

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ PARA PAVERS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Sergio Tunis Martins Filho*
Carlos Humberto Martins**

RESUMO: A produção excessiva de resíduos agroindustriais sem uma solução adequada é uma realidade. Inseridas nesse contexto, as Usinas Sucroalcooleiras produzem grandes quantidades de cinzas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), utilizado para co-geração de energia elétrica. Paralelo a isso, o setor da construção civil demanda alta quantidade de materiais cada vez mais escassos e oriundos de processos produtivos com grande geração de gases do efeito estufa, no entanto, sabe-se que o setor demonstra grande potencial para absorver os mais diferentes tipos de resíduos. Nesta pesquisa objetivou-se investigar a potencialidade ambiental através da redução de emissão de CO₂ proporcionada pela utilização de cinzas provenientes da queima do bagaço de cana-de-açúcar como substituto parcial do agregado miúdo (areia natural) para confecção de concreto para *pavers*, uma vez já comprovada sua eficiência, sendo utilizado o Método QE-CO₂, proposto por Costa (2012). A substituição da CBC se mostrou viável ambientalmente, proporcionando ganhos consideráveis de redução da emissão de gases propulsores do efeito estufa.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto; Emissão de CO₂; Resíduo Agroindustrial.

QUANTIFICATION OF CO₂ EMISSIONS FOR PAVERS WITH PARTIAL REPLACEMENT OF SAND BY ASHES FROM SUGAR CANE BAGASSE

ABSTRACT: Excessive production of agro-industrial wastes with no adequate solution is a fact. Sugar and Alcohol Plants produce enormous amounts of ashes from the burning of sugar cane bagasse (SCB) used for the co-generation of electric energy. The civil construction sector demands high amount of materials which are becoming rare and derived from production processes with high rates of gases with greenhouse effects. On the other hand, the sector has a great capacity to absorb different types of wastes. Current research investigates the environmental potential

* Docente Mestre do Departamento de Engenharia Civil na Universidade Estadual de Maringá (UEM), Brasil; E-mail: sergiotunis@hotmail.com

** Docente Doutor do Departamento de Engenharia Civil na Universidade Estadual de Maringá (UEM), Brasil.

through a decrease in CO₂ emissions due to ashes derived from the burning of sugar cane bagasse as a partial replacement of small aggregates (sand) in the manufacture of concrete for pavers. Its efficiency has already been proved with QE-CO₂ method proposed by Costa (2012). Replacement of SCB was environmentally viable and provided gains in greenhouse gas reduction.

KEY WORDS: Concrete; CO₂ Emissions; Agroindustrial Wastes.

INTRODUÇÃO

Este estudo estima o benefício ambiental proporcionado pela utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em concretos de cimento Portland, sendo uma área de grande importância diante de um cenário global com crescentes problemas ambientais, buscando, assim, através da utilização de resíduos um meio ambiente mais sustentável, com ganhos energéticos e de créditos de carbono.

No Brasil, destaca-se o plantio de cana-de-açúcar, que representa uma das principais atividades agrícolas do país, ocupando uma área de aproximadamente 10 milhões de hectares (UNICA, 2012), com uma produção que vem aumentando desde 2000. Entre os anos de 2013/2014 ocorreu uma colheita de 653,52 milhões de toneladas de cana (UNICA, 2014), o que coloca o país em destaque no setor agroindustrial. Visando reduzir os impactos ambientais, as emissões de gases do efeito estufa e melhorar as propriedades dos materiais da construção civil, merece destaque no Brasil as pesquisas que estudam a incorporação de resíduos agroindustriais, motivadas principalmente em razão do grande montante gerado anualmente, pela falta de um destino viável e principalmente pelos resultados positivos obtidos em estudos.

Como resultado final do processo produtivo das Usinas Sucroalcooleiras, grande quantidade de cinza proveniente da queima do bagaço de cana (CBC) é gerada no Brasil, em torno de quatro milhões de toneladas por ano, (aproximadamente 11 mil toneladas/dia) (UNICA, 2011). A queima do bagaço é destinada à geração de energia, através do vapor produzido nas caldeiras, o qual é utilizado para autossuficiência do setor em termos de suprimento energético e também o excedente

é comercializado para as companhias de energia elétrica. Em decorrência do avanço do setor na geração de energia, álcool e açúcar, a produção vem se intensificado, e consequentemente a geração de cinza.

Geralmente estas cinzas são utilizadas como adubo nas plantações, mas, segundo pesquisas realizadas pela EMBRAPA, estas não possuem nutrientes minerais adequados para essa finalidade, pois há uma séria deficiência em potássio, principal nutriente para o plantio de cana-de-açúcar (LIMA et al., 2012). A indústria da cana-de-açúcar ainda está buscando soluções para eliminar os resíduos gerados em seu processo produtivo, sabendo que a cinza remanescente após a queima do bagaço é o último resíduo gerado pela cadeia produtiva e poderia ter um fim mais nobre devido às suas características físicas e químicas.

Estudos apontam que as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (MARTIRENA HERNÁNDEZ et al., 1998; SINGH; SINGH; RAI, 2000; PAYÁ et al., 2002 apud CORDEIRO, 2006), em virtude da presença preponderante de sílica na composição química, apresentam-se como matérias-primas potenciais na produção de cimentos compostos e/ou de aditivos minerais para pastas, argamassas e concretos. Essas características resultam em benefícios na reologia, na resistência, na durabilidade e outros fatores em decorrência do seu emprego (MALHOTRA; MEHTA, 1996; NEVILLE, 1997; MASSAZZA, 1998; SABIR; WILD; BAI, 2001 apud CORDEIRO, 2006). Quando a cinza é uma alternativa de substituição da areia natural, além do ganho de redução de emissão de CO₂, que será relatado no trabalho, há uma grande importância, pois a diminuição da extração de areia natural de forma irregular e em grandes quantidades evita a degradação do ecossistema local, como o assoreamento de rios e o esgotamento da matéria-prima não renovável.

No Brasil, há várias diretrizes legais que incentivam o reúso de resíduos e ao mesmo tempo punem atitudes que levem a qualquer tipo de dano ambiental envolvendo os mais diferentes setores produtivos. Foi aprovada a Lei n° 12.305, de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), relatando uma tendência mundial de não geração, no reaproveitamento, na reutilização e na reciclagem dos resíduos, e dispõe, também, sobre a gestão integrada e o gerenciamento destes, responsabilizando tanto os geradores quanto o poder público (ALTOÉ, 2012).

Martins e Altoé (2015) verificaram a potencialidade da utilização da CBC

na substituição do agregado miúdo na confecção de blocos de concreto para pavimentação (*pavers*), sujeitos a solicitações leves, com o mínimo de 35 MPa. Para atingir este objetivo os autores adotaram as etapas de caracterização dos resíduos a serem utilizados na confecção dos *pavers* com diferentes teores de substituição parcial de agregado miúdo e determinação das principais características destes. O estudo demonstrou que a CBC é um resíduo viável para a substituição parcial do agregado miúdo na fabricação dos *pavers*, por apresentar uma melhora expressiva das características analisadas (resistência à compressão, absorção e abrasão) em relação aos fabricados sem a substituição parcial da areia pela CBC, com a fração de 25% de substituição da areia natural pela CBC. Vale destacar que esse teor proporcionou uma resistência à compressão aos 28 dias de 39,09 MPa, com 20% a mais de resistência que o traço de referência de 31,23 MPa.

Através do método de quantificação proposto por Costa (2012), será elaborada a estimativa da emissão de CO₂ para o teor de substituição apresentado por Martins e Altoé (2015), levando em conta a realidade do município de Maringá (PR), onde o concreto para os *pavers* foi fabricado.

A fórmula geral do Método QE-CO₂ é adaptada para cada material de construção com o objetivo de levar em consideração as particularidades dos materiais, de seus sistemas produtivos e da qualidade dos dados disponíveis. Dessa forma, o Método QE-CO₂ é subdividido em três níveis de precisão de estimativas de CO₂ geradas por cada material analisado: Nível Básico, Nível Intermediário e Nível Avançado. O Nível Básico é baseado em dados médios, a nível nacional, produzindo estimativas de emissões de CO₂ menos precisas enquanto o Nível Avançado, por empregar dados específicos das unidades fabris sobre os processos produtivos, é o método mais preciso. Dentre os três níveis de precisão de estimativas do método, o nível utilizado foi o Nível Básico, onde estão disponíveis valores médios sobre consumo de energia, transporte e/ou composição química dos materiais (COSTA, 2012).

Em escala global, os maiores potenciais de redução nas emissões de gases do efeito estufa estão localizados nas indústrias siderúrgicas, de cimento, celulose e papel. O setor final de utilização dos produtos que possui maior potencial econômico de reduções das emissões são as edificações, quando nestas forem utilizadas tecnologias e práticas sustentáveis o meio ambiente terá um grande ganho

ambiental (IPCC, 2007b apud COSTA, 2012).

Vale destacar que a implementação de medidas sustentáveis permite obter selos ambientais para certificação de produtos da construção civil que menos agredem o meio ambiente. Estes selos permitem a identificação de produtos menos impactantes ambientalmente, cada um com sua abrangência, como exemplo, os selos: *Blue Angel*, *EcoLogo*, *Eco Mark*, *Green Seal*, *EU-EcoLabel*, *Eco-Leaf*, BRE Global, Rótulo Ecológico ABNT e Selo Ecológico Falcão Bauer (COSTA, 2012).

Segundo Costa (2012), além dos selos para produtos, há os rótulos ambientais para edificações que objetivam promover redução dos impactos ambientais gerados pela construção, uso e demolição por meio de diretrizes e requisitos mínimos de eficiência energética, de qualidade e de conteúdo de materiais reciclados. Alguns dos rótulos utilizados são os LEED, AQUA, Casa Azul Caixa e BREEAM.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para a confecção dos *pavers* os autores, Martins e Altoé (2015), utilizaram os materiais citados a seguir, e suas características, como local de retirada, tipo de material, quantidade utilizada e tipo de transporte serão considerados respectivamente para a obtenção do fator de emissão, considerando dados obtidos em Altoé (2012).

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP V-ARI da marca Cauê, sendo este o mais utilizado pelos fabricantes de artefatos de cimento, à devido sua rápida capacidade de desforma, atingindo alta resistência inicial. As características obtidas junto ao fabricante atendem às normas brasileiras com relação ao limite mínimo de qualidade (MARTINS; ALTOÉ, 2015).

O agregado miúdo utilizado foi a areia média proveniente de fornecedores da região de Maringá (PR), sendo estes de origem de quartzosa (MARTINS; ALTOÉ, 2015). Sabe-se que a areia natural utilizada em nossa região é, em sua maioria, obtida pelas mineradoras localizadas no Rio Paraná, fronteira do Estado do Paraná com

Mato Grosso do Sul, podendo ser determinada a distância média para transportá-la.

O agregado graúdo utilizado na confecção dos blocos é proveniente da região de Maringá (PR), o qual é definido como brita zero granítica, com diâmetro entre 4,8 e 9,5 mm, conhecido como Pedrisco (MARTINS; ALTOÉ, 2015). As mineradoras que demandam o agregado para a cidade ficam próximas ao centro urbano.

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizada na pesquisa é proveniente da usina termoeétrica da COCAMAR - Cooperativa Agroindustrial localizada na cidade de Maringá (PR), com temperatura de queima de 850 °C (MARTINS; ALTOÉ, 2015).

2.2 MÉTODO

Será estimada a quantidade de emissão de CO₂ na confecção de concreto de cimento Portland para um traço de referência utilizado por Martins e Altoé (2015) e, em uma segunda análise, a redução da emissão para o concreto com o teor de substituição do agregado miúdo (areia natural) pela CBC. Assim, avaliaremos o ganho ambiental em decorrência dessa substituição e será criado, deste modo, um procedimento de avaliação para outros teores de substituição, com situações que envolvam o uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na confecção de concreto com as mesmas características, como o local de produção, origem da matéria-prima, tipo de material e o transporte.

De acordo com Costa (2012) não havia um método integrado, adaptado à realidade brasileira, capaz de quantificar as emissões de CO₂ geradas pelas etapas de extração de matérias-primas, produção e transporte de materiais utilizados na construção civil. Então, através de metodologias internacionais (IPCC, UNFCCC, GHG Potocol e outros), e pesquisas científicas, este autor propôs um Método para a Quantificação das Emissões de CO₂ (Método QE-CO₂), adaptado à realidade brasileira.

A fórmula geral do Método QE-CO₂, Equação 1, consiste na multiplicação da quantidade de produto utilizada na obra pelo fator de perda e pelo somatório das emissões geradas pelo consumo de energia e pelo transporte.

$$Emissões_{MT1,j} = QT_j \cdot FP_j \cdot (Emissões_{TR1,i} + Emissões_{EN1,i}) \quad (1)$$

onde:

$Emissões_{MT1,j}$ = emissões de CO₂ devido à utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO₂;

QT_j = quantidade de produto j necessária na obra, em toneladas;

FP_j = fator de perda do produto j , adimensional;

$Emissões_{EN1,i}$ = emissões de CO₂ devido ao consumo de energia i para extração e processamento do produto j necessário na edificação, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto j ;

$Emissões_{TR1,i}$ = emissões de CO₂ devido ao consumo de energia i para o transporte de matérias-primas e do produto j para a edificação, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto j .

$$Emissões_{TR1,i} = km. CO_t. FEC_i \quad (2)$$

sendo:

km = distância percorrida pelo veículo no transporte de matérias e produto acabado (somatório da distância de ida mais a de volta), em km (dados obtidos pelo *Google Maps*);

CO_t = fator de consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em L/t/km;

FEC_i = fator de emissão corrigido da energia i , em t CO₂ / L.

Os indicadores globais de perdas de materiais no canteiro de obra (em %) são fornecidos por alguns pesquisadores citados por Costa (2012) e vale ressaltar que será utilizado o fator final de perda para o concreto, produto final da mistura, considerando o valor mínimo de 6% (SOUZA et al.,1998 apud COSTA, 2012), e não serão considerados os fatores de perda de cada material isoladamente, pois estes (areia e brita) objetivam a confecção do concreto e não o seu uso geral no canteiro de obra.

Costa (2012) utilizou o método para uma situação local, com dados relacionados à cidade do Rio de Janeiro (RJ); dentre os fatores, os que forem peculiares da localização serão adaptados, com informações para a realidade de

Maringá (PR), onde ocorre o presente estudo.

Nos cálculos abaixo estão descritos a emissão de CO₂ para cada material constituinte da mistura (agregado miúdo, agregado graúdo, cinza do bagaço e cimento Portland), assim, após serem calculados será permitido obter o Fator de Emissão final para o concreto produzido e para o concreto com a substituição.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o transporte de agregados miúdos foi considerado caminhão semipesado (17t - 26t) e uma distância média entre os locais dos principais extratores até o centro de Maringá, de aproximadamente 370 km, já considerando o trajeto de ida e volta, caso os caminhões retornem vazios. Estas mineradoras estão em sua maioria nas margens do Rio Paraná (PR), divisa com o Estado de MS. A Tabela 1 registra as emissões relacionadas ao transporte. Vale destacar que, caso o sistema de transporte mude, a distância, o tipo de veículo, até mesmo a marca do veículo, basta substituir os coeficientes apresentados por Costa. Para caminhões semipesados foi adotado 0,0196l/t/km de acordo com Truk (2004) apud Costa (2012). De acordo com a Equação 2 obtém-se o fator.

Tabela 1. Emissões de CO₂ devido ao transporte do agregado miúdo

| | |
|---|--|
| Distância percorrida (km) | 370 |
| Caminhão semipesado (17t - 26t) (l/t/km) | 0,0196 |
| Óleo Diesel (t CO ₂ / L) (Costa, 2012) | 0,0032 |
| <i>Emissões</i>_{TR1,i} = | 0,0232 t CO₂ / tonelada de produto |

$$Emissões_{TR1,i} = km. CO_t. FEC_i \quad (3)$$

sendo:

*Emissões*_{TR1,i} = emissões de CO₂ em razão do transporte, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto acabado;

km = distância percorrida pelo veículo no transporte de matérias e produto acabado (somatório da distância de ida mais a de volta), em km (dados obtidos pelo *Google Maps*);

COt = fator de consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em L/t/km;

FECi = fator de emissão corrigido da energia i, em t CO₂ / L.

Para produção de uma tonelada de agregado miúdo, a Tabela 2 reúne os itens que somam a quantidade de toneladas de CO₂ que são emitidas, levando em conta o transporte, já calculado, o processo de extração e processamento adotados. De acordo com Venta (1998) apud Costa (2012) a energia necessária para a extração e processamento de agregados miúdos emite 0,0722 (t CO₂ /t de agregado).

Tabela 2. Fator de emissão de CO₂ para agregado miúdo

| Identificação | Valor |
|---|---------------|
| Fator de emissão do uso de energia (t CO ₂ /t de agregado) | 0,0722 |
| Fator de emissão do transporte (t CO ₂ /t de agregado) | 0,0232 |
| Fator de emissão total de agregado miúdo (t CO₂ /t de agregado) | 0,0954 |

Para o transporte de agregado graúdo por caminhão semipesado, estima-se uma distância média entre os locais dos principais extratores até o centro de Maringá, de aproximadamente 22 km, e já considerando o trajeto de ida e volta caso os caminhões retornem vazios. As principais mineradoras que abastecem a cidade de Maringá estão bem próximas ao meio urbano. De acordo com a Equação 3 obtém-se o fator.

Tabela 3. Emissões de CO₂ devido ao transporte de agregado graúdo

| | |
|--|---|
| Distância percorrida (km) | 22 |
| Caminhão semipesado (17t - 26t) (l/t/km) | 0,0196 |
| Óleo Diesel (tCO ₂ / L) | 0,0032 |
| Emissões_{TR1,i} = | 0,0014 tCO₂ / tonelada de produto |

$$Emissões_{TR1,i} = km \cdot CO_t \cdot FEC_i \quad (4)$$

sendo:

$Emissões_{TR1,i}$ = emissões de CO₂ em razão do transporte, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto acabado;

km = distância percorrida pelo veículo no transporte de matérias e produto acabado (somatório da distância de ida mais a de volta), em km (dados obtidos pelo *Google Maps*);

CO_t = fator de consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em L/t/km;

FEC_i = fator de emissão corrigido da energia i, em tCO₂ / L.

Para produção de uma tonelada de agregado graúdo, a Tabela 4 reúne os itens que somam a quantidade de toneladas de CO₂ que são emitidas, levando em conta o transporte, já calculado, o processo de extração e processamento adotados. De acordo com Venta (1998) apud Costa (2012) a energia necessária para a extração e processamento de agregados graúdos emite 0,0719 (t CO₂ / t de agregado).

Tabela 4. Fator de emissão de CO₂ para agregado graúdo

| Identificação | Valor |
|---|--------|
| Fator de emissão do uso de energia (t CO ₂ / t de agregado) | 0,0719 |
| Fator de emissão do transporte (t CO ₂ / t de agregado) | 0,0014 |
| Fator de emissão total de agregado graúdo (t CO ₂ / t de agregado) | 0,0733 |

Para o transporte de cimento Portland da marca Cauê por caminhão semipesado sabe-se que a distância que envolve todo o processo de logística é de 557 km, da unidade produtora em Apiaí (SP) até a revenda em Cambé (PR), e até chegar ao município de Maringá (PR). Caso os caminhões retornem vazios, deve-se dobrar a distância total percorrida, totalizando 1114 km. De acordo com a Equação 4, obtém-se o fator.

Tabela 5. Emissões de CO₂ devido ao transporte de matérias-primas e cimento

| | |
|--|--|
| Distância percorrida (km) | 1114 |
| Caminhão semipesado (17t - 26t) (l/t/km) | 0,0196 |
| Óleo Diesel (tCO ₂ / L) | 0,0032 |
| <i>Emissões</i>_{TR1,i} = | 0,06987t CO₂ / tonelada de produto |

$$Emissões_{TR1,i} = km. CO_t. FEC_i \quad (5)$$

sendo:

*Emissões*_{TR1,i} = emissões de CO₂ em razão do transporte, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto acabado;

km = distância percorrida pelo veículo no transporte de matérias e produto acabado (somatório da distância de ida mais a de volta), em km (dados obtidos pelo *Google Maps*);

CO_t = fator de consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em L/t/km;

FEC_i = fator de emissão corrigido da energia i, em t CO₂/L.

Para produção de cimento Portland, a Tabela 6 reúne os itens que somam a quantidade de toneladas de CO₂ que são emitidas pela utilização de uma tonelada de cimento, levando em conta o transporte, já calculado, o processo de extração e processamento adotados. De acordo com Costa (2012) a energia necessária para a extração e processamento do cimento Portland emite 0,2959 (tCO₂ / t de cimento) e para a produção do *clinker* de 0,3322 (t CO₂ / t de cimento).

Tabela 6. Fator de emissão de CO₂ do setor cimentício

| Identificação | Valor |
|--|---------------|
| Fator de emissão do uso de energia (t CO ₂ / t de cimento) | 0,2959 |
| Fator de emissão do transporte (t CO ₂ / t de cimento) | 0,06987 |
| Fator de emissão do <i>clinker</i> (t CO ₂ / t de cimento) | 0,3322 |
| Fator de emissão total do setor cimentício (t CO₂ / t de cimento) | 0,6979 |

O total de emissão do setor cimentício foi de 0,6979 t CO₂ para cada tonelada de cimento utilizado para a produção do concreto, envolvendo a realidade de Maringá (PR). nota-se que a emissão de CO₂ preponderante é a relacionada ao uso de energia para extração e processamento do cimento Portland e para a produção do *clinker*, sendo o fator de emissão do transporte pouco representativo em relação ao total.

A única etapa do processo produtivo da cinza do bagaço que emite CO₂ compreende o transporte até o local em que ocorrerá a concretagem, visto que a cinza residual utilizada é *in natura*, não ocorrendo nenhum tratamento prévio que gaste energia e emita CO₂. As atividades de moagem da cana-de-açúcar e da queima do bagaço para geração de energia foram desconsideradas para cálculo do fator de emissão de CO₂ (FEP) da cinza, uma vez que são atividades realizadas independentemente do aproveitamento da cinza em concretos.

O transporte é feito em caminhão semipesado, estima-se uma distância média de 16,8 km entre a usina termoeletrica da COCAMAR - Cooperativa Agroindustrial localizada na cidade de Maringá (PR) até a Universidade Estadual de Maringá (UEM), local onde foi feita a dosagem, e já considerando o trajeto de ida e volta caso os caminhões retornem vazios. De acordo com a Equação 5, obtém-se o fator.

Tabela 7. Emissões de CO₂ devido ao transporte de cinza

| | |
|--|--|
| Distância percorrida (km) | 16,8 |
| Caminhão semipesado (17t - 26t) (l/t/km) | 0,0196 |
| Óleo Diesel (t CO ₂ /L) | 0,0032 |
| $Emissões_{TR1,i} =$ | 0,001053 t CO₂ / tonelada de produto |

$$Emissões_{TR1,i} = km. CO_t. FEC_i \quad (6)$$

sendo:

$Emissões_{TR1,i} = Emissões_{TR1,i}$ = emissões de CO₂ em razão do transporte, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto acabado;

km = distância percorrida pelo veículo no transporte de matérias e produto acabado (somatório da distância de ida mais a de volta), em km (dados obtidos pelo *Google Maps*);

COt = fator de consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em L/t/km;

FECi = fator de emissão corrigido da energia i, em t CO₂/L.

Neste caso, para o setor da construção civil obter a cinza, apenas a emissão do uso do transporte é considerada, conforme mostra a Tabela 8. Caso a cinza venha a sofrer um tratamento prévio, como calcinação ou moagem, pode-se acrescentar o equivalente de CO₂ pelo gasto de energia que seria gerado pelos equipamentos.

Tabela 8 Fator de emissão de CO₂ para cinza

| Identificação | Valor |
|---|----------|
| Fator de emissão do uso de energia (t CO ₂ /t de cinza) | 0 |
| Fator de emissão do transporte (t CO ₂ /t de cinza) | 0,001053 |
| Fator de emissão total de agregado graúdo (t CO ₂ /t de cinza) | 0,001053 |

Segundo Costa (2012) o fator de emissão para concreto é calculado levando em consideração a soma das emissões totais geradas pelos processos de extração, processamento e transporte das matérias-primas, e para determinar o fator de emissão do produto acabado é necessário estabelecer as quantidades (traços em peso ou volume) dos insumos utilizados (quantidade de cimento e agregados empregados), sendo o fator de emissão o resultado da multiplicação do fator de emissão de cada insumo pela respectiva quantidade empregada.

Com os valores de emissão de CO₂ dos agregados miúdos, agregados graúdos, cimento e cinza é possível determinar o FEP do concreto a partir do consumo de materiais para produzir 1,00 m³ de concreto. A Tabela 9 apresenta os dados utilizados para a produção do concreto de referência, e quando os ensaios forem concluídos e se souber qual a melhor incorporação de cinza no concreto será

avaliada a redução da emissão de CO₂ e o ganho em créditos de carbono pela prática sustentável.

Tabela 9. Fatores de emissão de carbono para o estudo de caso

| Identificação | Unidade | Fator |
|-------------------|------------------------------|----------|
| Agregados graúdos | t CO ₂ /t produto | 0,0733 |
| Agregados miúdos | t CO ₂ /t produto | 0,0954 |
| Cimento | t CO ₂ /t produto | 0,6979 |
| Cinza | t CO ₂ /t produto | 0,001053 |

Considerando o traço de referência utilizado para confecção do concreto seco (1:4), com cimento CP V-ARI, e os agregados miúdo e graúdo, notam-se na Tabela 10 as massas dos materiais e o correspondente fator de emissão para o m³ de concreto sem o fator de perda e com o fator de perda (FP) devido sua utilização no canteiro de obra, que corresponde a 6%. O FEP é obtido com a Equação 6.

Tabela 10. Fator de emissão de CO₂ do concreto utilizado

| Identificação | Cimento (kg) | Areia(kg) | Brita(kg) | Cinza(kg) | FEP do Concreto (t CO ₂ /m ³) | FEP do Concreto com FP (t CO ₂ /m ³) |
|------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|--|---|
| Concreto de Referência | 437,03 | 1158,13 | 589,99 | - | 0,459 | 0,486 |

$$FEP_{CO} = \frac{FEP_{Ag,M} \cdot Q_{Ag,M} + FEP_{Ag,G} \cdot Q_{Ag,G} + FEP_{Cim} \cdot Q_{Cim} + FEP_{Cinza} \cdot Q_{Cinza}}{1000} \quad (7)$$

sendo:

FEP_{CO} = fator de emissão de CO₂ devido ao concreto;

$FEP_{Ag,M}$ = fator de emissão de CO₂ devido aos agregados miúdos;

$Q_{Ag,M}$ = quantidade de agregados miúdos presentes no concreto, em kg;

$FEP_{Ag,G}$ = fator de emissão de CO₂ devido aos agregados graúdos;

$Q_{Ag,G}$ = quantidade de agregados graúdos presentes no concreto, em kg;

FEP_{Cim} = fator de emissão de CO_2 devido ao cimento;

Q_{Cim} = quantidade de cimento presente no concreto, em kg;

FEP_{Cinza} = fator de emissão de CO_2 devido à cinza do bagaço da cana;

Q_{Cinza} = quantidade de cinza do bagaço da cana presente no concreto, em kg.

Assim, com teor de substituição de 25% da cinza pesada pela areia natural, o fator de emissão de CO_2 é expresso na tabela abaixo.

Tabela 11. Fator de emissão de CO_2 do concreto com cinza

| Identificação | Cimento (kg) | Areia (kg) | Brita (kg) | Cinza (kg) | FEP do Concreto (tCO_2 / m^3) | FEP do Concreto com FP ($t CO_2 / m^3$) |
|------------------------|--------------|------------|------------|------------|-----------------------------------|---|
| Concreto de Referência | 437,00 | 1158,13 | 589,99 | 289,53 | 0,431 | 0,456 |

A Tabela 12 retrata o ganho de reduções de CO_2 proporcionado pela substituição da areia natural pela cinza.

Tabela 12. Análise da Redução da emissão de CO_2 para o concreto com cinza

| Identificação | FEP do Concreto sem FP (CO_2 / m^3) | FEP do Concreto com FP (CO_2 / m^3) | Redução da emissão de CO_2 com FP |
|-------------------------|---|---|-------------------------------------|
| Concreto de Referência | 0,459 | 0,489 | 6,71% |
| Concreto com 25% de CBC | 0,431 | 0,456 | |

Nota-se uma redução de 0,033 t de CO_2 por m^3 de concreto, considerando o FP, ou 6,71% a menos de emissão.

Para efeito explicativo do potencial de utilização da cinza do bagaço de cana, considera-se que o fator de emissão do concreto para *paver*, nas condições apresentadas para a cidade de Maringá (PR), seja o mesmo que para outros concretos e levando em conta uma pesquisa divulgada pela ABCP, durante o *Concrete Show 2013*,

que projeta a produção de concreto dosado em central atingirá 72,3 milhões de m³ em 2017, a substituição pela cinza proporcionará uma redução de aproximadamente 2,38 milhões de toneladas de CO₂, quantidade relevante e de grande contribuição ambiental para redução dos problemas crescentes do aquecimento global.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição da CBC pela areia natural, além de melhorar seu desempenho físico, contribui para uma redução da emissão de CO₂ da ordem de 6,71%, promovendo um desenvolvimento sustentável, com ganhos de créditos de carbono. É de grande importância a redução da extração de recursos naturais como a areia natural, evitando problemas no ecossistema natural, e a utilização da CBC como agregado na confecção de concreto dá um destino mais nobre a este, do que simplesmente seu lançamento no solo. Vale destacar que a região de Maringá (PR) tem potencial de fornecimento de cinza devido ao grande número de Usinas Sucroalcooleiras e que para o setor da construção civil passar a incorporar a cinza, apenas é considerada a emissão do uso do transporte, visto que sua geração como resíduo vai acontecer independente do seu aproveitamento.

5 AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido na forma de bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e**

da casca de arroz como aditivos minerais em concreto. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil.** 2012. 190f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change.** Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Reino Unido e Nova York: Cambridge University Press, 2007b. 851p.

LIMA, S. A.; HUMBERTO, V.; SALES, A.; NETO, V. F. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. **Construction & Building Materials**, v. 35, p. 829-837, 2012.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials.** Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996. 191p.

MARTINS, C. H.; ALTOÉ, S. P. S. Avaliação da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na confecção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 8, p. 39-54, 2015.

MARTIRENA-HERNÁNDEZ, J. F. M.; MIDDEENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, p. 1525-1536, 1998.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements.** In: HEWLETT, P. C. (Ed.). *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4. ed. New York: J. Wiley, 1998. p. 471-631.

NEVILLE, A. M. 1997. *Propriedades do concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini, 828p.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; DÍAZ-PINZÓN, L.; ORDÓÑEZ, L. M. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 77, n. 1, p.

321-325, 2002.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 2, p. 441-454, 2001.

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1485-1488, 2000.

ÚNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Bagaco de cana pode ganhar valor substituindo areia na construção civil**. 2011. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/33630022920327850689/bagaco-de-cana-pode-ganhar-valor-substituindo-areia-na-construcao-civil>>. Acesso em: 09 mar. 2015.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Histórico da produção e moagem**. 2014. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php>> Acesso em: 22 mar. 2015.

ÚNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Histórico do setor-Linha do tempo**. 2012. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/linhadotempo>> Acesso em: 22 mar. 2015.

Recebido: 27 de julho de 2015

Aceito: 22 de agosto de 2015