

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A FABRICAÇÃO DE CBUQ (CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE)

RAFAELY ANGELICA FONSECA BANDEIRA¹, ANTONIO DE SOUZA ARAUJO², ALMIR MARIANO DE SOUSA JUNIOR³, FRANCISCO ODAIR FILGUEIRA JUNIOR⁴

RESUMO

A indústria da construção civil utiliza asfaltos oriundos de petróleo na fabricação do CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente desde tempos mais remotos. Hoje, o CBUQ é amplamente utilizado para construção de estradas no país. Para a produção adequada deste produto, faz-se necessário obedecer a aspectos técnicos relacionados aos resultados esperados conforme normas vigentes, a partir de ensaios de resistência à compressão simples e tração diametral. Este artigo revisa a literatura sobre a fabricação de CBUQ que utiliza os mais diversos resíduos, apresentando a aplicação técnica e a viabilidade ambiental e econômica deste material na construção de pistas de rolamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Agregados. Resíduo. CBUQ. Resistência à compressão. Revisão da literatura.

LITERATURE REVIEW OF HMAC (HOT-MIX ASPHALT CONCRETE) MANUFACTURE

ABSTRACT

The civil construction industry has used petroleum-based asphalt in the manufacture of HMAC (Hot-Mix Asphalt Concrete) for a long time. Nowadays, HMAC is widely used in road construction in Brazil. For adequate production, and to achieve the desired results according to current guidelines, certain technical requirements must be adhered to, based on simple and diametral compression traction tests. This article reviews the literature on HMAC manufacturing that uses different waste materials, presenting the technical application and environmental and economic feasibility of this material in roadway construction.

KEYWORDS: Aggregates. Waste. HMAC. Compression strength. Literature review.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é largamente utilizado em confecção de rodovias. Ele emprega produtos pré-misturados a quente de graduação

¹ Profa. Dr^a. da UNIFERSA, E-mail: rafaely@ufersa.edu.br

² Prof. Dr. do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). E-mail: araujo.ufrn@gmail.com

³ Prof. Dr. da UNIFERSA, E-mail: almir.mariano@ufersa.edu.br

⁴ Engenheiro Eletricista, E-mail: odaiautomacao@gmail.com

densa. Rigorosas especificações no que se diz respeito a equipamentos de construção e índices tecnológicos, tais como granulometria, teor de betume, estabilidade, vazios etc são exigidas. O CBUQ pode ser usado como base de pavimentos e revestimentos. Para revestimentos, deve possuir faixa granulométrica adequada (DNIT, 2006).

Askeland [4] enfatiza a importância dos estudos sobre os materiais compostos que se formam a partir de outros materiais, produzindo propriedades distintas dos materiais isoladamente, sendo o concreto é um exemplo típico. Materiais cerâmicos são resistentes e duros, embora sejam frágeis. O modo de processamento, os materiais tornam-se resistente a quebra, podendo ser utilizado em materiais com exposição a cargas.

Segundo a NBR 12948 [6], o material para preparo do CBUQ é constituído de agregado graúdo, agregado miúdo e material de enchimento, cujo agregado graúdo deve ser constituído de fragmentos de rocha britada, escória britada, pedregulho ou cascalho, britados ou não, como também de fragmentos são, duráveis, livres de torrões de argila e substâncias nocivas. Já o agregado miúdo é constituído de areia, pó-de-pedra, ou mistura de ambos. Os agregados devem ser resistentes, livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. E por fim, o material de enchimento deve ser constituído de materiais minerais finamente divididos, tais como cimento Portland, cal extinta, pós calcáreos etc. O material deve estar seco e isento de grumos. No agregado miúdo deve haver um equivalente de areia superior a 55%.

Existem estudos diversos sobre a aplicação de materiais nos concretos CBUQ, com adição de biomassa, cinza volante, borrachas trituradas de pneus, asfalto reusado dentre outros. A motivação para este estudo se dá influenciado pela busca da aplicação do resíduo oriundo da indústria petrolífera, que é gerado em grande quantidade e relacionado a problema ambiental ao CBUQ, material muito importante e utilizado na indústria da construção. Esta correlação visa obter, sobretudo, um ganho ambiental para a disposição final do subproduto, cascalho de perfuração de petróleo.

1.1. Objetivos

Busca-se identificar as mais diversas formas de fabricação da mistura química do CBUQ, praticados no Brasil e no mundo, enfatizando a norma técnica brasileira como critério técnico de fabricação do concreto asfáltico nas mais diversas estradas de rodagem, em sua camada mais superficial.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

Os CBUQs são empregados em diversos produtos no Brasil e no mundo, respeitando às diversas normas técnicas de fabricação.

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente – CBUQ é uma mistura produzida a uma temperatura adequada, em usina própria, resultando em características específicas ao término do processo. Para compor o CBUQ, é misturado e compactado, a quente, o agregado mineral graduado, material de enchimento (fíler), ligante betuminoso, CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo e em alguns casos, o melhorador de adesividade. Na usina, os materiais são previamente aquecidos antes da mistura, espalhados e compactados para exercer a função de revestimento, camada de ligação, regularização ou reforço estrutural do pavimento.

Zhang et al. [29] verificaram a influência das características de micro morfologia e estrutura porosa do asfalto sulfonado nas propriedades mecânicas e na microestrutura da pasta de cimento de poços de petróleo. Foi analisado o comportamento de propagação de trinca de espécimes fraturados em ensaios mecânicos. Constatou-se que o percentual de asfalto sulfonado influencia a resistência à tração, sendo também afetado pelo percentual de ligante e do tempo de cura. A resistência aumenta com o tempo e diminui com a adição de ligantes.

A camada de rolamento de CBUQ deve ser construída de acordo com especificações do projeto e dentro de padrões normalizados de alinhamento, perfil da seção transversal e com dimensões definidas em normas brasileiras.

2.1.1. Composição da mistura

2.1.1.1. Cimento Asfáltico

Os cimentos asfálticos podem ser empregados na mistura modificados ou não por polímero. As características do Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP são determinadas por normas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT ou pela *American Society for Testing and Materials* - ASTM.

Os cimentos não modificados, tais como o CAP 30-45, CAP 50-70 e CAP 85-100, são classificados por penetração, ou seja, os números da nomenclatura representam a distância, em décimos de milímetros, que uma agulha-padrão penetra perpendicularmente na amostra de material sob condições pré-fixadas de carga, tempo e temperatura [1].

O fabricante ou distribuidor do CAP deve apresentar a procedência, tipo, quantidade do material e a distância entre a fábrica e o canteiro de obras, assim como o certificado de análise dos ensaios de caracterização exigidos pela especificação. Entre o dia de carregamento para transporte, e aquele previsto de chegada ao destino, ou seja, o canteiro de serviço, que não deve ultrapassar os 10 dias. Além destas informações, ao chegar à obra, o carregamento de CAP modificado ou não por polímeros, precisa passar por ensaios preconizados pela ABNT, para obtenção de alguns parâmetros, tais como ponto de fulgor, formação de espuma, viscosidade, dentre outros [11].

2.1.1.2. Agregados

Os agregados utilizados na confecção do CBUQ são de granulometria graúda e miúda, e são caracterizados conforme normas brasileiras.

Agregado graúdo

Segundo a Especificação de Serviço - ES 031 do DNIT [15], o agregado graúdo pode ser pedra britada, escória, seixo rolado britado ou outro material indicado nas Especificações complementares. As partículas devem estar íntegras e limpas, livres de partículas grandes de argila e outras substâncias nocivas, para atender aos requisitos prescritos em normas.

O controle com o agregado graúdo ocorre por inspeção diária, na verificação da presença de pó e/ou outras fontes de contaminação prejudiciais ao agregado. São realizados ensaios para o controle de Abrasão Los Angeles, conforme NBR NM 51. Em alguns casos, é necessário realizar o teste de compactação *Marshall*, com e sem ligante, preconizado no Método de Ensaio – ME 401 do DNER [14]. Estas normas garantem a padronização do material e as propriedades no produto final, CBUQ.

Agregado miúdo

Um material mineral é aquele formado, predominantemente, por compostos inorgânicos, em vários estágios de intemperismo [18]. O material do solo é considerado material mineral quando houver preponderância de suas propriedades de constituintes minerais; e não for constituído predominantemente por materiais orgânicos, originários de resíduos vegetais em diferentes estágios de decomposição, fragmentos de carvão finamente divididos, substâncias húmicas, biomassa meso e

microbiana, e outros compostos orgânicos naturalmente presentes no solo; podendo estar associados ao material mineral em proporções variáveis.

De acordo com o ME 054 do DNER [12], o agregado miúdo utilizado pode ser areia, pó de pedra ou mistura de ambos ou outro material indicado nas especificações complementares. Deve apresentar partículas individuais resistentes, livres de partículas de argila e outras substâncias nocivas. O agregado miúdo deve apresentar o equivalente de areia, preconizado pela norma NBR 12052 [5] com resultado a igual ou superior a 55%. É necessária a realização do ensaio a cada oito horas de trabalho, ou quando houver variação na natureza do material, para o controle de qualidade.

Material de enchimento (Fíler)

Conforme a Especificação de Material - EM 367 do DNER [13], o fíler, ou material de enchimento, tem uma granulometria muito fina constituída de materiais minerais. Ele deve atender aos valores descritos na Tabela 1, podendo ser caracterizado por cimento Portland, cal extinta, pós-calcários, cinzas volantes, dentre outros. Em sua aplicação, o fíler deve estar seco e isento de grumo.

TABELA 1. Granulometria do fíler [11].

Peneira de Malha Quadrada		% em Massa, Passante
ASTM	mm	
Nº 40	0,42	100
Nº 80	0,18	95 - 100
Nº 200	0,075	65 - 100

Melhorador de adesividade

O melhorador de adesividade é um aditivo empregado, com quantidade fixada em projeto, a fim de aglutinar o ligante asfáltico aos agregados miúdos e graúdos determinado por métodos preconizados pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, DNER.

2.1.1.3. Mistura

A mistura do concreto asfáltico deve atender aos limites da faixa granulométrica expostos na Tabela 2.

TABELA 2. Composição das Misturas Asfálticas [11]

Peneira de Malha Quadrada		Designação				Tolerâncias
ASTM	mm	I	II	III	IV	
		% em Massa Passante				%
2"	50,00	100,00	-	-	-	-
1 1/2"	37,50	90 - 100	100,00	-	-	± 7
1"	25,00	75 - 100	90 - 100	-	-	± 7
3/4"	19,00	60 - 90	80 - 100	100,00	-	± 7
1/2"	12,50	-	-	90 - 100	-	± 7
3/8"	9,50	35 - 65	45 - 80	70 - 90	100,00	± 7
Nº 4	4,75	25 - 50	28 - 60	44 - 72	80 - 100	± 5
Nº 10	2,00	20 - 40	20 - 45	22 - 50	50 - 90	± 5
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	20 - 50	± 5
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	7 - 28	± 3
Nº 200	0,08	1 - 8	3 - 8	2 - 10	3 - 10	± 2

De acordo com a norma ET-027 DER/SP [11], a dosagem de mistura deve atender alguns requisitos:

1. o tamanho máximo do agregado da faixa adotada deve ser inferior a 2/3 da espessura da camada compactada;
2. a fração retida entre duas peneiras consecutivas não deve ser inferior a 4% do total, exceto quando forem duas peneiras de maior malha de cada faixa;
3. a partir da curva granulométrica de projeto, é obtida uma faixa de trabalho, que deve obedecer à tolerância indicada para cada peneira, como pode ser observado na Tabela 2, de forma que respeite também os limites da faixa granulométrica adotada;
4. a cada seis meses, no mínimo, o projeto da mistura pela dosagem Marshall deve ser refeito, verificando-se a ocorrência de alteração dos materiais constituintes da mistura. A energia de compactação deve ser determinada pelo número de golpes definidos em projeto;
5. os parâmetros obtidos no ensaio Marshall para estabilidade, fluência, porcentagem de vazios, razão betume/vazios e o teor ótimo de ligante do projeto de mistura asfáltica devem atender aos valores apresentados na Tabela 3.

TABELA 3. Requisitos para o Projeto Mistura Asfáltica [11]

Características	Método de Ensaio	Camadas de Rolamento e Reperfilagem	Camada de Ligação (Binder)
Estabilidade mínima, kN (75 golpes no ensaio Marshall)	NBR 12891	8	8
Fluência (mm) (0,01*)	NBR 12891	2,0 a 8	2,0 a 8
% de Vazios Totais	-	4	4 a 6
Razão Betume/Vazios - RBV (%)	-	65 a 80	65 a 75
Vazão do Agregado Mineral - VAM (%)	-	-	-
Concentração crítica do fíler*	ES P00/26	< 90% Cs	< 90% Cs
Resistência à Tração por Compressão Diametral Estática a 25 °C, mínima, MPa	NBR 15087	0,8	0,65
Resistência a danos por umidade induzida, mínimo, %	AASHTO T 283	70	

* a concentração crítica do fíler corresponde à concentração máxima em volume de fíler admitida no sistema fíler-asfalto.

Além disto:

1. a razão fíler/asfalto em massa/massa recomendada está compreendida de 0,6 a 1,2;
2. nas misturas asfálticas para camada de rolamento faixas II e III, os vazios do agregado mineral, VAM, devem atender aos valores mínimos definidos normas em função do tamanho nominal máximo do agregado;
3. recomenda-se que o teor ótimo de ligante seja menor do que o teor de ligante correspondente ao VAM mínimo, da dosagem Marshall;
4. os vazios da mistura, na fase de dosagem podem ser verificados por procedimentos preconizados em normas da ASTM e DNER.

Zhang et al. [29] discutiram sobre uma modelagem constitutiva de uma mistura asfáltica que quando submetida a uma carga compressiva externa. As teorias viscoelásticas são normalmente utilizadas para caracterizar comportamentos de materiais mais resistentes e prever deformações recuperáveis. Um parâmetro de

rendimento define quando uma mistura asfáltica começa a se formar e se torna viscoplástica irreversível. Uma regra de endurecimento específica o rendimento sucessivo após o rendimento inicial. Para misturas de asfalto, existe uma regra de fluxo de tensão/trabalho. Com uso de uma relação constitutiva da mistura de asfalto nas operações de deformação, pode-se estimar a tensão é por métodos visuais. O pico de pressão é a resistência à compressão.

2.1.2. Equipamento para fabricação de CBUQ

Antes da utilização dos equipamentos, eles devem atender às especificações exigidas pelos órgãos competentes, por meio de testes normatizados. O equipamento necessário para a execução de camadas de rolamento de CBUQ de pré-misturado a quente consiste de veículos para transporte de materiais, equipamento de aquecimento do material betuminoso, equipamento de secagem e aquecimento do agregado para atender às especificações de temperatura. Termômetros monitoram a temperatura do material. Equipamentos para mistura e para compressão, caracterizados pelo rolo pneumático e rolo metálico liso e outras ferramentas pequenas, tais como enxadas, pás, dentre outros, são usados. Usinas misturadoras fixas ou móveis, soquetes mecânicos, e demais equipamentos podem ser utilizados.

2.1.3. Execução da mistura de CBUQ

A primeira condição a ser considerada sobre a execução do CBUQ diz respeito ao clima, que não poderá ser chuvoso, ter a temperatura ambiente superior a 10°C, para então ser realizados os procedimentos necessários (ES-031 [15]).

Quando as condições ambientais são satisfeitas, é realizado o preparo da superfície, com secagem e limpeza para a retirada das impurezas e materiais soltos que possam prejudicar a aderência da etapa da imprimação na execução do asfalto ou pintura de ligação que receberá a mistura.

Para a produção do concreto asfáltico, os materiais devem ainda atender as especificações da execução, tais como o modo de homogeneização, o teor de umidade permitido, entre outras, que devem ser avaliadas antecipadamente a ocorrência da mistura, realizada em usina, de modo que os agregados sejam completamente envolvidos pelo aglutinante para obtenção das características esperadas da mistura final [11].

A temperatura do cimento asfáltico varia de acordo com o ligante utilizado, variando de 120 a 177°C, caso seja modificado por polímero ou não. O valor

adequado depende da viscosidade Saybolt-Furol, variando de 75 a 150 SSF (*Saybolt Furol Seconds*), de acordo com a NBR 14950 [8].

O transporte e a distribuição do concreto asfáltico devem ser feitos com equipamentos adequados, de modo a evitar a segregação da mistura e a queda de temperatura. Caso ocorra alguma irregularidade na superfície, ela deve ser corrigida de imediato pela adição manual da mistura, no entanto, esta ação é considerada prejudicial [11].

3. REVISÃO DA LITERATURA

Remonta a tempos muito antigos o uso de hidrocarbonetos oriundos da indústria petrolífera como cimento asfáltico. Eles atuam como ligantes do concreto asfáltico, sendo aplicados em rodovias e estradas do mundo inteiro. O concreto asfáltico usinado a quente é indicado para estradas com tráfego intenso, no entanto, este produto gera gases e vapores orgânicos que agridem a saúde das pessoas e o meio ambiente, devido o teor de hidrocarbonetos presente no cimento asfáltico.

Devido à diversidade de agregados graúdos e miúdos, materiais de enchimento tais como filer calcário ou pozolânico e problemas ambientais da geração de resíduos industriais, busca-se a substituição dos componentes minerais por rejeitos industriais. Esta pesquisa foi motivada com o intuito de apresentar uma nova tecnologia para a fabricação do CBUQ utilizando subproduto, caracterizado como rejeito ambiental perigoso, conforme índices de contaminantes verificados em caracterização física do solo e legislação ambiental vigente.

Kandhal [19] revisou a literatura sobre as principais aplicações de subprodutos residuais de indústrias diversas na fabricação do HMA, asfalto de mistura a quente. Entre os resíduos aplicados experimental ou rotineiramente, elencou-se os resíduos industriais oriundos da celulose, ligninas de madeira, cinzas, os resíduos municipais/domésticos, tais como o resíduo da incineração, lama de esgoto, borracha de sucata, resíduos de vidros, telhas e ainda os resíduos de mineração tais como a ganga da mina de carvão. Subprodutos de processos industriais, como alto-forno, escórias da fabricação do aço e enxofre eram considerados materiais residuais. No entanto, estes produtos obtiveram uso rotineiro.

Zoorob e Suparma [31] analisaram a investigação laboratorial das propriedades do concreto asfáltico contendo agregados plásticos reciclados (Plastiphalt). Resíduos de plásticos reciclados, predominantemente compostos de polietileno de baixa densidade (PEBD), foram usados em misturas betuminosas densas para substituir agregados minerais de mesmo tamanho. Os resultados obtidos nesta investigação

indicam que, no mesmo conteúdo de ar vazio, a mistura de Plastiphalt compactada tem menor massa específica que a do mix de controle convencional. O uso do PEBD em substituição parcial de agregados também resulta em um aumento de 250% no valor de estabilidade (carga) de Marshall e valor quociente de Marshall (resistência à deformação). A reciclagem do Plastiphalt também foi investigada. As propriedades mecânicas da mistura reciclada foram encontradas ser igual ao do Plastiphalt original e melhor que as misturas de controle. A incorporação de plásticos reciclados e PEBD na fabricação de misturas de Plastiphalt não requer modificações nas instalações existentes da planta de produção de asfalto e nem das técnicas.

Moss e Bromma [22] patentearam um processo para preparar uma mistura a quente na composição de asfalto, misturando-se grãos agregados com um ligante macio, e adicionando um aglutinante duro. Na presente invenção, tanto um emulsionado como um não, um componente ligante macio emulsionado pode ser usado, mas o ligante macio não emulsionado é preferido. O componente aglutinante duro é adicionado à mistura como espuma. O ligante macio também pode ser adicionado como uma espuma para se ter vantagens em situação específica. O componente macio também pode ser adicionado ao agregado a uma temperatura relativamente baixa, isto é, uma temperatura de menos de 120 °C. Misturas de asfalto usadas para construção de estradas ou pavimentação em geral consistem em misturas de pedra, cascalho, areia, enchimento e componentes aglutinantes.

Ahmedzadea e Sengoz [2] avaliaram o uso do agregado grosso de escória de aciaria em concreto betuminoso de mistura quente. A influência da utilização de escória de aço como agregado graúdo sobre as propriedades do asfalto misturado a quente onde quatro misturas asfálticas diferentes contendo dois tipos de cimento asfáltico AC-5; AC-10 e agregados graúdos calcário; escória de aço foram usadas para preparar testes de amostragem de Marshall e para determinar o teor ótimo de betume. Foram analisadas características mecânicas de todas as misturas por testes de estabilidade de Marshall, módulo de rigidez de tração indireta, rigidez de fluência e resistência indireta à tração. A sensibilidade elétrica dos espécimes também foi investigada. Concluiu-se que a escória de aço utilizada como agregado graúdo melhorou propriedades mecânicas das misturas asfálticas e os valores de resistividade volumétrica demonstraram que a condutividade elétrica das misturas de escória de aço foi melhor que a das misturas de calcário.

Pasandín et al. [23] verificaram a influência do envelhecimento nas propriedades do betume a partir de misturas asfálticas com agregados reciclados de concreto. O efeito do envelhecimento na rigidez de misturas asfálticas com diferentes quantidades de (agregados reciclados de concreto) RCA, antes e após o tratamento

térmico, foi analisado pela avaliação das propriedades betuminosas. A reutilização desses agregados no novo asfalto de mistura a quente pode ser um método de produção mais sustentável, mas as misturas podem exigir um tratamento térmico antes da compactação para melhorar seu desempenho de sensibilidade à água. Como consequência direta deste tratamento, observou-se um aumento no módulo resiliente do asfalto misto a quente.

Perez e Pasandin [25] estudaram a resistência à fadiga de concretos utilizando agregados reciclados, cujas misturas foram fabricadas com dois tipos de betume: um betume de penetração B35 / 50 e um betume residual modificado com 10% de BC35/50 residual. Verificou-se que o desempenho de fadiga da mistura quente de asfalto usando RCA, agregados de concreto reciclado, aumentou a resistência à fadiga do HMA, quando o asfalto de mistura a quente também aumenta. O trincamento por fadiga é um dos principais modos de falha do HMA. A investigação laboratorial analisou o desempenho de fadiga do HMA realizado com RCA e as pesquisas mostraram o efeito benéfico na vida em fadiga da incorporação de RCA. Além disso, o uso de borracha fragmentada levou a misturas betuminosas RCA com maior vida em fadiga em vias de tráfego médio.

Azzam et al. [9] evidenciam que a incorporação do xisto betuminoso jordaniano em asfalto quente no desenvolvimento de projetos que usam xisto betuminoso para geração de energia e extração de óleo de xisto. Diferentes composições de xisto betuminoso nas novas misturas de pavimento asfáltico foram investigadas de acordo com os regulamentos rodoviários locais. Resultados promissores foram alcançados, e descobriu-se que a estabilidade de Marshall mostrou uma melhoria de 10 a 20% e todas as propriedades exigidas pelos regulamentos da rodovia jordaniana que são geralmente baseados na Associação Americana de Autoridades Rodoviárias e de Transporte do Estado, AASHTO, como vazão, vazios em agregados minerais e vazios de ar.

Pasandín et al. [24] utilizaram resíduos da indústria de papel como carga na mistura quente de asfalto. A indústria de papel apresenta resíduos com alto potencial de reciclagem, motivados por isto, verificou-se a viabilidade do uso de resíduos de biomassa e cinzas volantes de biomassa da indústria de papel como carga em asfalto misto (HMA) para a construção de pavimentos. A resistência a danos causados pela umidade, sensibilidade a água, de uma base foi estudada utilizando o ensaio de resistência ao escoamento indireto no conteúdo de asfalto. As propriedades de carga mais importantes foram determinadas para estudar a resistência à água. Utilizou-se um enchimento de controle, isto é, enchimento comercial de calcário, para comparar os resultados. As propriedades mecânicas (rigidez e resistência à deformação

permanente) das blendas também foram estudadas. Como resultado, uma baixa resistência à água foi encontrada. Além disso, as cinzas apresentavam resistência à água inadequada para o HMA. Em avaliação laboratorial da indústria de papel usado, resíduos e cinzas volantes, concreto asfáltico, AC 22 base B50 / 70 G, foi estudado utilizando-os como carga mineral. Resíduos de biomassa e cinzas mostraram resistência à água muito baixa. No entanto, uma nova linha de pesquisa foi aberta, usando cinzas volantes no asfalto frio.

Araújo et al. [3] avaliam a resistência à compressão do concreto aditivado com borra oleosa de petróleo. Os resíduos carbonosos, ricos em petróleo, foram adicionados na fabricação de concreto, buscando aumentar a resistência à compressão, e verificaram que dependendo das condições de uso, os Polímeros de Hidrocarbonetos Aromáticos, conhecidos como PAHs, tiveram ampla aplicação principalmente pela facilidade de aplicação e bom desempenho, com baixo custo. Os principais benefícios obtidos com as adições específicas são em termos de aspectos ambientais, pois, quando são adicionados resíduos industriais impede-se que o material seja liberado no meio ambiente sem qualquer finalidade benéfica. A substituição parcial do cimento reduz seu consumo e conseqüentemente o custo do concreto.

A Figura 1 mostra posição de carbono incorporada em estruturas heterogêneas de silicato.



FIGURA 1. Carbono incorporado em estruturas heterogêneas de silicato.

Fonte: Araújo et al. [3].

Conforme Askeland [4], materiais com ligações covalentes, como o átomo de silício, presentes no material compósito de concreto, compartilha elétrons entre dois ou mais átomos. Para que as ligações covalentes se formem, os átomos de silício se

organizam de tal maneira que tenham relação direcional fixa entre eles. O silício produz um tetraedro com ângulos de $109,5^\circ$ entre as ligações covalentes. Estas ligações são muito fortes, de modo que os materiais conectados deste modo geralmente têm ductilidade baixa, condutividade baixa e para conduzir eletricamente, deve quebrar a ligação covalente; para isso, altas temperaturas ou tensões são necessárias.

Kareem et al. [20] avaliaram os agregados de concreto reciclado com revestimento duplo para mistura quente de asfalto. A técnica de duplo revestimento (DCT) foi desenvolvida para melhorar a resistência e a durabilidade dos agregados reciclados de concreto. Os RCAs foram inicialmente revestidos com uma camada de pasta de escória de cimento (CSP) para reforçar partículas fracas. Então, uma segunda camada de Sika foi aplicada para reduzir sua absorção de betume e aumentar a durabilidade. Ensaio Marshall, teste de tração indireta, razão de tração indireta e módulo de elasticidade resiliente indireto foram realizados para avaliar as misturas intermediárias. Os resultados indicaram que o DCT diminui a absorção de água, aumenta a resistência à umidade e produz resistência superior a 4000 MPa para mistura intermediária de acordo com práticas australianas.

Yang et al. [27] analisaram as emissões causada pelo uso de borracha reciclada de pneu modificado na construção de asfaltos nas condições de mistura quente. As emissões perigosas de asfalto modificado CR, durante a construção têm sido uma preocupação. Foram realizados testes de escala laboratorial e de emissões em grande escala, quando se verificou que a adição de borracha fragmentada CR aumentou significativamente as emissões tóxicas, como o xileno e o tolueno. Verificou-se que a temperatura é o fator mais influente. A tecnologia de mistura a quente pode reduzir significativamente o nível de emissão e deve ser incentivada a mistura asfáltica contendo CR. A fonte de asfalto e outros aditivos na produção de asfalto modificado CR também pode afetar as emissões.

Qu et al. [26] reportam que com o avanço da tecnologia, comprovou-se que as propriedades microscópicas do asfalto podem ser aferidas a partir da simulação de dinâmica molecular (MD). O principal componente do pavimento asfáltico, o aglutinante de asfalto, é crucial para o desempenho em serviço e para a vida na estrada. Usando-se a estrutura molecular do aglutinante de asfalto e agregado, a energia de interação entre eles pode ser caracterizada. O mineral agregado influencia a adesão, também é usado para explorar a influência da água no comportamento de adesão a partir de uma micro perspectiva; algumas pesquisas mostram que a interface entre o aglutinante de asfalto e a calcita é suscetível devido a danos causados pela umidade em um baixo teor de umidade. Em termos do mecanismo de fissura,

aplicando alguma tensão em diferentes modelos de ligantes asfálticos, verifica-se que a distribuição dos átomos em microescala influenciaria os defeitos intrínsecos do aglutinante asfáltico, e a iniciação e propagação das fissuras seriam ainda mais afetadas no aglomerante de asfalto.

Zhou et al. [30], em um estudo comparativo, determinaram os efeitos do grafeno e dos nanotubos de carbono nas propriedades termomecânicas do aglutinante de asfalto, utilizaram simulações moleculares e experimentos. A micromorfologia do grafeno e dos nanotubos de carbono foi medida por microscopia eletrônica de varredura. A estabilidade térmica e temperatura de transição foram investigadas por calorimetria diferencial de varredura. Os resultados da simulação foram Tg alterou com o grafeno (GMA) e as modificações modificadas de carbono (CNsMA). Os coeficientes de expansão, a temperatura e a capacidade de adaptação aumentaram com a adição de grafenos ou nanotubos de carbono. O grafeno ou nanotubos de carbono foram candidatos promissores para o futuro asfalto modificado.

Lucena et al. [21], em estudos sobre a composição do cascalho de perfuração de petróleo, realizaram a caracterização térmica do resíduo de perfuração. Para a análise realizaram a caracterização térmica do resíduo oleoso originário da perfuração de poço de petróleo (poço: 1-POTI-4-RN, localizado em Governador DIX-Sept Rosado - RN - Brasil). Foram realizadas análises termogravimétrica (TG), análise térmica diferencial (ATD), e difração de raios-X (DRX). Análises termogravimétricas e termodiferenciais foram realizadas para indicar as faixas de temperaturas onde ocorrem as perdas de massas e as temperaturas em que ocorrem transformações endotérmicas e exotérmicas. É importante ressaltar, que os principais elementos encontrados - calcita, caulinita e quartzo (amostra 1) quartzo, calcita e caulinita (amostra 2) e quartzo, calcita, caulinita, magnesita e mica (amostra 3) - possuem a característica favorável a fazer parte da mistura asfáltica. Os autores sugerem a substituição dos materiais tradicionais - agregado miúdo (areia), e/ou filer (cal, caulim ou cimento). Isso se torna possível em razão da afinidade existente entre estes materiais e os tradicionais. A incorporação do resíduo, então, não traria prejuízo ao desempenho da mistura asfáltica quanto aos parâmetros de resistência e durabilidade. O que define a função (agregado ou filer) e a quantidade indicada para o resíduo serão os ensaios de misturas asfálticas (Ensaio Marshall, Viscosidade e Penetração) e granulometria (Análise Granulométrica).

Bandeira [10], corroborado por Lucena et al. [21], usou cascalho de perfuração de poços de petróleo na fabricação de CBUQ, recomendando o uso de 10% de cascalho em substituição parcial do agregado miúdo, areia, obtendo a aprovação em todos os ensaios característicos recomendados pela ABNT e pelo DNIT [17]. Mais

ainda, obteve ganho no tocante a aspectos técnicos, respeitando as resistências a tração por compressão diametral e resistência a compressão parametrizadas pelo ensaio Marshall; notando ganho econômico na fabricação por utilizar apenas 5% de cimento asfáltico de petróleo e aplicação ambiental de um resíduo proveniente da indústria petrolífera.

Diante do exposto, vê-se que o reuso de concreto reciclado, em substituição do agregado graúdo na fabricação do concreto novo, inclusive já é muito aplicado na região Nordeste do Brasil. E por este motivo, já existem estudos para verificar a durabilidade, a resistência e a toxicidade destes concretos fabricados com produto de asfalto reciclado.

4. CONCLUSÕES

Dentre as principais estradas fabricadas no Brasil, estão as confeccionadas com CBUQ, onde diariamente busca-se a inovação desta tecnologia construtiva realizando novos estudos e técnicas avançadas que apresentam as mais diversas formas de execução, podendo ser utilizado agregado mineral ou agregado reciclado em sua composição, ou alternativas que buscam a implementação de novas técnicas reutilizando agregados oriundos de resíduos perigosos, para a fabricação deste produto justificado mediante a necessidade de busca de alternativas inovadoras para a utilização dos rejeitos ambientais, onde entre estes estão poluentes do meio ambiente obtidos no processo de perfuração de poços petróleo, do tipo cascalho de perfuração de petróleo ou até mesmo a cinza deste subproduto, limitando o uso aos limites estabelecidos na legislação ambiental para o descarte de contaminantes diretamente no meio ambiente.

Verificou-se nos estudos sobre a temática, que os ensaios de granulometria para a mistura devem ser rigorosos, para apresentar características tecnicamente satisfatórias, visando atender as faixas de percentuais retidos e passantes nas peneiras, conforme legislação brasileira disposta na metodologia.

O ensaio de equivalente de areia presente em todos os estudos desta composição, apresenta importância por ser fator determinante em verificar a possibilidade do uso de agregado miúdo com relação aos teores de argila, pois estes afetam diretamente nas resistências do concreto asfáltico confeccionado. Nos ensaios de resistência a compressão, Marshall, verificou-se a aplicabilidade de teores de concreto asfáltico, para obtenção de resistências, atendida em todos os percentuais propostos para o uso do CAP, quando o produto submetido aos esforços de compressão.

Nos testes de resistência a tração por compressão diametral, importante ensaio utilizado na verificação de índices de vazios, parametrizado normativamente, fator determinante na viabilidade técnica, do uso de determinados produtos na composição, desde que atenda todos os parâmetros estabelecidos pela legislação aplicável.

Desta forma, constatou-se que a aplicação de materiais diversos utilizados e ensaiados, apresentados anteriormente aparecem como perspectiva de alternativas para a fabricação do CBUQ agregando valores técnicos, econômicos e ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP N° 19, de 11 de julho de 2005**. ANP, 2005.
- [2] AHMEDZADEA, P.; SENGOZ, B. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. **Journal of Hazardous Materials**, v. 165, p. 300–305, 2009.
- [3] ARAUJO, A. S.; CORIOLANO, A. C.F.; BANDEIRA, R. A. F.; DELGADO, R. C.O.B. Preparation and Compressive Strength Evaluation of Concrete Containing Oil Sludge as Additive, **Materials Science Forum**, v. 930, p. 148-152, 2018.
- [4] ASKELAND, D. R. **Ciencia e ingeniería de los materiales**. Tercera edicion, Thomson editores. Universidade de Missoure-Rolla. 1998.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12052: Solo ou agregado miúdo – Determinação do equivalente de areia – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12948: Materiais para concreto betuminoso usinado a quente**. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001;
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14950: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade Saybolt Furol**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [9] AZZAM, M. O. J.; AL-GHAZAWI, Z.; AL-OTOOM, A. Incorporation of Jordanian oil shale in hot mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2259-2277, 2016.
- [10] Bandeira, R.A.F. **Uso de cascalho de perfuração de poços de petróleo na confecção de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente)**. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Natal, RN, 2019.
- [11] Departamento de Estradas de Rodagem. **Especificação técnica - Concreto asfáltico**. ET-DE-P00/027. São Paulo, DER- 2005.
- [12] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de Ensaio - ME 054/97 – Equivalente de areia**. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

- [13] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Especificação de Material - EM 367/97 – Material de enchimento para misturas betuminosas**. Rio de Janeiro: DNER, 1997.
- [14] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de Ensaio - ME 401/99 – Agregados- determinação do índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante – IDML e sem ligante – IDM**. Rio de Janeiro: DNER, 1999.
- [15] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Especificação de Serviço - ES 031/2006 – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- [16] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- [17] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de implantação básica**. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.
- [18] EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro : EMBRAPA-SPI, 2006.
- [19] KANDHAL, P.S. **Waste Materials in Hot Mix Asphalt - An Overview," Use of Waste Materials in Hot-Mix Asphalt**. STM STP 1193, H. Fred Waller, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993.
- [20] KAREEM, A. I.; NIKRAZ, H.; ASADI, H. Evaluation of the double coated recycled concrete aggregates for hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 172 p. 544-552, 2018.
- [21] LUCENA, A. E. F. L.; RODRIGUES, J. K. G.; FERREIRA, H. C.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, L. F. L. **Caracterização térmica de resíduos de perfuração “onshore”**. 4º PDPETRO, Campinas, SP. 2007.
- [22] MOSS, O. R. L.; BROMMA, C. C. R. **Process and system for production of a warm foam mix asphalt composition**. United States Patent, Patent No.: US 6,846,354 B2. Date of Patent: Jan. 25, 2005.
- [23] PASANDÍN, A. R. ; PÉREZ, I.; OLIVEIRA, J. R.M. ; SILVA, H. M.R.D. ; PEREIRA, P. A.A. Influence of ageing on the properties of bitumen from asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 101, p.165-173, 2015.
- [24] PASANDÍN, A. R.; PÉREZ, I.; RAMÍREZ, A.; CANO, M. M. Moisture damage of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 853-862, 2016.
- [25] PEREZ, I; PASANDIN, A.R. Fatigue performance of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates and waste tire rubber. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 26, 2017.
- [26] Qu, X.; Wang, D.; Wang, L. ; Huang, Y.; Hou, Y.; Oeser, M. The State-of-the-Art Review on Molecular Dynamics Simulation of Asphalt Binder. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, Article ID 4546191, 14 páginas.

- [27] YANG, X. ; YOU, Z.; PERRAM, D.; HAND, D.; AHMED, Z.; WEI, W.; LUO, S. Emission analysis of recycled tire rubber modified asphalt in hot and warm mix conditions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, p. 942-951, 2019.
- [28] ZHANG, C.; SONG, Y; WANG, W; GUO, X; LI, H. The influence of sulfonated asphalt on the mechanical properties and microstructure of oil well cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 438-445, 2017.
- [29] ZHANG, Y.; LUO, X.; LUO, R.; LYTTON, R. L. Crack initiation in asphalt mixtures under external compressive loads. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 94-103, 2014.
- [30] ZHOU, X.; ZHANG, X.; XU, S.; WU, S.; LIU, Q.; FAN, Z. Evaluation of thermo-mechanical properties of graphene/carbon-nanotubes modified asphalt with molecular simulation. **Journal Molecular Simulation**, v. 43, n. 4, p. 312-319, 2017.
- [31] ZOOROB, S.; SUPARMA, L.B. Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). **Cement & Concrete Composites**, v. 22, p. 233-242, 2000.