

# AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTO DE CONCRETO DRENANTE CONSIDERANDO DIFERENTES UNIDADES FUNCIONAIS

*LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT CONSIDERING DIFFERENT FUNCTIONAL UNITS*

Lucas Rosse Caldas, M.Sc. (UnB);  
Diana Nascimento Lins (UnB);  
Rosa Maria Sposto, Dra. (UnB)

## Palavras Chave

ACV; Concreto Drenante; Unidade Funcional

## KeyWords

LCA; Pervious Concrete; Functional Unit

## RESUMO

A utilização de pavimentos drenantes como forma de melhorar problemas referentes a drenagem urbana tem se difundido no Brasil. Neste contexto, o presente estudo comparou dois pavimentos de concreto, um convencional e outro drenante, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Foram coletados dados primários de uma usina de concreto da região do Distrito Federal e utilizado como estudo de caso o estacionamento do Estádio Nacional de Brasília, considerando as etapas de produção, transporte e manutenção dos pavimentos ao longo de seu ciclo de vida. Foram adotadas duas unidades funcionais, sendo que uma considerou os efeitos de drenagem proporcionados pelo pavimento drenante. Na primeira unidade funcional (em m<sup>3</sup> de concreto produzido), o pavimento de concreto drenante apresentou maiores impactos ambientais que o pavimento de concreto convencional, devido principalmente a seu maior consumo de cimento e sua menor vida útil. No entanto, observou-se que quando o efeito da drenagem é considerado, em termos da unidade funcional, o pavimento de concreto drenante apresenta um melhor desempenho ambiental para todas as categorias de impactos ambientais avaliadas. Conclui-se a importância de se escolher uma unidade funcional que retrate o desempenho dos materiais avaliados em um estudo de ACV.

## ABSTRACT

*The use of pervious concrete as a way to improve urban drainage problems have been spread in Brazil. In this context, this paper compared two concrete pavements, one conventional and other pervious, using the Life Cycle Assessment (LCA) approach. Primary data was collected from a concrete plant in the region and a case study was used in the parking lot of the Estádio Nacional de Brasília, considering the stages of production, transportation and maintenance of pavements throughout their life cycle. Two functional units were adopted, one of them considering the drainage effects provided by the pervious pavement. In the first functional unit (in m<sup>3</sup> of concrete produced), the pervious concrete pavement presented greater environmental impacts than the conventional concrete pavement, mainly due to its higher consumption of cement and its shorter useful life. However, it was observed that when the drainage effect is considered, in terms of the functional unit, the results show that the pervious pavement presents a better environmental performance for all environmental impact categories evaluated. In conclusion, it can be seen the importance of the choice of a functional unit that represents the performance of the materials evaluated in a LCA study.*

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

A drenagem das águas pluviais urbanas pode ser considerada um dos principais desafios das cidades brasileiras, tendo em vista a possibilidade de ocorrer inundações com degradação do ambiente e riscos à saúde humana. A crescente taxa de urbanização tem levado a essa problemática, considerando que a água que deveria infiltrar no solo perde esta capacidade em locais de baixa permeabilidade como calçadas, vias públicas, estacionamentos e áreas construídas.

Lins et al. (2016) salientam que esses fatores foram ainda mais evidenciados no Distrito Federal, devido principalmente a Copa do Mundo de 2014 que trouxe a expansão do Aeroporto de Brasília e o Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha, visando a melhoria da infraestrutura da capital federal. Nessas obras foram consumidos consideráveis volumes de concreto, com ocupação de extensas áreas, contribuindo para a redução da permeabilidade nesses locais.

Uma das alternativas que vem sendo pesquisada para a mitigação do problema de drenagem urbana é o desenvolvimento de pavimentos, chamados de pavimentos drenantes ou permeáveis. Esses pavimentos possibilitam a percolação de águas através de sua estrutura, permitindo a recondução da água às redes de drenagem, ou promovendo o reabastecimento dos aquíferos subterrâneos, resultando na diminuição do escoamento superficial, enxurradas e riscos de inundações. O conteúdo vazio na estrutura desse tipo de concreto possibilita a percolação da água, no entanto, de forma exagerada levará a uma baixa resistência do pavimento, havendo a necessidade de um equilíbrio entre resistência e permeabilidade (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016).

Virgiliis (2009) aponta que pavimentos utilizando concretos drenantes tiveram seu início na França, no final da década de 40. No entanto, só passou a ser estudado de forma mais aprofundada e aplicado em pequena escala no início dos anos 70, abrangendo diferentes países como Suécia, Estados Unidos, Japão e França. No Brasil, os estudos relacionados a esse novo material passaram a ser mais difundidos a partir de 2007, diante da busca por soluções de problemas de drenagem urbana nas cidades brasileiras.

Rodrigues Mariano (2014) aponta as desvantagens do concreto permeável quanto à durabilidade e manutenção, que precisam ser considerados no momento de escolha de qual material a ser adotado. De acordo

com o autor, esse material deve ser poroso, por isso sua composição se baseia na utilização de agregados graúdos, compondo uma granulometria de agregado praticamente uniforme e pasta de cimento. Devido a essa composição, os poros estão propensos a sofrer o processo de colmatação e tamponamento (entupimento), principalmente na superfície do pavimento, no decorrer dos anos, o que leva a um maior número de substituição desses pavimentos.

A utilização do concreto permeável para pavimentos apresenta algumas vantagens quando comparada à utilização do concreto convencional. No entanto, no que diz respeito a impactos ambientais, pavimentos de concreto drenante apresentam três importantes fatores que podem prejudicar o seu desempenho ambiental, sendo eles: o elevado consumo de cimento, a menor produtividade de transporte nos caminhões betoneira e a menor vida útil (LINS et al., 2016).

Os pavimentos de concreto drenante devem garantir o fator de permeabilidade estabelecido pela norma, e isso ocorre em função dos vazios existentes no interior desse material, resultantes de uma granulometria graúda e uniforme. No entanto, para que todos os requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015), sejam atingidos, relacionados a permeabilidade e resistência à compressão, o concreto drenante necessita de um maior consumo de cimento quando comparado a um concreto convencional.

Outro problema evidenciado nos concretos drenantes é sua baixa relação água/cimento, e o fato de não apresentarem boa manutenibilidade no estado plástico, perdendo suas características trabaláveis em um curto período de tempo, conforme observado nas práticas realizadas pela usina dosadora de concreto que será citada posteriormente. Em virtude dessas características, segundo informações da usina pesquisada, a produtividade quanto ao transporte do concreto usinado drenante em caminhões betoneira se torna mais baixa, pois para que o concreto tenha tempo suficiente de aplicação no local desejado, sem que haja perda do material, o transporte deve ser feito em média com 3 m<sup>3</sup> por caminhão betoneira, enquanto no caso do concreto convencional, 8 m<sup>3</sup> podem ser transportados sem perdas na aplicação.

Neste contexto, o presente estudo comparou os impactos ambientais de dois tipos de pavimentos de concreto, sendo um convencional (CC) e outro drenante (CD) aplicados ao Estádio Nacional de Brasília, utilizando como ferramenta a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) considerando duas unidades funcionais.

## 1.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao concreto e seus constituintes

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido apontada como uma das metodologias de avaliação de impactos ambientais mais aceitas internacionalmente, podendo ser aplicada à qualquer atividade, processo ou produto, inclusive aqueles no âmbito da construção civil (CABEZA et al., 2014; CHAU et al., 2015).

A aplicação da ACV na avaliação e desenvolvimento de misturas de concretos também tem sido frequentemente observada na literatura, utilizando adições minerais para a substituição do cimento, como pode ser observado nos estudos desenvolvidos por Celik et al. (2015), Gursel et al. (2016) e Teixeira et al. (2016). Todos esses estudos concluíram que uso de adições minerais em substituição ao cimento é benéfica do ponto de vista ambiental, além de trazer ganhos de resistência mecânica e durabilidade. Van Den Heede e De Belie (2012) trazem uma revisão da literatura sobre a aplicação da ACV a concretos, discutindo metodologias e premissas importantes para o estudo desse material. Portal et al. (2015), Yin et al. (2016) compararam também por meio da ACV diferentes reforços para estruturas de concreto em substituição ao aço, mostrando benefícios ambientais. Randl et al. (2016) discutem a importância de projetos de estruturas de alto desempenho (maior resistência da estrutura) a fim de diminuir a massa e espessura das estruturas, permitindo estruturas mais esbeltas, resultando na diminuição dos impactos ambientais globais. Turk et al. (2015), Serres, Braymand e Feugeas (2016) aplicaram a ACV comparando concretos com utilização de agregados reciclados, também mostrando ganhos ambientais frente aos materiais convencionais.

No Brasil, também tem crescido estudos que aplicaram a ACV em cimentos e concretos. Fairbairn et al. (2012) quantificaram a redução das emissões de CO<sub>2</sub> com a utilização de cinzas de bagaço de cana em substituição ao clínquer Portland. Oliveira, Silva e Silva. (2013) avaliaram diferentes indicadores de sustentabilidade, com base na ACV, para projetos de estruturas de concreto. Silva, Saade e Gomes (2013) empregaram a ACV para avaliar os impactos ambientais de concretos fabricados com cimento Portland contendo diferentes teores de escória granulada de alto-forno em substituição ao clínquer e com resistência característica variando de 25 a 60 MPa. O aumento do uso de escória levaram a diminuição dos impactos ambientais na maioria dos casos avaliados. Silva (2015) comparou por meio da ACV misturas de concreto com adições minerais, sendo elas cinza de casca de arroz e cinzas de bagaço de cana, chegando a resultados favoráveis para as

misturas com adições minerais. De Paula (2016) também aplicou a ACV para comparar misturas de argamassas e concretos contendo agregados reciclados.

O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014) publicou um estudo em que foi utilizada a ACV para a avaliação de pavimentos e blocos de concreto. Souza et al. (2015) aplicaram a ACV para telhas de concreto e Souza et al. (2016) e Moraga et al. (2016) para blocos de concreto e paredes de concreto moldadas no local, ambos os estudos para o contexto brasileiro. Caldas et al. (2016) aplicaram a ACV com foco em energia e emissões de CO<sub>2</sub> comparando diferentes soluções de fachadas sendo algumas de concreto. Santoro e Kripka (2016) quantificaram as emissões de CO<sub>2</sub> para os constituintes do concreto (agregados e cimento) em uma fábrica localizada no Rio Grande do Sul. Lins et al. (2016) avaliaram as emissões de CO<sub>2</sub> de pavimentos do Estádio Nacional de Brasília, considerando somente a etapa de pré-uso.

Avaliando as unidades funcionais utilizadas nos estudos de ACV sobre concretos, abordados anteriormente, observa-se uma variação, entre elas: o volume de concreto produzido (em m<sup>3</sup>), o volume e resistência a compressão (em m<sup>3</sup>/Mpa), área de vedação vertical (em m<sup>2</sup>), a incorporação da resistência e durabilidade (em termos de vida útil) de uma estrutura de concreto (m<sup>3</sup>/Mpa.ano). Como observam Van Den Heede e De Belie (2012) e Silva (2015), a unidade funcional tem grande influência em estudos comparativos, e as vezes somente o m<sup>3</sup> não é capaz de fornecer as propriedades mais relevantes do material estudado.

Nota-se que quando o estudo deixa de avaliar uma simples mistura de concreto para um sistema como uma vedação ou estrutura, há a necessidade de incorporar características de desempenho, o que faz aumentar sua complexidade. A partir dessa análise crítica os autores do presente trabalho viram a necessidade de criar uma unidade funcional que abordasse a capacidade de drenagem das águas pluviais proporcionadas pelo pavimento drenante.

Nota-se assim uma difusão de pesquisas nesta temática. No entanto, não foram encontrados estudos que avaliaram mais de um impacto ambiental para os concretos drenantes, o que mostra a originalidade do presente trabalho. Dessa forma pretendeu-se dar continuidade ao estudo desenvolvido por Lins et al. (2016), incorporando outras categorias de impactos ambientais, por meio da ACV, a etapa de manutenção do ciclo de vida e considerando uma segunda unidade funcional que incorpore o efeito de drenagem proporcionado pelo pavimento drenante.

## 2. METODOLOGIA

A NBR 14040 (ABNT, 2009) divide a ACV em quatro etapas: (1) definição do objetivo e escopo, (2) análise de inventário, (3) avaliação de impacto e (4) interpretação. Neste sentido, a metodologia foi dividida nessas quatro etapas.

### 2.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo do estudo foi aplicar a ACV para comparação entre pavimentos de concreto drenante e concreto convencional, utilizando como estudo de caso o estacionamento do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha. Foram coletados dados primários de uma usina localizada em Brasília – DF. Foram adotadas duas unidades funcionais, sendo a primeira: o volume de concreto (em m<sup>3</sup>) para a produção dos pavimentos (definida na ABNT NBR 16416:2015). A segunda, como forma de avaliar a função de drenagem das águas pluviais proporcionadas pelos pavimentos drenantes foi definida como “m<sup>3</sup> de concreto/m<sup>3</sup> de água drenada”.

Na Figura 1 é apresentada o pavimento de concreto drenante da usina avaliada e na Tabela 1 a composição desses pavimentos. Ambos concretos foram dosados para atingirem a mesma resistência à compressão.

Figura 01 - Pavimento de concreto drenante na usina avaliada.



Fonte: Acervo pessoal dos autores (2017)

Tabela 01 - Traço em massa (composição dos pavimentos de concreto avaliados nos estudos).

| Materiais             | Concreto drenante (kg/m <sup>3</sup> ) | Concreto convencional (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------|--|--|
| Cimento               | 400                                    | 270  |
| Areia natural         | 0                                      | 431  |
| Areia artificial      | 240                                    | 431  |
| Brita natural         | 1360                                   | 973  |
| Aditivo plastificante | 0,32                                   | 0,22                                       |

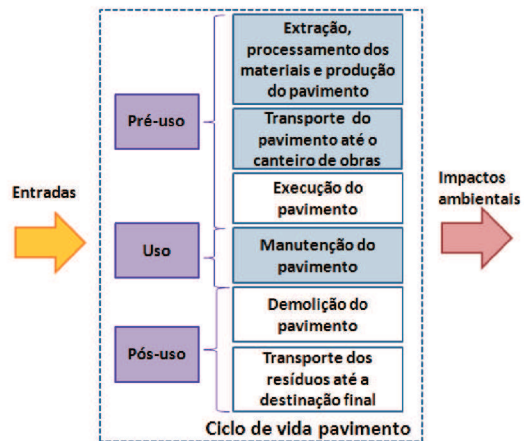
Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

No presente estudo foi considerada uma central dosadora de concreto (usina) localizada na Região Administrativa de Ceilândia-DF, responsável pelos dados primários obtidos.

Para que seja realizada a execução dos pavimentos permeáveis na área de 113000 m<sup>2</sup> do entorno do estádio e admitindo-se uma espessura de 0,08m de concreto, calculou-se um volume de aproximadamente 9048 m<sup>3</sup> de concreto a ser aplicado no estacionamento. Dessa forma, os resultados dos impactos ambientais por m<sup>3</sup> foram multiplicados pelo volume total a ser aplicado no estacionamento do estádio.

Na Figura 2 são apresentadas as etapas do ciclo de vida dos pavimentos e o escopo avaliado, sendo que somente as etapas marcadas em azul foram consideradas.

Figura 02 – Etapas avaliadas no estudo. Elaborado pelos autores (2017)



Fonte: Acervo pessoal dos autores (2016)

### 2.2 Análise do inventário

Para o cimento foi utilizado dados da Declaração Ambiental de Produto (DAP) publicado recentemente pela Votorantim Cimentos (2016), por esse estar inserido no contexto brasileiro.

Como o Brasil ainda não possui um banco de dados consolidado para outros materiais de construção, para o inventário da brita, areia e aditivo químico foi utilizado o banco de dados do Ecoinvent 3.3, adequando a matriz elétrica com dados da realidade brasileira, prática já adotada por outros estudos no contexto nacional, como o de Saade et al. (2014) e Silva (2015).

Para a etapa de transporte da fábrica até o canteiro (estacionamento do Estádio Nacional de Brasília) foi considerada a distância encontrada no Google Maps, de aproximadamente 30 km, considerando o caminhão cheio no trajeto de ida e vazio no trajeto de volta. Foram

encontrados a partir de dados da usina, os seguintes consumos de diesel: 10,96 L/m<sup>3</sup> de concreto drenante e 4,11 L/m<sup>3</sup> de concreto convencional. A partir do consumo, massa transportada e distância foi calculado o consumo de diesel e esse foi multiplicado pelos valores do banco de dados também do Ecoinvent 3.3.

Para a etapa de manutenção foi considerada uma vida útil do estacionamento de 60 anos sendo que foi adotado uma vida útil de 20 anos para o pavimento de concreto drenante, devido a problemas de colmatagem e tampamento, principalmente na superfície do pavimento (RODRIGUES MARIANO, 2014), resultando na necessidade de reposição dos materiais utilizados nesse pavimento de três vezes. Para o concreto convencional adotou-se uma vida útil de 40 anos (dada pela usina pesquisada), resultando em apenas uma reposição dos materiais constituintes ao longo da vida útil de 60 anos.

O volume de água drenado foi quantificado com base nas informações apresentadas na Ficha Técnica de Projeto do Estádio Nacional de Brasília (ABCP, 2017), para o tempo de vida útil de 60 anos.

### 2.3 Avaliação dos impactos ambientais

Para a avaliação dos impactos ambientais foram utilizadas sete categorias de impactos ambientais comuns ao método utilizado nas DAPs para grande parte dos materiais de construção civil, que segue a metodologia da EN 15978 (CEN, 2011) e EN15804 (CEN, 2013).

Ambas as normas tratam da ACV de forma específica para o setor da construção civil indicando como método de avaliação de impactos o CML – IA baseline, que possui uma abordagem do tipo midpoint. Foram avaliadas as seguintes categorias de impacto ambiental: mudanças climáticas para um horizonte de 100 anos (GWP 100), depleção da camada de ozônio (ODP), acidificação (AP), eutrofização (EP), formação de foto oxidantes (POCP), depleção abiótica de elementos (ADP), depleção abiótica de combustíveis fósseis (ADP-ff) e seguinte categoria de consumo de recursos: consumo de água potável (NFW).

### 2.4 Interpretação

Para o melhor entendimento desta etapa, ela foi dividida da seguinte forma na apresentação e discussão dos resultados: (1) impactos ambientais na produção, transporte e manutenção dos concretos; (2) avaliação dos impactos ambientais desses concretos aplicados ao estudo de caso no Estádio Nacional de Brasília; (3) análise dos resultados considerando a segunda unidade funcional.

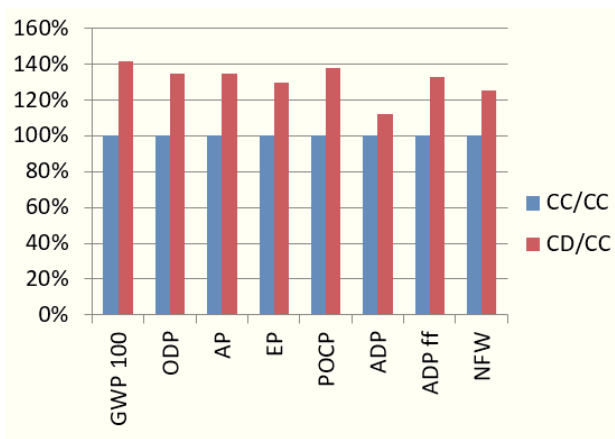
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos objetivos definidos inicialmente e na metodologia utilizada foram obtidos os resultados apresentados a seguir.

### 3.1 Produção, transporte e manutenção dos concretos

A comparação, em percentual, dos impactos ambientais dos concretos avaliados nesse estudo, estão apresentadas na Figura 3.

Figura 03 – Comparação dos impactos ambientais dos pavimentos avaliados na etapa de extração e processamento dos materiais normalizados pelo concreto convencional (CC).

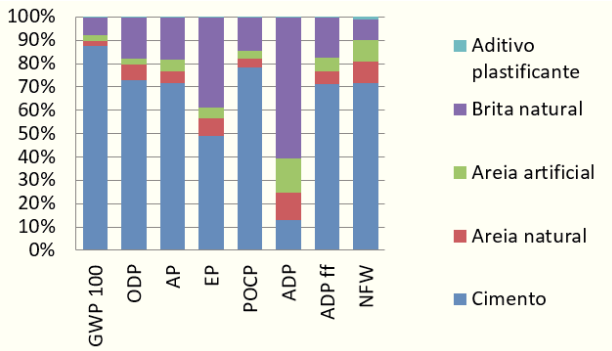


Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

O concreto convencional (CC) foi considerado o material de referência, dessa forma a relação obtida foi de 100% para o CC/CC e em relação ao concreto drenantes (CD), foram encontradas as relações CD/CC (concreto drenante/concreto convencional).

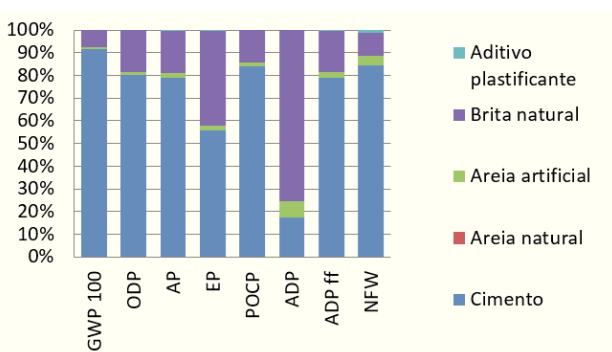
É possível observar que para todas as categorias de impactos ambientais o concreto drenante foi superior. A maior diferença ocorreu para o impacto de mudanças climáticas (GWP100) com uma diferença que ultrapassa os 40%, enquanto a menor diferença se deu para o potencial de depleção abióticas de elementos (ADP). Esses resultados vão de encontro aos impactos ambientais do cimento que também apresentou maior impacto para o GWP 100 e menor valor de ADP, como está apresentado nas Figuras 4 e 5.

Figura 04 – Impactos ambientais dos componentes do pavimento de concreto convencional (CC).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

Figura 05 – Impactos ambientais dos componentes do pavimento de concreto drenante (CD).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

Observa-se que o cimento é o material de maior impacto ambiental na produção de concreto, em quase todas as categorias ambientais, chegando a 90% para a categoria GWP 100, com exceção somente na categoria ADP, em que o agregado graúdo apresentou maior impacto (em torno de 60% para o CC e 70% para o CD).

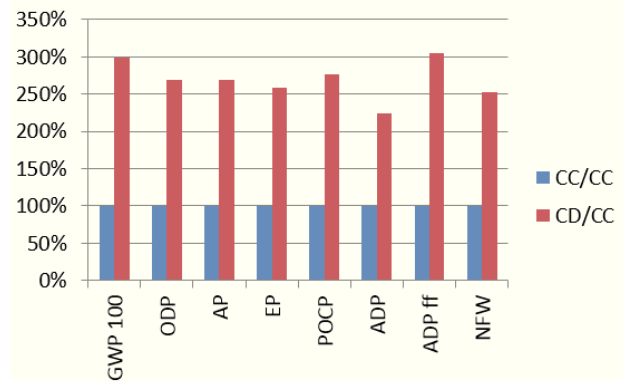
Sabe-se parte considerável dos impactos do cimento está relacionada à produção do clínquer (AGOPYAN; JOHN, 2011). Essa elevada participação do cimento, nos impactos ambientais de concretos, já foi verificada em diversos trabalhos, tanto brasileiros (SILVA, 2015; DE PAULA, 2016), como internacionais (GURSEL; MARYMAN.; OSTERTAG, 2015; CELIK et al., 2016). Para os concretos dessa usina o caso ainda é mais crítico pois é utilizado o cimento CP V - ARI, esse que é o cimento brasileiro de maior teor de clínquer e menor teor de adições minerais, o que o torna mais impactante ambientalmente. Quando são utilizados cimentos com substituições minerais, como a cinza volante, a escória de alto forno, fílers, cinzas vegetais, como de bagaço de cana e arroz, há uma tendência de diminuição dos impactos ambientais de concretos, como pode ser verificado nos estudos nacionais

de Fairbairn et al. (2012), Silva, Saade e Gomes (2013) e Silva (2015). Dessa forma, a partir do uso da ACV a empresa pesquisada possui um perfil ambiental de seus materiais, servindo como uma ferramenta de tomada de decisão.

Neste sentido, uma medida efetiva para a redução dos impactos ambientais de ambos os pavimentos de concreto é a diminuição do consumo de cimento. Esse que pode ser substituído por adições minerais, como escória granulada de alto forno, cinza volante, entre outros. Lembrando que questões técnicas como resistência mecânica, durabilidade e tempo de pega devem ser consideradas.

Quando são consideradas todas as etapas do ciclo de vida dos pavimentos avaliadas neste estudo: extração e produção dos materiais, transporte e manutenção, são encontrados os resultados apresentados na Figura 6.

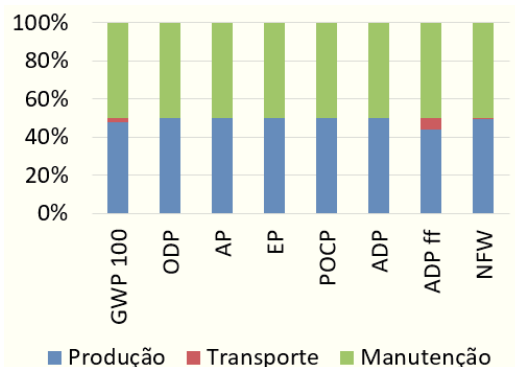
Figura 06 – Comparação dos impactos ambientais considerando a primeira unidade funcional dos pavimentos avaliados, considerando todas as etapas do ciclo de vida normalizados pelo concreto convencional (CC).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

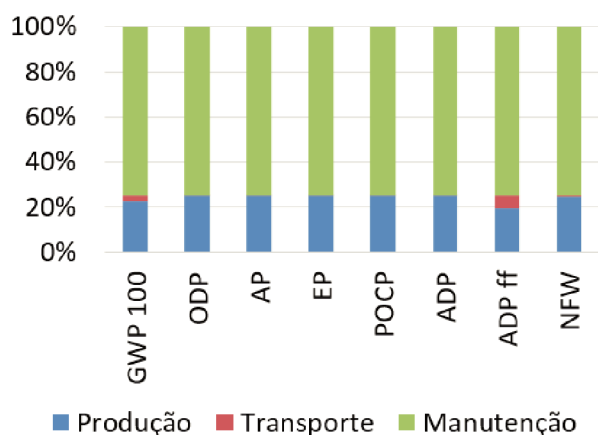
É possível observar diferenças de até três vezes para as categorias GWP 100 e ADP ff, o que mostra a importância de se considerar a etapa de manutenção, como é apresentado nas Figura 7 e 8.

Figura 07 – Comparação dos impactos ambientais ao longo de cada etapa do ciclo de vida para o pavimento de concreto convencional (CC).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

Figura 08 – Comparação dos impactos ambientais ao longo de cada etapa do ciclo de vida para o pavimento de concreto drenante (CD).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

Para o concreto convencional a etapa de produção (extração e processamento dos materiais) e manutenção apresentaram resultados próximos, uma média de 50%, enquanto que para o concreto drenante a etapa de manutenção foi responsável pela maior parte dos impactos (aproximadamente de 75%). Esses resultados foram observados para todas as categorias de impactos avaliadas.

Em relação aos impactos da etapa de manutenção, eles podem ser minorados a partir do aumento da vida útil dos pavimentos, principalmente no caso do CD. Alternativas na própria formulação do material e durante a vida útil do pavimento, como por exemplo limpezas, devem ser pensadas a fim de se aumentar a vida útil dos pavimentos.

A etapa de transportes se mostrou desprezível para a maioria das categorias de impacto ambiental (menor que 0,5% para a maioria das categorias avaliadas), a não ser para o impacto ADP ff, em que o consumo de diesel leva a esse aumento, chegando a uma participação aproximada de 6% para ambos os concretos.

Outra contribuição do estudo está no fato de que os resultados aqui apresentados poderão servir como ponto de partida para a elaboração de uma DAP dos pavimentos da usina avaliada. Deve-se ressaltar que no Brasil ainda existe um déficit de DAPs. Até a última pesquisa realizada pelos autores, só foi encontrado um, o da Votorantim Cimentos (2016).

### 3.2 Estudo de caso no Estádio Nacional de Brasília

A partir do volume e considerando a primeira unidade funcional adotada ( $m^3$  de concreto) foi possível estimar os impactos ambientais dos dois tipos de pavimentos, no Estádio Nacional de Brasília para as etapas de extração e produção dos materiais, transporte e manutenção. Na Tabela 2

estão apresentados os resultados das categorias de impacto ambiental avaliadas para os dois tipos de pavimentos.

Tabela 02 – Comparação dos impactos ambientais considerando a primeira unidade funcional dos pavimentos avaliados, considerando todas as etapas do ciclo de vida.

| Categorias de impacto ambiental          | Unidades              | CC       | CD       |
|--|-----------------------|----------|----------|
| Mudanças climáticas                      | $kCO_{2e}$ , 100 anos | 4.48E+06 | 1.34E+07 |
| Depleção da camada de ozônio             | $kgCFC11_e$           | 2.37E-01 | 6.39E-01 |
| Acidificação                             | $kgSO_{2e}$           | 1.02E+04 | 2.74E+04 |
| Eutrofização                             | $kg(PO_4)^{3-}_e$     | 1.73E+03 | 4.49E+03 |
| Formação de foto oxidante                | $kgC_2H_4_e$          | 6.49E+02 | 1.79E+03 |
| Depleção abiótica - elementos            | $kgSb_e$              | 2.75E+00 | 6.17E+00 |
| Depleção abiótica - combustíveis fósseis | MJ                    | 2.94E+07 | 8.95E+07 |
| Consumo de água potável                  | $m^3$                 | 1.63E+04 | 4.11E+04 |

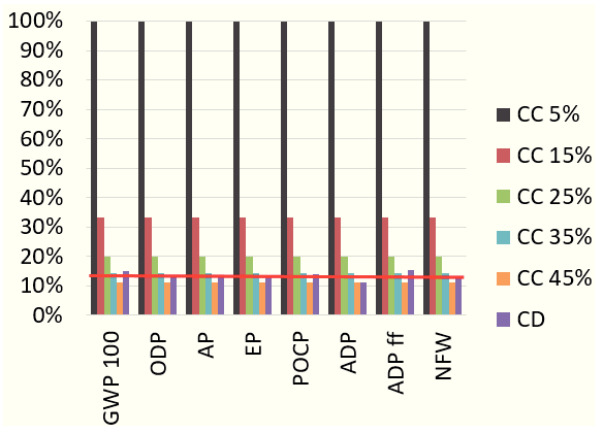
Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

Embora os pavimentos de concreto drenante apresentem benefícios relacionados à drenagem urbana, não se pode negar, a partir do que foi avaliado neste estudo para a usina pesquisada, que para outros impactos ambientais como potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização, potencial de depleção da camada de ozônio, entre outros avaliados no presente trabalho, uma grande desvantagem. No entanto, o seguinte questionamento deve ser realizado: o ganho na drenagem urbana compensa os maiores impactos ambientais do pavimento de CD? Com o intuito de tentar responder esse questionamento foi avaliada a segunda unidade funcional, apresentada na próxima seção.

### 3.3 Análise considerando a segunda unidade funcional

Nesta seção é apresentada como os impactos ambientais se comportam quando é considerado a função de drenagem dos pavimentos, na segunda unidade funcional adotada no estudo, em “m<sup>3</sup> de concreto/m<sup>3</sup> de água drenada”. Foi realizada uma análise de sensibilidade para saber o quanto de água o pavimento de concreto convencional (CC) precisaria drenar, em relação a água drenada do pavimento de concreto drenante (CD) para ter menores valores nas categorias de impactos ambientais avaliadas. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 9.

Figura 09 – Comparação dos impactos ambientais considerando a segunda unidade funcional dos pavimentos avaliados, considerando todas as etapas do ciclo de vida.



Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

O primeiro ponto que se observa, quando a função de drenagem é considerada, a elevada diferença, uma média de 87% entre todas as oito categorias de impacto ambiental avaliadas, entre o CC (com 5%) e o CD, mostrando a importância de se considerar unidades funcionais mais adequadas. Foi considerado que um montante de 5% de água pluvial pode ser aproveitada pelos pavimentos de CC. Como não foi encontrado estudos com aplicação da ACV em concretos drenantes, os autores consideram essa unidade funcional como uma primeira tentativa de incorporar o efeito benéfico da drenagem urbana proporcionada por esses pavimentos, que necessita ser computada em um estudo de ACV. Observa-se que o pavimento de CC precisa drenar 45% da quantidade de água drenada pelo pavimento de CD para ser mais vantajoso em todas as categorias de impactos ambientais, e para isto, uma nova estrutura de drenagem deveria ser pensada o que levaria a mais impactos ambientais.

Neste sentido, embora os pavimentos de CD tenham apresentado mais impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida, quando é considerada a função de drenagem de águas pluviais esses impactos são consideravelmente minorados, e, portanto, podem ser considerados de melhor desempenho ambiental.

Dessa forma, deve ser pensado em formas de diminuir os impactos ambientais do concreto drenante, principalmente atuando na redução do consumo de cimento e aumento de sua vida útil, como discutido anteriormente.

## 4. CONCLUSÕES

Foi aplicada a ACV para avaliação dos potenciais impactos ambientais entre dois tipos de pavimentos de concreto, sendo um convencional e outro drenante. Foram utilizados dados primários obtidos de uma concreteira localizada em Ceilândia - DF, o que normalmente é uma etapa crítica em um estudo de ACV. A partir dos dados obtidos e quantificação de seus impactos ambientais teve-se como estudo de caso o estacionamento do Estádio Nacional de Brasília.

O cimento utilizado nos concretos foi o material responsável pela maior participação na maioria das categorias de impactos ambientais avaliadas. Para o concreto convencional a etapa de produção e manutenção apresentaram participação similar (uma média de 50%), enquanto que para o concreto drenante a etapa de manutenção foi a mais significativa (75%).

O estudo traz uma importante contribuição para o desenvolvimento da ACV aplicada a concretos drenantes, tendo em vista a ausência desse tipo de estudo na literatura pesquisada, ressaltando a importância de se considerar o efeito benéfico da drenagem urbana proporcionada por esse pavimento em termos da unidade funcional adotada.

Quando o efeito da drenagem não é considerado o concreto convencional apresenta um melhor perfil ambiental para todas as categorias de impactos ambientais avaliadas. No entanto, quando se considera o volume potencial de água que pode ser aproveitado pelos pavimentos drenantes, eles se mostram com um melhor desempenho ambiental para todas as categorias avaliadas. Conclui-se a importância de se escolher uma unidade funcional que retrate o desempenho dos materiais avaliados em um estudo de ACV.

Sugere-se para futuros estudos: a melhoria e refinamento da definição da unidade funcional em termos da drenagem urbana, a análise de diferentes tipos de cimento e utilização de adições minerais nos concretos produzidos para pavimentação.



## REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V.; JONH, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. Série Sustentabilidade, v. 5. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manejo Integrado de Águas Pluviais**: Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha Brasília- DF Disponível em: <[http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2014/04/AF\\_11\\_DF\\_ESTADIO%20DE%20BRASILIA.pdf](http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2014/04/AF_11_DF_ESTADIO%20DE%20BRASILIA.pdf)> Acesso em 11. jan. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- CABEZA, L. F. et al. **Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector**: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 29, p. 394-416. 2014
- CALDAS, L. R. et al. **Sustentabilidade na construção civil: avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO2 de fachadas para habitações sociais**. *Sustentabilidade em Debate*, v. 7, n. 2, p. 238-256, 2016.
- CELIK, K. et al. **Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder**. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, v. 56, p. 59 – 72, 2015.
- CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. **Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach**. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 123, p. 627 – 637, 2016.
- CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. **A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings**. *Elsevier, Applied Energy*, v. 143, p. 395-413, 2015.
- CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto. 2014. Disponível em: <<http://www.acv.net.br/website/acvs/show.asp?pp-gCode=DE0D28E8-7BDE-4495-9405-8604588186C5>>. Acesso em: 19 abr. 2016.
- DE PAULA, R. C. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) de argamassas e concretos produzidos com resíduos de construção e demolição (RCD)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 15804**. Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. Brussels: CEN, 2013.
- \_\_\_\_\_. **EN 15978**. Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. Brussels: CEN, 2011.
- FAIRBAIRN, E. M. R.; DE PAULA, T. P.; CORDEIRO, G. C.; AMERICANO, B. B.; TOLÊDO FILHO, R. D. **Avaliação da substituição parcial de clínquer por cinza de bagaço de cana**: redução de emissão de CO2 e potencial de créditos de carbono, v.5, n.2, 2012; p.229-251.
- GURSEL, A. P.; MARYMAN, H.; OSTERTAG, C. **A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash**. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 112, p. 823 – 836, 2016.
- LINS. et al. **Emissões De CO2 de Pavimentos de Concreto Drenante e Convencional**: Estudo de Caso Comparativo para o Estádio Nacional de Brasília. In: II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2., 2016, João Pessoa, Anais ... João Pessoa: UFPB, 2016.
- MORAGA. et al. **Avaliação do ciclo de vida de paredes de blocos de concreto para empreendimentos habitacionais do Programa Minha Casa Minha Vida**. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 5., 2016, Fortaleza, Anais ... Fortaleza: EMBRAPA, 2016.
- OLIVEIRA, F. R. M.; SILVA, M. G.; SILVA, V. **Indicadores de sustentabilidade com base em ciclo de vida para sistemas estruturais em concreto**. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 6, n.5, p. 832-843. 2013.

PORTAL, N. W. et al. **Sustainable Potential of Textile-Reinforced Concrete**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 1, 2015.

RANDL, N. et al. **Development of UHPC mixtures from an ecological point of view**. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 67, p. 373 – 378, 2016.

RODRIGUES MARIANO, H. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, 2014.

SAADE, M. R. M. et al. **Material eco-efficiency indicator for Brazilian buildings**. *Smart and Sustainable Built Environment*, Emerald, v. 3, n. 1, p. 54-71, 2014.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. **Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias-primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 35-49, abr./jun., 2016.

SERRES, N.; BRAYMAND, S.; FEUGEAS, F. **Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment**. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, v. 5. p. 24 – 33, 2016.

SILVA, L. C. **Avaliação de ciclo de vida de concretos com substituição parcial de cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, M. G.; SAADE, M. R. M.; GOMES, V. **Influence of service life, strength and cement type on life cycle environmental performance of concrete**, v.6, n.6, 2013; p.844-853.

SOUZA, D. M et al. **Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls**. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v.137, p. 70-82, 2016.

SOUZA, D. et al. **Comparative life cycle assessment of ceramic versus concrete roof tiles in Brazilian context**. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v.89, p. 165-173, 2015.

TEIXEIRA, E. R. et al. **Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material**. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 112, p. 2221 – 2230, 2016.

TURK, J. et al. **Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA**. *Waste Management*, Elsevier, v. 45, p. 194 – 205, 2015.

VAN DEN HEEDE, P., DE BELIE, N. **Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations**. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, v. 34, n. 4, p. 431–442, 2012.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

VOTORANTIM CIMENTOS. Cements CP II E 40, CP III-40 RS and CP V-ARI (bulk form) Available at: <<http://www.environmental.com/en/Detail/epd895>>. Access at: 26 sep. 2016.

YIN, S. et al. **A life cycle assessment of recycled polypropylene fibre in concrete footpaths**. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 112, p. 2231 – 2242, 2016.