. O ensaio Marshall foi realizado segundo especificações de DNER-ME 043/1995. Os corpos de prova foram medidos e pesados para obtenção dos parâmetros volumétricos e rompidos para determinação da estabilidade e fluência à temperatura de 60°C. O ensaio de determinação da resistência a tração por compressão diametral foi segundo a NBR 15087 (ABNT, 2012). Utilizou-se a prensa Marshall com o corpo de prova encaixado em um molde de placas paralelas.

3.2 ENSAIOS TÉRMICOS

Por meio do uso da primeira Lei da Termodinâmica (Lei de Conservação de Energia), a partir de um volume de controle é possível computar os ganhos, as perdas e o armazenamento de energia em um dossel urbano, utilizando-se a Equação 1:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

em que: Q^* : o saldo de radiação líquida; Q_F : o fonte de calor antropogênica introduzida no volume de controle; Q_H : o fluxo de calor sensível turbulento transferido para o ar; Q_E : o fluxo de calor latente turbulento utilizado para evaporar água dentro do sistema; ΔQ_S : o fluxo

condutivo de calor armazenado no dossel urbano; e, ΔQA : a advecção horizontal de calor sensível e latente conduzida para dentro ou fora do volume de controle.

Estudos evidenciam que devido à impermeabilização do solo, principalmente pelo uso de materiais artificiais, bem como pela supressão da vegetação, reduzem o fluxo de calor latente e elevam o fluxo de calor sensível condutivo de estoque de energia, provocando e intensificando os efeitos da ICU (CALLEJAS et al., 2019).

Os revestimentos asfálticos contribuem para o aquecimento do ar e o armazenamento de calor no dossel urbano. Logo, idealizou-se um experimento para estimar o fluxo de calor armazenado, que consistiu em um ensaio térmico onde corpos de prova foram instalados em uma base de apoio, expostos à radiação solar direta, visando induzir fluxos de calor condutivos através de suas faces superiores.

O ensaio térmico consistiu na determinação da temperatura refletida pela superfície superior e inferior dos corpos de prova para cada traço de CBUQ. Foram ensaiados três corpos de prova para cada mistura validada nos ensaios físicos e mecânicos, os quais foram fixados em uma placa de madeira e dispostos em três fileiras. A superfície de apoio foi revestida com papel-alumínio para reduzir as trocas térmicas entre esta e os corpos de prova (Figura 1 (a) e (b)).

Para que os ganhos térmicos fossem desencadeados, principalmente, pela radiação solar direta e pelo ar atmosférico na face superior da placa, estes foram faceados a placa, reduzindo trocas térmicas por convecção. Na face inferior, ocorrem trocas térmicas com o meio por irradiação do ar atmosférico e por convecção, mas, principalmente, por condução térmica.

A placa de madeira, apoio dos corpos de prova, foi instalada de forma a permanecer suspensa, evitando a troca de calor com o piso. Alinhou-se a placa com o Norte para que todos os corpos de prova recebessem a mesma incidência solar, esta ocorrendo apenas na parte superior. As superfícies inferiores dos corpos de prova, devido a largura da placa, sempre permaneceram sombreadas, evitando-se desta forma ganhos térmicos por radiação solar direta. No período de realização do ensaio, a face superior permaneceu exposta ininterruptamente para que os corpos de prova recebam a radiação solar direta de forma homogênea.

Figura 1: Placa com corpos de prova para ensaio térmico: (a) vista superior; (b) vista inferior



(a)



(b)

Obtiveram-se, por intermédio da termografia infravermelha, as temperaturas médias superiores e inferiores dos corpos de prova. A NBR 15866 (ABNT, 2010) classifica a termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo, utilizado para determinar a temperatura superficial de objetos por meio de câmeras termossensíveis. Estas coletam a radiação

infravermelha emitida pela superfície dos objetos e a converte em pulsos elétricos, criando imagens térmicas do campo de temperatura (BARREIRA; FREITAS, 2007).

O aparelho utilizado para a medição da temperatura foi uma câmera da marca FLIR. O valor utilizado para a emissividade dos revestimentos asfálticos no aparelho foi o de 0,95. A emissividade mede a razão entre a taxa de radiação emitida por uma superfície e a taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura (ABNT, 2003).

Para a determinação da temperatura superficial dos corpos de prova, foram extraídas imagens térmicas horárias da face superior e inferior da placa, sempre posicionando a câmera a uma altura padrão de um metro. Para avaliação da temperatura da face inferior dos corpos de prova, a placa foi momentaneamente virada para cima para realização do procedimento.

As medições foram realizadas de hora em hora, entre 8h30 e 16h30, no mês de fevereiro (GMT-4, horário de verão). Com vista a estimar os fluxos condutivos transferidos e armazenados em cada um dos traços pesquisados, utilizou-se os dados de temperatura do ar, umidade do ar e radiação solar de uma estação meteorológica fixa, no mesmo local.

A leitura dos dados de temperatura superficial foi feita pelo software disponibilizado pelo site do desenvolvedor da câmera (FLIR Tool). A determinação da temperatura superficial média foi feita tomando-se toda a área do corpo de prova nas faces superior e inferior para cada traço.

3.2.1 Fluxo de calor conduzido nos revestimentos

A transferência de calor por unidade de área pode ser derivada pela Lei de Fourier, segundo a qual o fluxo de calor por uma barra cilíndrica (ou em corpo de prova cilíndrico) é diretamente proporcional à sua condutividade térmica e inversamente proporcional ao seu comprimento (BERGMAN et al., 2014) conforme Equação 2.

$$Q_x/A = k \cdot (\Delta T/L) \quad (2)$$

em que Q_x : o calor medido [J/s]; A : a área da seção transversal da barra [m^2]; k : o coeficiente de condutividade térmica do material avaliado [$Wm^{-1}K^{-1}$], ΔT : a diferença de temperatura entre as extremidades da face do corpo de prova [K]; L : o comprimento da barra [m].

Uma vez que as superfícies lateral e inferior dos corpos de provas não foram isoladas termicamente e nem os coeficientes de condutividade térmica foram determinados nas amostras pesquisadas, o respectivo fluxo Q_x não é passível de ser estimado. No entanto, como os corpos de prova permaneceram no mesmo ambiente e sujeitos praticamente às mesmas trocas térmicas por convecção e irradiação, trabalhou-se com a variação térmica de temperatura entre as faces, o que permite estimar como a condutividade térmica variou nas amostras com a adição dos *flakes* de PET.

3.2.2 Estimativa do fluxo de calor armazenado dentro dos traços pesquisados - ΔQ_s

O fluxo de calor armazenado (ΔQ_s) é um termo significativo no balanço de energia de superfícies urbanas, e consideravelmente maior do que para a maioria dos sistemas naturais, com exceção da água, atingindo valores que variam de 150Wm^{-2} a 300Wm^{-2} , correspondendo a até 50% do valor do saldo de radiação solar em áreas centrais da cidade. É um importante parâmetro para avaliar o desempenho térmico dos pavimentos urbanos, além de influenciar na percepção térmica dos pedestres que trafegam sobre os mesmos e de contribuir consideravelmente na formação de ICU (CALLEJAS et al., 2019).

Utilizou-se o Esquema de Massa Térmica (*Thermal Mass Scheme* - TMS) derivado dos conceitos básicos da condução de calor e do calor volumétrico armazenado dentro dos materiais, no qual se utiliza de propriedades térmicas e geométricas para se fazer a estimativa desta propriedade (MEYN e OKE, 2009).

Assim, o revestimento asfáltico foi tratado como um material homogêneo e o fluxo de calor armazenado por condução térmica foi determinado por meio da variação horária da temperatura interna dos corpos de prova (estimada por meio da média das temperaturas superficiais superior e inferior registradas nas faces) (Equação 3).

$$\Delta Q_s = \sum_{i=1}^n \Delta Q_{si} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{A_i} \int c_i \frac{\Delta T}{\Delta t} dm_i \quad (3)$$

em que i : índice que define o número de superfícies dentro do volume de controle (no caso apenas uma para o revestimento asfáltico); A_i : área da superfície de cada componente i do sistema (área total do corpo de prova) [m^2]; c_i : calor específico de cada componente dos materiais i (para o revestimento asfáltico adotou-se o valor igual a $1,034 \text{ [kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$) (SPECHT, BORGES; HELLMANN, 2008); $\Delta T/\Delta t$: taxa de mudança de temperatura que acontece em cada componente i dentro do volume de controle por intervalo de tempo (diferença de temperatura nos corpos de prova registrada ao longo das medições); d_{mi} : massa de cada componente i (derivada a partir do valor médio de densidade específica aparente de cada traço e admitindo-se o volume padrão do corpo de prova testado) [kg]. Os corpos de prova ficaram envoltos no ar (condição distinta de quando estão aplicados em campo), acarretando trocas térmicas por irradiação e convecção, não sendo estas estimadas nesta pesquisa.

3.2.3 Estimativa da sensação térmica predita por meio do índice térmico UTCI

Os índices térmicos desenvolvidos permitem a estimativa da sensação térmica por meio de modelos termofisiológicos, os quais procuram traduzir a influência das variáveis meteorológicas, fisiológicas (taxa metabólica) e individuais (ajustamento de roupa). Entre os mais utilizados esta o Índice Térmico Climático Universal (UTCI), que apresenta como resposta a temperatura do ar

equivalente a um ambiente de referência que causa a mesma resposta fisiologia que a condição real.

Para o UTCL, considera-se ambiente de referência como externo, com temperatura do ar (T_a) igual à temperatura radiante média (T_{rmt}), vento de 0,3m/s ao nível de pedestre (0,5 ms⁻¹ a 10 m de altura) e pressão de vapor (v_a) igual a 50%, com a pessoa considerada andando a uma velocidade de 4km/h (1,1ms⁻¹), equivalente a taxa metabólica de 135 Wm⁻² (2,3MET) (BLAZEJCZYK et al., 2010). Internamente ao índice, foi introduzido um modelo de vestimenta que representa o ajustamento do uso de isolamento térmico proporcionado pela roupa em resposta à variação sazonal das condições climáticas.

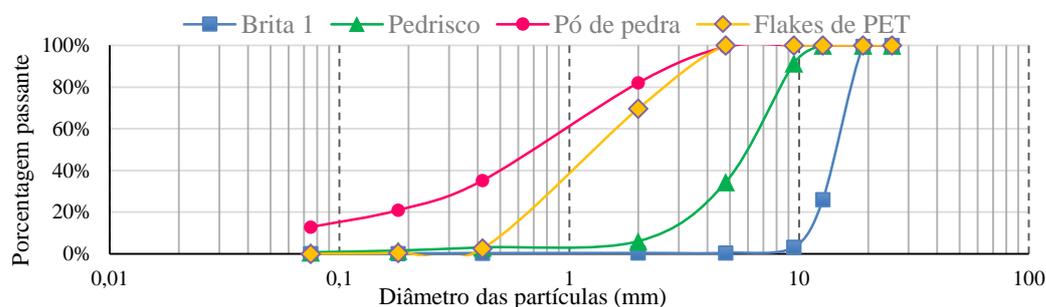
O índice UTCL foi utilizado para avaliar a possível influencia dos diferentes traços na sensação térmica dos pedestres quando da utilização destes como revestimento dentro do meio urbano. Para tanto, admitiu-se um pedestre trafegando sobre tais revestimentos, derivando-se o UTCL por meio do software RayMan 1.2, a partir dos dados ambientais de temperatura do ar (T_b), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (v) captadas na estação metereologica no dia da campanha de medição das temperaturas superficiais superiores (T_s), sendo estas últimas utilizadas para estimar a temperatura radiante (T_{rmt}) internamente no programa para computo da sensação térmica predita pelo índice (MATZARAKIS et al., 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E DO LIGANTE ASFÁLTICO

Na Figura 2, observa-se que o pó de pedra apresenta 12,9% de material passante na peneira 200 e, portanto, pode ser utilizado tanto como agregado miúdo como também como filler na mistura. Nota-se ainda que a granulometria dos flakes de PET utilizados na pesquisa se enquadra na classificação de agregados miúdos, viabilizando então a substituição parcial do pó de pedra por este material.

Figura 2: Composição granulométrica dos agregados minerais e flakes de PET.



Todos os materiais enquadraram-se nos limites mínimos ou máximos estabelecidos pela norma DNER-ME 031 (DNER, 2006) para a produção de misturas betuminosas a quente. O agregado graúdo apresentou massa específica real de 2,75 g/cm³, absorção de 2,1%, abrasão “Los Angeles” de 19% e índice de forma de 2,6. O pó de pedra apresentou massa específica real de

2,61 g/cm³ e equivalente de areia de 72%. Os *flakes* de PET apresentaram massa específica de 1,41 g/cm³.

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa, CAP 30/45, enquadrou-se nos limites estabelecidos pela Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2005) quanto aos itens Penetração (34mm), Densidade real (1,01 g/cm³) e Viscosidade Brookfield (135 °C, SP 21, 20 rpm – 382 cP; 150 °C, SP 21, 20 rpm – 231 cP; 177 °C, SP 21, 50 rpm – 127 cP).

De acordo com DNER-ME 043/1995, a temperatura ideal de mistura é aquela em que a viscosidade do ligante asfáltico atinge 170 cP. Assim, traçou-se uma curva viscosidade-temperatura, por meio da qual obteve-se a temperatura de 150 °C como a ideal para a mistura do CBUQ. Ainda de acordo com essa norma, a temperatura determinada para os agregados foi de 165 °C e de compactação foi de 140°C.

O traço de referência (T1) e os demais traços foram enquadrados granulometricamente na faixa C (DNIT 031, 2006). Para a determinação do teor ótimo, foram testados cinco traços variando-se o teor de CAP. A partir dos valores encontrados, verificou que o intervalo aceitável de teor de CAP para a faixa granulométrica adotada é entre 6,72% e 7,48%. A partir dos valores máximos e mínimos de Vv e RBV, obteve-se o teor ótimo de CAP correspondente a 7,06%. Desta forma, optou-se então por utilizar o teor de 7,1% de CAP para todas as misturas asfálticas produzidas nesta pesquisa. Os resultados do ensaio Marshall com os corpos de prova a 60°C encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Ensaio Marshall

Traço	T1 (Referência)	T2 (5% PET)	T3 (10% PET)	T4 (15% PET)	Limites
DMT (g/cm ³)	2,41	2,38	2,35	2,32	-
Gmb (g/cm ³)	2,32	2,26	2,15	2,08	-
Vv	3,8%	5,0%	8,4%	10,5%	3% - 5%
VAM	20,0%	21,3%	24,5%	26,6%	14%
RBV	81%	77%	66%	60%	75% - 82%
Fluência (mm)	8,1	8,9	11,8	13,9	-
Estabilidade (kgf)	892	632	565	526	mín 500

Pela análise estatística dos dados, concluiu-se que, como o coeficiente de variação é inferior a 20% para todas as amostras, sendo, portanto, considerados homogêneos. Observa-se que todos os traços atingiram a estabilidade mínima exigida pela norma DNER 031/2006. Entretanto, os traços T3 e T4 ultrapassaram o limite máximo de Vv e não alcançaram a RBV de 75%. Isso ocorreu em virtude de o PET triturado aumentar a área superficial dos agregados, o que dificulta o recobrimento pelo ligante, gerando mais vazios na mistura (MARQUES, 2014). O traço T2 com 5% de incorporação foi o único que atendeu aos requisitos normativos para utilização nas misturas asfálticas, ratificando os achados de Almeida e Silva (2015).

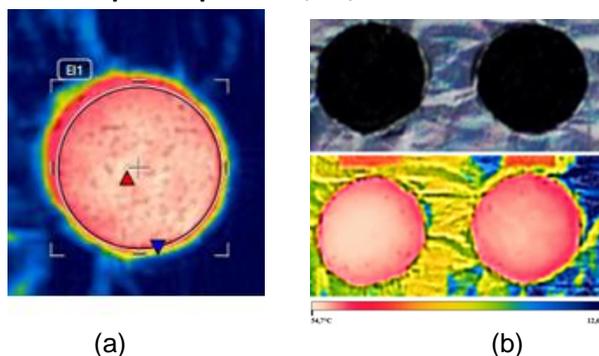
A fluência para os traços T3 e T4 aumentou 50% e 75%, respectivamente, em relação ao traço de referência, o que se mostra desfavorável, pois a deformação excessiva do CBUQ pode

provocar patologias no pavimento. Foi possível também verificar visualmente que, de forma geral, os corpos de provas confeccionados com o traço T4 apresentaram maiores alturas do que os corpos de provas do traço T1, para massas aproximadamente iguais. Portanto, o traço T4 possui menor grau de compactação que o T1.

4.2 ENSAIO TÉRMICO

Por não atenderem aos parâmetros mínimos de Vv e RBV estabelecidos no ensaio Marshall, os traços T3 e T4 foram invalidados e, em razão disso, optou-se por não realizar ensaios térmicos nesses corpos de prova. A temperatura ambiente durante a realização do ensaio térmico variou de 29°C e 34°C. Durante as duas primeiras horas do ensaio, observou-se que a temperatura na face superior dos corpos de prova era decrescente entre os traços T1 a T2 (Figura 3). O desvio padrão (σ) das medições de temperatura foi baixo, com coeficientes de variação (CV) inferiores a 5%, o que mostra elevada homogeneidade nas amostras ensaiadas.

Figura 3: Medição de temperatura: (a) Corpo de prova no software FLIR tool (b) Termograma dos corpos de prova T1, T2, T3 e T4 - 10h30min



A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (a) apresenta as variações da temperatura superficial superior nos corpos de prova. Percebe-se que as temperaturas atingiram valores superiores a 60°C nos dois traços investigados. Em pesquisa conduzida por Asaeda, Ca e Wake (1996), as temperaturas superficiais no revestimento asfáltico foram superiores a 60°C às 14h. No entanto, as temperaturas no concreto convencional e no solo exposto não ultrapassaram 39°C e 38°C, respectivamente. Ratifica-se, portanto, que o revestimento asfáltico é um dos grandes responsáveis pelo aquecimento do ar nas áreas urbanas por meio de trocas térmicas sensíveis (CALLEJAS; DURANTE; ROSSETI, 2015).

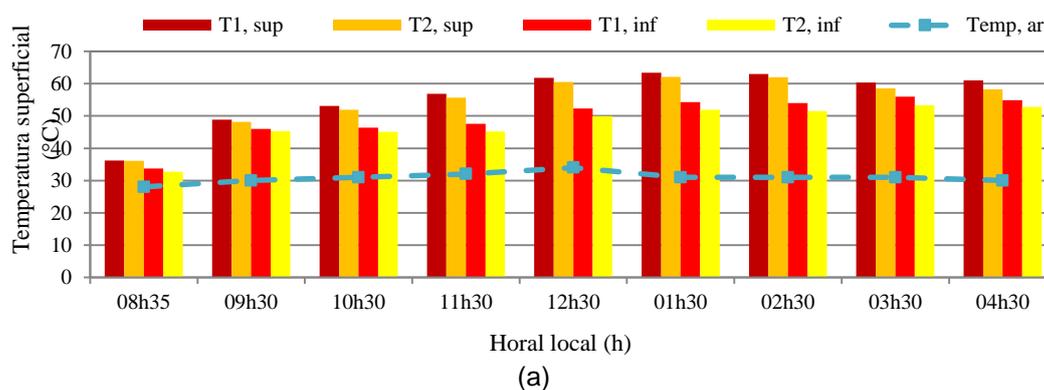
Ao se comparar o traço T1 (de referência) com o T2 (5% de PET), nota-se redução da temperatura da face superior em média de 1,2°C do traço T2 em relação ao T1, com maior diferença alcançada às 14h30min de 1,77°C. O menor aquecimento da mistura T2 é benéfico uma vez que fluxo de calor sensível transferido para o ar nas áreas pavimentadas é proporcional à temperatura superficial do revestimento e a do ar.

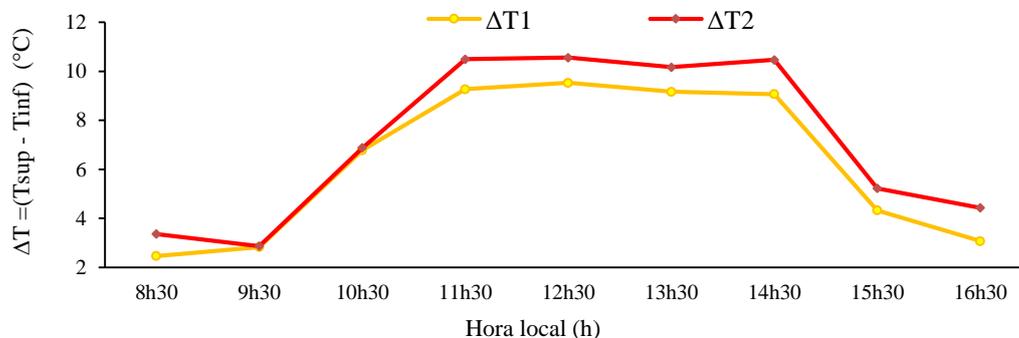
A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b) ilustra as variações da temperatura superficial inferior nos corpos de prova, com redução da temperatura à medida que se incorporou os flakes de PET. Notou-se redução da temperatura da face inferior em média de $2,0^{\circ}\text{C}$ do traço T2 em relação ao T1, com maior diferença alcançada às 11h30min de $2,40^{\circ}\text{C}$. Este fato indica que o traço T2 pode ser capaz de armazenar menor energia calorífica que o traço sem incorporação de PET.

4.2.1 Fluxo de Calor Conduzido nos revestimentos

Ao analisar o comportamento da temperatura superficial nas faces superiores e inferiores dos corpos de prova (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** (a)), nota-se que o traço T2 apresentou valores inferiores ao T1 (referência), o que indica que o corpo de prova de referência tende a perder mais calor para o meio do que o T2 pelo processo de transferência de calor por irradiação e convecção com o ar atmosférico. Isso implica em uma menor quantidade de calor a ser transferida por condução. Logo, era de se esperar, por esta razão, que os corpos de prova T1 apresentassem menor temperatura na face inferior do que os demais, fato este não observado. Assim, conclui-se que o processo de condução ocorreu de forma mais acentuada nos corpos de prova T1 do que no T2, visto as maiores temperaturas observadas na face inferior do corpo de prova.

Figura 4: (a) Temperatura superficial na face superior e inferior e (b) Diferença de temperatura (ΔT) entre as faces dos corpos de prova T1 e T2





(b)

Sabe-se que processo de condução de calor é diretamente proporcional à área da seção transversal (A), diferença de temperatura (ΔT) e coeficiente de condutividade (k) e inversamente proporcional ao comprimento (L) dos corpos de prova ensaiados. Uma vez que A e L se mantiveram praticamente constantes entre os exemplares ensaiados, a diferença de temperatura (ΔT) observada pode ser explicada principalmente pelas diferenças entre os coeficientes de condutividade das amostras. Considerando que densidade real e aparente foram menores na amostra com presença de PET, a diferença no espaçamento intermolecular entre os revestimentos é outro fator que ajuda também a explicar o comportamento observado, uma vez que materiais mais densos conduzem mais calor.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b) evidencia que a diferença de temperatura foi maior no corpo de prova T2 do que no T1. Logo, é de se esperar que a condutividade térmica deste seja menor do que a T1. Portanto, como a única diferença nos traços confeccionados é a menor ou maior presença de PET, conclui-se que a adição de PET nas misturas asfálticas foi a responsável pela redução do coeficiente de condutividade dos corpo de prova T2.

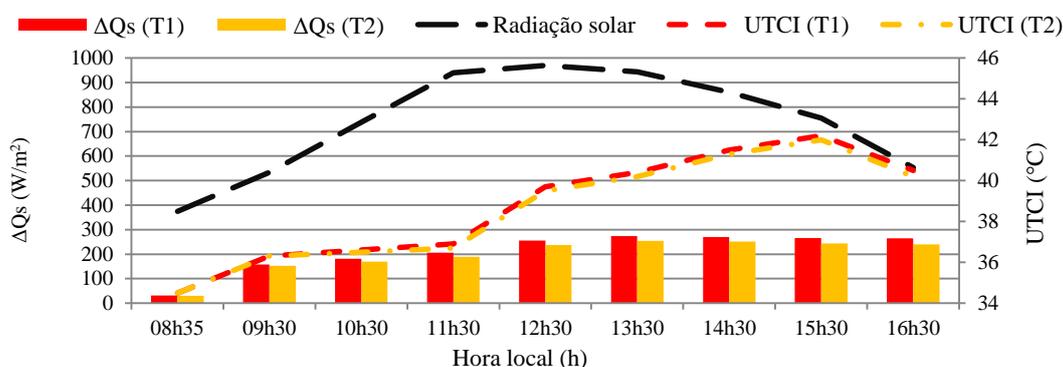
4.2.2 Fluxo de calor armazenado dentro dos traços pesquisados - ΔQ_S

O fluxo de calor armazenado nos corpos de prova é diretamente proporcional à entrada de radiação solar direta registrada no dia do experimento, com valores máximos superiores a 250 Wm^{-2} às 1h30min no período vespertino (

Figura 5, eixo principal). No estudo de Asaeda, Ca e Wake (1996), os fluxos máximos foram de 250, 180 e 160 Wm^{-2} para o revestimento asfáltico, de concreto e solo descoberto, respectivamente.

Os picos máximos de armazenamento foram de 273 e 255 Wm^{-2} nos traços T1 e T2, respectivamente. Callejas, Durante e Rosseti (2015), em medição realizada em área de estacionamento revestido com mistura asfáltica, registraram fluxo de calor máximo de 245 Wm^{-2} , próximos ao estimados neste estudo. O traço T2 registrou menores taxas de armazenamento, com redução média horária de 15,26 Wm^{-2} , 7,8% inferior ao traço T1. Portanto, a incorporação de flakes de PET em 5%, além de atender os requisitos mecânicos, proporciona menores taxas de armazenamento de calor durante o período diurno e menores taxas de calor sensível, responsáveis pelo aquecimento do ar, dissipadas durante o período noturno dentro do dossel urbano, contribuindo positivamente para amenizar o efeito de ICU.

Figura 5: Fluxo de calor armazenado (eixo principal) e percepção térmica predita pelo UTCI (eixo secundário) estimado nos corpos de prova



4.2.3 Sensação Térmica Predita por meio índice térmico

A percepção térmica derivada do UTCI se eleva à medida que a radiação solar incide no pavimento e eleva sua temperatura (Figura 5, eixo secundário). De acordo com a escala estabelecida para regiões de clima tropical por Borges, Callejas e Durante (2020), a percepção dos pedestres trafegando sobre tais revestimentos sob as condições ambientais registradas durante os ensaios termográficos, se enquadram até às 8h30min como “moderado estresse ao calor” (faixa de 28,5 a 36°C), enquanto nas demais horas como “forte estresse ao calor” (faixa de 36 a 43°C), indiferentemente do tipo de traço considerado. Os valores corroboram com Nince et al. (2013), que aferindo a sensação térmica sobre o concreto e o asfalto, das 10 às 17h, constataram índices de sensação térmica de até 43°C de UTCI para pedestres.

A redução média horária observada no UTCI, no traço T2 em relação ao traço T1, é de apenas 0,15 °C UTCI, o que demonstra que sobre este aspecto, a adição de flakes de PET as mistura em pouco contribui para a redução da sensação térmica dos pedestres, devendo outras alternativas serem utilizadas, como a modificação do índice de reflexão dos pavimentos seja por meio da modificação de sua cor escura para mais clara (aditivos a mistura) ou por meio de tintas refletoras, como proposto por Gartland (2010).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O traço convencional de CBUQ apresentou desempenho mecânico satisfatório, com 892 kgf de estabilidade e 1,08MPa de resistência a tração, sendo os limites mínimos para estes dois parâmetros 500 kgf e 0,65 MPa, respectivamente. O desempenho mecânico do traço T2 (com substituição parcial de 5%) mostrou-se inferior ao CBUQ convencional, porém, ainda atendeu a aos requisitos mínimos normativos. Este traço atingiu 632 kgf de estabilidade, 0,79 MPa de resistência à tração e parâmetros volumétricos adequados às misturas asfálticas de rolamento.

Para os traços T3 e T4 (com substituição parcial de 10% e 15%, respectivamente), os parâmetros volumétricos mostraram-se insatisfatórios para os limites estabelecidos pelas normas DNER-ME 031/2006 e DNER-ME 043/1995. Por este motivo, optou-se por não realizar os ensaios térmicos nos corpos de prova desses traços. Ademais, observou-se uma redução na densidade média destes traços, ocasionada pelos flakes de PET, o que prejudicou o desempenho mecânico destas misturas. Embora ambas as misturas tenham atingido o valor mínimo esperado para estabilidade, sendo 565 kgf e 526 kgf, respectivamente para o traço T3 e T4, o CBUQ com 15% de incorporação de PET obteve apenas 0,54 MPa de resistência à tração, enquanto o traço com 10% de PET atingiu 0,73 MPa.

Quanto aos ensaios térmicos, o traço T2 apresentou o melhor desempenho em relação à temperatura superficial na face superior do corpo de prova, com média de aproximadamente 1,2°C a menos que o traço de referência. Verificou-se que a propagação de calor na mistura T2 se reduziu com a incorporação de PET, já que a variação entre as temperaturas das faces superiores e inferiores do corpo de prova T1 aumentou. Isso sugere que a adição de resíduos de PET na mistura asfáltica reduziu o coeficiente de condutividade térmica do CBUQ.

O fluxo de calor armazenado nos corpos de prova se aproximou dos determinados em campo, sendo as menores taxas observadas no traço T2, com valor médio 7,8% inferior ao traço T1. Este comportamento é benéfico uma vez que um menor estoque de energia dentro do revestimento ocasiona menor dissipação de calor durante o período noturno, evitando que a atmosfera dentro do meio urbano permaneça mais aquecida em relação ao seu entorno rural.

A percepção térmica, estimada por meio do UTCI é resultado, entre outros fatores, das elevadas temperaturas superficiais identificadas em nos traços T1 e T2, que chegaram a alcançar valores superiores a 60°C. Não se observou diferenças na percepção térmica predita pelo índice UTCI que indicassem que a incorporação de PET seja benéfica sob ponto de vista de estresse térmico ao calor. Nesse sentido, outras alternativas técnicas devem ser adotadas para reduzir o nível de estresse térmico dos pedestres que trafegam sobre os pavimentos asfálticos.

Conclui-se, portanto, que a incorporação de 5% de flakes de PET em substituição ao agregado miúdo resultou em melhorias no desempenho térmico do CBUQ, diminuindo a condutibilidade térmica do material e mantendo as propriedades mecânicas dentro dos limites estabelecidos pelas normas. Dessa forma, trata-se de uma opção tecnicamente viável para a destinação destes resíduos, principalmente em vias localizadas dentro do meio urbano, uma vez que a redução de armazenamento calorífico proporcionada pela adição de PET dentro dos revestimentos asfálticos contribui para a redução do fenômeno da ICU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 51 – Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”**, Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 52 – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**, Rio de Janeiro, 2002.



_____**NBR 53 – Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**, Rio de Janeiro, 2002.

_____**NBR 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003.

_____**NBR 7809 – Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2006.

_____**NBR 15866 – Ensaio não destrutivo - Termografia - Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos**, Rio de Janeiro, 2010.

_____**NBR 15087– Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral**, Rio de Janeiro, 2012.

_____**NBR 6296 – Produtos betuminosos semissólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa**, Rio de Janeiro, 2012.

_____**NBR 9277– Adesivos - Determinação da viscosidade - Método do viscosímetro Brookfield**, Rio de Janeiro, 2014.

ALMEIDA E SILVA, J. A. (2015). **Utilização do politereftalato de etileno (PET) em misturas asfálticas**. Campina Grande. 141f. Tese (Doutorado), Centro De Ciências e Tecnologia Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 19**, de 11.7.2005. Disponível em: http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/julho/ranp%2019%20-%202005.xml?sync=1&vid=anp:10.1048/enu. Acesso em 22 outubro 2019.

ARAO, M. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de polietileno tereftalato (PET) triturado**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

ASAEDA, T.; CA, V. T.; WAKE, A. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 3, p. 413-427.

BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. (2007). Evaluation of Building Materials Using Infrared Thermography. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**, V. 21, N. 1, P. 218-224.

BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P.; LAVINE, A. S.; DEWITT, D. P. (2014). Fundamentos de transferência de calor e de massa. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC. p. 629.

BLAZEJCZYK, K.; BROEDE, P.; FIALA D.; HAVENITH, G.; HOLMÉR, I.; JENDRITZKY, G. (2010). Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. **Miscellaneous Geographica**; v14, p.91-102.

BORGES, V. C. A. LEÃO, CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C. (2020). Thermal sensation in outdoor urban spaces: a study in a Tropical Savannah climate, Brazil. **Int J Biometeorol**, 64, p.533–545.

CALLEJAS, I. J. A.; L. C. DURANTE; K. A R. (2015). Pavimentação Asfáltica: Contribuição no aquecimento de áreas urbanas. **E&S - Engineering and Science**. v.1, n. 3, p. 64-72.

CALLEJAS, I. J. A.; M. S. BIUDES; N. G. MACHADO; L. C. DURANTE; F. A. LOBO (2019). Patterns Of Energy Exchange For Tropical Urban And Rural Ecosystems Located In Brazil Central. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v.13, n.1, p.69-79.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME 003 - Material betuminoso - determinação da penetração**. Rio de Janeiro, 1999.

- _____ **ME 043 - Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall.** Rio de Janeiro, 1995.
- _____ **ME 054 - Equivalente de areia.** Rio de Janeiro, 1997.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2006.
- GARTLAND, L. Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2010.
- GAGINO, R.; KREIKER, J.; MATTIOLI, D.; ARGUELLO, R. Emprendimientos locales residuos plásticos materiales innovadores construcción. **Revista Area**, v. 21, p. 35-45, 2015.
- MARQUES, V. C. **Análise das propriedades de misturas asfálticas com pelete e agregados de resíduos de concreto.** João Pessoa, 2014. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 2014.
- MEYN, ST. R. OKE. Heat Fluxes Through Roofs and Their Relevance to Estimates of Urban Heat Storage. **Energy and Building**, v.41, p.745-752, 2009.
- MATZARAKIS, A.; F. RUTZ; H. Mayer, Aplicativo computacional Ray Man 1.2. Disponível em: <<https://www.urbanclimate.net/rayman/introraymanpro.htm>>. Acesso em 07 abril, 2019.
- MOGHADDAM, T. B.; M. R. KARIM. Properties of SMA Mixtures Containing Waste Polyethylene Terephthalate. **International Journal of Chemical and Environmental Engineering**. v. 6. n. 2. p. 170-173, 2012.
- NINCE, P.; C. R. MUSIS; M. S. BIUDES; J. S. NOQUEIRA, M. C. J. A. NOQUEIRA. Usos dos índices PET e UTCI na avaliação do conforto termal no campus da UFMT em Cuiabá-MT. **Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.9, n. 9, p. 2026-2036, 2013.
- RÄDER, A.R. S.; DINIZ, B. C.; PIRES, D. M.; ALIFER, G. F. S.; BEIER, A. V; ECHEVERRIA, J. A. S. Estudo da adição de resíduos de garrafas pet pós-consumo em misturas asfálticas à quente. **Anais... 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Gramado**, v. 4, p. 1474-1482, 2018.
- SERRA, G. A.; GUIMARÃES, A. C. R.; SILVEIRA, V. L.; BARROS, A. M. S.; Reis, A. C. C. Estudo da Adição de Resíduos de Polietileno Tereftalato (PET) Como Agregado Alternativo Para Misturas Asfálticas. **Anais... 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Gramado**, v. 4, p. 1668–1687, 2018.
- SPECHT, L. P.; BORGES, P. A. P.; HELLMANN, L Determinação das propriedades térmicas de concretos asfálticos com diferentes tipos de ligante. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 29, n. 2, p.198-210, dez. 2008.