

ACV E CCV EM CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE FILER CALCÁRIO

LCA AND LCC IN CONCRETES WITH HIGH LEVELS OF LIMESTONE FILER

GUSTAVO DE AGUIAR ISAIA, Dr. | Centro Universitário Facens, Brasil

SILVANE SANTOS DA SILVA | Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

RESUMO

Este artigo tem por finalidade a determinação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e do Custo do Ciclo de Vida (CCV), em concretos através da substituição do cimento Portland (CP) por elevados teores de filer calcário (FC) e cinza volante (CV), em teores de 50% a 80%, com o propósito de diminuir as emissões de CO₂ na fabricação do CP. Foi aplicado a ACV e o CCV com a intenção de aferir a sustentabilidade dos concretos estudados com base nos impactos ambientais e no custo. O estudo demonstrou que, por ocasião da elevação da proporção de FC nas misturas, o impacto ambiental é reduzido devido a minoração da utilização de CP. O comportamento foi observado na totalidade dos índices ambientais estudados demonstrando a estreita relação entre a proporção de CP e a poluição do meio ambiente, cancelando, assim, a eficácia na utilização de elevados teores de FC. Os resultados mostraram a exequibilidade de concretos com elevados teores de FC, do ponto de vista técnico-ambiental, considerando que os resultados alcançados apontaram, de maneira inequívoca, para a excelente performance ambiental das misturas.

130

PALAVRAS CHAVE: ACV e CCV; Concreto, Sustentabilidade, Filer Calcário, Cinza Volante.

ABSTRACT

This article aims to determine the Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost (LCC) in concrete through the replacement of Portland cement (PC) by high levels of limestone filer (LF) and fly ash (FA), in contents of 50% to 80%, with the purpose of reducing the CO₂ emanations in the PC manufacture. LCA and LCC were applied with the intention of assessing the sustainability of the studied concretes based on environmental impacts and cost. The study showed that, due to the increase in the proportion of LF in the mixtures, the environmental impact is reduced due to the reduction in the use of PC. The behavior was observed in the totality of the studied environmental indexes, demonstrating the close relationship between the proportion of PC and the pollution of the environment, confirming, thus, the efficiency in the use of high contents of LF. The results showed the feasibility of concrete with high LF contents, from a technical-environmental point of view, considering that the achieved results pointed, unequivocally, to the excellent environmental performance of the mixtures.

KEYWORDS: LCA and LCC, Concrete, Sustainability, Limestone Filer, Fly Ash.



1. INTRODUÇÃO

Uma das maneiras para a elevação da sustentabilidade do concreto consiste na troca do CP por AM como o FC e a CV. O clínquer Portland, o mais importante componente do CP, é o material que apresenta a maior contribuição em relação a emissão de gases de efeito estufa (GEE) levando-se em conta que 2/3 da sua composição é composta por carbonatos cálcicos que sofrem descarboxilação durante o processo de produção, aliado a queima de combustíveis fósseis, constituindo, desta maneira, uma das principais fontes de poluição do ar (VISEDIO e PECCHIO, 2019).

Este material (CP) participa entre 85 a 90% das emissões do concreto, contribuindo com cerca de 5% das emissões totais do planeta (GCCA, 2017). Considerando que o concreto é material mais produzido no mundo, tem-se uma dicotomia entre desenvolvimento econômico-social demandado pela sociedade moderna e a sustentabilidade requerida pelo planeta no que concerne a deterioração da atmosfera, bem como em relação a utilização maciça de recursos naturais não renováveis.

Entre as adições inertes mais utilizadas estão os FC que são moídos conjuntamente com o clínquer, considerando que são encontrados em várias localidades do globo, conferindo adequadas propriedades reológicas aos concretos, diminuindo seu o custo, bem como apresentando reduzida emissão de GEE como o CO₂.

Em relação a produção do CP, a legislação internacional (normas) delimita sua utilização na proporção de 5 a 35%, em função da localização e da cultura tecnológica, no papel de uma AM inerte quando da moagem simultânea com o clínquer nas fábricas. Diversos estudos demonstram que a elevação da quantidade de FC na troca por CP em proporções mais elevadas do que aquelas preconizadas pelas normas internacionais, em misturas com pozolanas como a CV, propiciam concretos mais resistentes, com maior sustentabilidade e de menor custo, mantendo as propriedades relacionadas com a durabilidade (VISEDIO e PECCHIO, 2019).

Sob o prisma da sustentabilidade a troca do CP por FC reveste-se de grande importância no que concerne as demais AM levando-se em conta que é inerte, contribuindo de forma muito

reduzida para as emissões de GEE, por ser barato e estar acessível nas proximidades das fábricas de CP. Em outra direção, a utilização em conjunto do FC com uma AM ativa (CV) pode trazer benefícios tanto para as propriedades do concreto, bem como para a sustentabilidade de modo destacado em comparações unitárias como kg.m⁻³, MPa⁻¹ (AGOPYAN e JOHN, 2011).

A meta deste artigo consiste no estudo da ACV e CCV de concretos com teores elevados de substituição de clínquer Portland por AM (FC e CV). A ACV e o CCV contemplam o estudo dos impactos ambientais (eco-indicador 99, mudanças climáticas, consumo de energia, geração de resíduos e consumo de água, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil) e do custo referente a cada um dos concretos estudados.

A tendência da elevação da proporção de FC nos concretos conduz a uma maior sustentabilidade deste material contribuindo para a diminuição da emissão de GEE no ambiente, corroborada pelo uso da metodologia da ACV e CCV, apresentando a exequibilidade da utilização do FC em proporções mais elevadas do que as encontradas na literatura corrente a qual limita-se a teores na casa dos 50% na troca do CP. Assim este trabalho propõe-se verificar a viabilidade da diminuição do clínquer no concreto para valores inferiores a 100 kg.m⁻³.

1.1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Custo do Ciclo de Vida (CCV)

A adoção de ferramentas de gestão ambiental são cada vez mais necessárias para a sociedade devido à crescente importância dos aspectos ligados com o meio ambiente. Estas ferramentas possibilitam mensurar os impactos ambientais das decisões tomadas em relação a processos e produtos seja no âmbito das empresas, governo ou instituições de ensino e pesquisa. Ao lidar com impactos ambientais surge um problema de comparação entre produtos ou processos distintos. Assim é necessário o estabelecimento de critérios de comparação comuns afim de que a abordagem possa ser completa (ABCV, 2020).

Na intenção de contribuir para a solução deste problema foi desenvolvida uma ferramenta denominada de ACV de produtos ou serviços. Ela consiste num método que leva em consideração a avaliação dos aspectos ambientais na totalidade das fases da vida de sistemas e produtos. A

metodologia visa estabelecer uma vinculação entre aspectos de impacto potencial ao uso de recursos naturais, à saúde humana e à ecologia (ABCV, 2020).

O inventário dos impactos ambientais de todas as atividades da cadeia produtiva constitui em um dos objetivos primordiais da ACV. Primeiramente devem ser identificadas as “entradas” e “saídas” (matéria e energia) do empreendimento em questão (SEO e KULAY, 2006). Num segundo momento devem ser avaliados os impactos ambientais potencialmente associados a essas “entradas” e “saídas”. Sob a visão da cadeia produtiva da construção civil, sendo as principais etapas: a) extração de recursos; b) fabricação; c) construção; d) ocupação e manutenção; e) demolição; f) destinação de resíduos.

Na intensão de difundir a ferramenta da ACV, bem como orientar sua aplicação foi elaborada a NBR ISO 14040 (ABNT, 2014a), seus principais aspectos são: a) identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em várias etapas de seu ciclo de vida; b) tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais; c) escolha de indicadores mais confiáveis de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição; d) marketing, quando produtos ou serviços são identificados como cumpridores de requisitos ambientais.

Um outro aspecto relacionado a ACV, diz respeito a alternativa de realizar a análise dos custos de um produto, processo ou atividade ao longo da sua vida. Este mecanismo dentro da ACV possui a denominação de custo do ciclo de vida (CCV). De maneira genérica estão incluídos nos custos do CCV de uma construção as seguintes fases: a) projeto; b) construção; c) operação; d) manutenção; e) reabilitação; f) demolição/desconstrução. De modo expedito a estimativa dos custos do ciclo de vida pode ser determinada através da contabilização dos recursos dispendidos em cada uma dessas fases (REAL, 2010).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na intenção de viabilizar a sustentabilidade do concreto através da troca do CP por elevados teores de FC, buscou-se a otimização dos traços pela diminuição da água incorporada e do empacotamento de partículas. Neste sentido utilizou-se um teor a/ag de 0,25, viabilizado pela

presença de um aditivo hiperplastificante, e por um estudo minucioso da distribuição granulométrica dos componentes através do programa EMMA (Elkem Materials Mix Analyzer).

A proporção de aglomerantes foi escolhida através da troca do CP por FC em quantidades de, pelo menos, o dobro permitido pela norma brasileira. Levando-se em conta que a NBR 16697 (ABNT, 2018a) permite um teor máximo de FC no CP de 25%, foi adotado como parâmetro inicial uma substituição de 50%, a partir do qual foram escolhidos os percentuais de 60 e 70% de FC na troca por CP.

Foram determinadas misturas com as seguintes diretrizes e configurações: a) REF: traço referência com 100% de CPV-ARI que serviu de parâmetro de comparação com as demais misturas estudadas; b) FC50: traço binário com 50% de CP e 50% de FC, atendendo ao objetivo específico de troca do CP por, pelo menos, o dobro permitido pela norma brasileira; c) FC60: traço binário com 40% de CP, 60% de FC, na intenção de formular misturas com elevados teores de FC; d) FC70CV10: traço ternário com 20% de CP, 70% de FC e 10% de CV, escolhendo-se esta pozolana para dar maior compacidade à pasta. Os traços foram expressos através da proporção de material por metro cúbico de concreto e podem ser vistos na tabela 1. Foi realizado o ensaio de resistência à compressão em amostras de 10x20 cm, moldadas e ensaiadas em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR 5739 (ABNT, 2018b) respectivamente na idade de 91 dias.

2.1. Software Simapro

O Simapro é uma ferramenta flexível que possibilita a verificação e a comparação ambiental de produtos, serviços e processos de etapas da ACV. O programa auxilia na ACV, seguindo as recomendações das normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2014a e b) e encontra-se no mercado desde o início dos anos 1990. Ele, demonstra ser uma ferramenta bastante confiável para muitas indústrias, empresas de consultoria e universidades em mais de 80 países. O software apresenta uma biblioteca de dados e diferentes métodos de cálculo embutidos em seu sistema, na versão completa.

A estrutura dos métodos de avaliação de impactos no Simapro é baseada: a) na caracterização, onde as substâncias que contribuem para uma categoria de impacto são

multiplicadas por um fator de caracterização que expressa a contribuição relativa da substância; b) na avaliação de danos, a combinação de uma série de impactos em uma categoria de dano; c) na normalização, os indicadores de impacto

sofrem normalização, com isso todos ficam com a mesma unidade, o que torna mais fácil para compará-los; d) na ponderação, um fator que multiplica os impactos para normalizá-los.

Tabela 01 - Quantidade de materiais por metro cúbico de concreto (kg), sendo o aditivo em L.m⁻³
Fonte: Os Autores.

Traços	Cimento	Clínquer	FC	CV	Areia fina	Areia média	Brita 0	Aditivo	H ₂ O
REF	424	382	-	-	403	400	971	16,34	106
FC50	238	214	180	-	445	442	1.073	13,68	105
FC60	192	173	226	-	451	448	1.088	13,87	104
FC70CV10	97	87	283	36	467	463	1.125	13,46	104

O software Simapro possui um banco de dados detalhado de entrada e saída com produtos diversificados que abrange grande parte da economia, além da compatibilidade com o banco de dados Ecoinvent, que engloba mais de 10.000 processos. O banco de dados Ecoinvent resulta de um esforço de diferentes entidades Suíças para atualizar e constituir diversas bases de dados de inventário de ciclo de vida. Assim há possibilidade de criar novos produtos ou processos, associando-os aos já existentes. O programa possui uma conformação que permite filtrar os resultados, compará-los, agrupá-los, apresentá-los em gráficos ou fluxogramas.

2.2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A atividade desenvolvida neste artigo foi de cunho qualitativo, através da análise de impactos ambientais e da sustentabilidade, e quantitativo, através da quantificação de custo e do fluxo de materiais. Foi definida como unidade funcional um metro cúbico de concreto partindo do princípio da sustentabilidade, que está ancorado em três critérios básicos: ambiental, econômico e social (ABNT, 2014a e b).

A ACV tem por meta avaliar e comparar fatores ambientais de alternativas de um metro cúbico de concreto fictício localizado em uma área nas proximidades da Universidade Federal de Santa Maria - RS. O metro cúbico de concreto será utilizado em um prédio que possui oito andares, considerando o térreo como pilotis. O metro cúbico de concreto faz parte da estrutura portante do prédio sendo desta forma um

concreto estrutural. Enquanto unidade funcional o metro cúbico de concreto será analisado do berço ao portão. Nesta fase estão englobados a extração, processamento e transporte das matérias primas, bem como a produção do concreto na obra.

Para a valoração da ACV foi utilizado o programa Simapro onde foram determinados os fluxos de entrada e saída de material e energia para cada unidade de processo do sistema relacionado ao produto. O cálculo é feito da seguinte forma: a) classificação dos fluxos elementares em “entrada” ou “saída”; b) uniformização dos dados em quantidade.período¹, período pode ser ano, mês, dia; c) cálculo do total de material, combustível e energia envolvido em todo o processo unitário; d) divisão do total de cada insumo pelo total de material principal produzido, em quilograma; e) obtenção dos fluxos de entrada e saída de cada unidade de processo (ABNT, 2014a e b). Levando-se em conta a análise do berço ao portão para a unidade funcional metro cúbico de concreto, foram considerados os seguintes fluxos elementares de entrada e saídas; a) agregados graúdos e miúdos; b) CP; c) AM (FC e CV); d) aditivo e água; f) combustível (diesel); g) energia elétrica.

Foram avaliados os impactos ambientais: eco-indicador 99, mudanças climáticas, consumo de energia, geração de resíduos, consumo de água, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil. Tendo o respaldo do programa Simapro, calculou-se índices para cada uma das classes de impactos

ambientais. O resultado da avaliação de impactos é obtido com base na análise das substâncias envolvidas no sistema e comparadas, através de um método que seleciona quais substâncias influenciam em cada categoria de impacto. Assim para calcular o peso do impacto potencial, um índice é adotado para cada categoria.

Em sequência, os índices de cada categoria são uniformizados, dividindo o grupo de impacto por um número de referência, e os resultados apresentados em unidade Pt. Um Pt equivale a um milésimo da carga ambiental média anual de um cidadão europeu, esse valor foi calculado dividindo o total da carga ambiental da Europa pelo seu número de habitantes (CBCS, 2020).

2.3. Custo do Ciclo de Vida (CCV)

Conforme a norma NBR ISO 15686-5 (ABNT, 2017) o CCV pode ser definido como sendo a quantificação do custo de um produto ou de suas partes durante o seu ciclo de vida. Para tanto deverá atender aos requisitos de desempenho para os quais foi originalmente concebido.

Levantou-se, considerando o consumo de materiais nas misturas, os custos para a confecção de um metro cúbico de concreto referente a cada traço, levando-se em consideração a abordagem do berço ao portão, em conformidade ao estudo de ACV realizado. Os resultados obtidos referem-se aos custos totais, do berço ao portão, calculados com obrigações trabalhistas de 110,61%, tendo por referência a TCPO (TCPO, 2020) e à tabela de encargos sociais do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) (SINAPI, 2021), relacionada ao período de dezembro de 2021.

2.4. Sustentabilidade

Considerando os valores obtidos na ACV e no CCV foram escolhidos índices na intenção de obter-se indicadores para uma análise integrada da sustentabilidade das misturas estudadas. Para o aspecto econômico elegeu-se o índice de custo (Ic) e no aspecto ambiental o índice de impacto ambiental (Ia). O Ia é composto pela ponderação unitária dos seguintes índices ambientais: eco-indicador 99 (saúde humana, qualidade dos ecossistemas e uso de recursos naturais), mudanças climáticas, geração de resíduos, consumo de água, consumo de energia, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil.

Para a determinação do Ia realizou-se a ponderação unitária de cada índice ambiental citado, ou seja, os valores foram expressos entre 0 e 1 e obtidos pela divisão entre os cenários do maior pelo de menor valor. Após realizou-se a média da ponderação unitária de cada índice ambiental na intenção de valorar o Ia. O Ic é composto pela ponderação unitária do custo do metro cúbico de cada concreto estudado.

Para estabelecer o melhor metro cúbico de concreto, no que concerne a sustentabilidade, faz-se necessário sintetizar, em um único indicador, os resultados expressos nos índices de custo (Ic) e de impacto ambiental (Ia). Desta maneira foi concebido o indicador global de sustentabilidade (Is) o qual é composto pela ponderação dos dois índices citados. A metodologia de cálculo do indicador global de sustentabilidade (Is) parte do princípio que a tomada de decisão relativa ao ciclo de vida de produtos e serviços deve ser baseada nos seus efeitos econômicos e ambientais através dos principais índices que compõe a ACV e o CCV (BIERER *et al.*, 2015).

Assim utilizou-se a metodologia MFCA (contabilidade de custo dos fluxos de materiais) onde o ambiente de produção analisado é modelado como um sistema de fluxos (movimentos de materiais) e centros de quantidade (processos). Desta maneira é possível utilizar-se uma expressão que gere um valor global adequado para o processo decisório.

Bierer *et al.* (2015) partiram do equacionamento proposto por Ostermeyer *et al.* (2013) e apresentaram uma equação que possibilita o cálculo de um indicador global de sustentabilidade (Is) através da metodologia multidimensional de otimização de Pareto. Sugerindo uma equação composta pela raiz quadrada da soma dos quadrados da ACV e CCV. Desta maneira, utilizou-se a metodologia de Ostermeyer *et al.* (2013), na qual foram utilizados os índices de custo (Ic) e de impacto ambiental (Ia) para o cálculo do indicador global de sustentabilidade (Is).

O valor de Is é dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados de Ic e Ia. Conforme Ostermeyer *et al.* (2013) o valor do indicador global de sustentabilidade (Is) é gerado através de um vetor no espaço, uma vez que cada parte da sustentabilidade assumirá um eixo cartesiano. Assim a melhor sustentabilidade, no que se refere ao metro cúbico de concreto, será aquele com menor valor de Is.

Tabela 02: Composição do índice de impacto ambiental (Ia)
Fonte: Os Autores.

Índice ambiental	Unidade	REF	FC50	FC60	FC70CV10
Saúde humana ¹	Pt	9,18	6,18	5,48	3,93
	Unitário	1,0	0,67	0,6	0,43
Qualidade dos ecossistemas ²	Pt	0,44	0,31	0,28	0,22
	Unitário	1,0	0,7	0,64	0,5
Uso de recursos naturais ³	Pt	5,11	3,55	3,23	2,49
	Unitário	1,0	0,69	0,63	0,49
Mudanças climáticas ⁴	Pt	3,63	2,16	1,81	1,07
	Unitário	1,0	0,59	0,5	0,29
Geração de resíduos ⁵	Pt	0,41	0,29	0,26	0,2
	Unitário	1,0	0,71	0,63	0,49
Consumo de água ⁶	Pt	0,0016	0,0015	0,0014	0,0014
	Unitário	1,0	0,94	0,88	0,88
Consumo de energia ⁷	Pt	0,023	0,016	0,014	0,01
	Unitário	1,0	0,7	0,61	0,43
Emissão de CO _{2eq} ⁸	kg _{CO2eq}	597,24	377,41	325,09	212,83
	Unitário	1,0	0,63	0,54	0,36
Formação de material particulado ⁹	kg _{MP10eq} .10 ⁻³	146	122	116,9	98,8
	Unitário	1,0	0,84	0,8	0,68
Esgotamento fóssil ¹⁰	kg _{oileq}	24	17,3	15,9	12,7
	Unitário	1,0	0,72	0,66	0,53
Ia - ($\sum 1$ a 10 unitário).10 ⁻¹		1,0	0,72	0,65	0,51

Tabela 03 - Composição do índice de custo (Ic)
Fonte: Os Autores

Índice de custo	Unidade	REF	FC50	FC60	FC70CV10
Custo do metro cúbico	R\$	767,33	614,18	592,43	539,93
	Unitário	1,0	0,8	0,77	0,7
Ic		1,0	0,8	0,77	0,7

Tabela 04 - Indicador global de sustentabilidade (Is)

Fonte: Os Autores.

	Índice	REF	FC50	FC60	FC70CV10
ACV	Ia	1,0	0,72	0,65	0,51
CCV	Ic	1,0	0,8	0,77	0,7
	Is	1,41	1,08	1,01	0,87
	Posição	Quarto	Terceiro	Segundo	Primeiro

Tabela 05 - Resistência à compressão (MPa) aos 91 dias de idade.

Fonte: Os Autores

Traços	Resistência (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
REF	127,2	1,2	1,0
FC50	87,8	2,1	2,4
FC60	65,7	1,6	2,4
FC70CV10	51,8	0,5	1,0

3. RESULTADOS

Os resultados do Ia, Ic, Is e resistência à compressão podem ser observados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

3.1 Discussão dos Resultados

3.1.1 Resistência à compressão

Os valores da tabela 5 mostram a reduzida dispersão dos resultados de resistência à compressão, considerando os valores dos coeficientes de variação, inferiores a 2,5%. Verifica-se que o maior desvio padrão foi de 2,1 MPa para o FC50. Pode-se verificar que a totalidade das misturas apresentaram resistências à compressão superiores a 50 MPa, denotando, desta forma, Concretos de Alta Resistência (CAR).

Constatou-se que as misturas tiveram a resistência à compressão diminuída com a elevação na proporção de FC, assim como nenhuma apresentou resistência similar ou mais elevada que o REF. Considerando que o REF, FC50, FC60 e FC70CV10 possuem respectivamente 424, 238, 192 e 97 quilos de CP por metro cúbico de concreto pode-se colocar

que a contribuição de cada quilo de CP para a resistência à compressão apresenta uma elevação devido a uma maior presença de FC na mistura, ou seja 0,3, 0,37, 0,34 e 0,53 MPa por quilo de CP respectivamente para o REF, FC50, FC60 e FC70CV10.

Importante notar a contribuição que maiores quantidades de FC aportam para a elevação da resistência à compressão proporcionalmente ao teor de CP na mistura. No caso do FC70CV10 cada quilo de CP foi responsável por 0,53 MPa, 76,67% maior do que o REF com 0,3 quilos de CP por MPa.

3.2 Índices Ambientais

Na tabela 2 observa-se os índices ambientais (saúde humana, qualidade dos ecossistemas, uso de recursos naturais, mudanças climáticas, consumo de energia, geração de resíduos, consumo de água, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil), juntamente com o valor de índice de impacto ambiental (Ia).

Um dos principais insumos responsáveis pelo impacto ambiental do concreto é o clínquer

Portland seja em relação ao consumo de matérias primas (argila, calcário, etc.), seja pelo consumo de combustíveis fósseis (carvão, gás natural, etc.), seja pela emissão de CO₂eq.

Conforme Kjellsen *et al.* (2005) o clínquer Portland contribui com mais de 91% das emissões de CO₂eq do concreto. Assim, iniciativas que reduzam o teor de clínquer no concreto apresentam-se como uma adequada alternativa para a minimizar a emissão de GEE e, conseqüentemente, para a elevação da sustentabilidade do material.

Ao realizar a troca do CP por FC obtém-se uma mitigação dos efeitos danosos do concreto ao meio ambiente. Este comportamento foi observado na totalidade dos índices ambientais, ou seja, há uma diminuição do índice ambiental com a elevação na proporção de FC (contração no teor de CP).

Na totalidade dos casos o traço REF é o responsável pelo maior valor, seguido pelo FC50, FC60 e FC70CV10. Assim pode-se verificar que, nos traços estudados, a evolução dos índices ambientais apresenta-se inversamente proporcional ao teor de FC e diretamente proporcional a quantidade CP e a resistência à compressão.

Na figura 1 são apresentados o índice de impacto ambiental (Ia), o índice de custo (Ic) e o indicador global de sustentabilidade (Is), onde verifica-se que quando a quantidade de FC se eleva os parâmetros mencionados diminuem. Importante notar os coeficientes R² muito próximos de 1 indicando uma ótima correlação entre os resultados.

3.3 Índice de custo

Na tabela 3 observa-se os valores para o custo por m³ de concreto em relação a cada mistura estudada. Em uma análise abrangente constata-se que o custo relaciona-se de forma proporcional com a resistência à compressão e o teor de CP e inversamente proporcional a quantidade de FC. Desta maneira valores mais altos de resistência à compressão e CP possuem um custo maior.

Estes dois fatores estão atrelados ao teor de CP presente em cada traço sendo maior no REF (mais caro) e menor no FC70CV10 (mais barato). Em relação a quantidade de FC nas misturas o comportamento é o oposto, na medida em que

seu teor aumenta o custo diminui. Esta relação está atrelada ao teor de FC presente em cada traço sendo menor no REF (mais caro) e maior no FC70CV10 (mais barato). Estas relações são mostradas na figura 2.

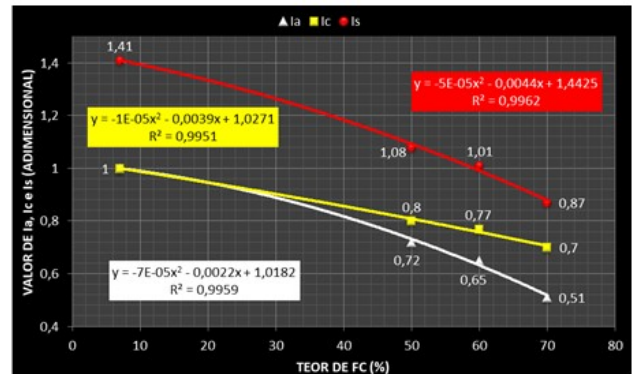


Figura 01 - Ia, Ic e Is x teor de Fc.
 Fonte: Os Autores

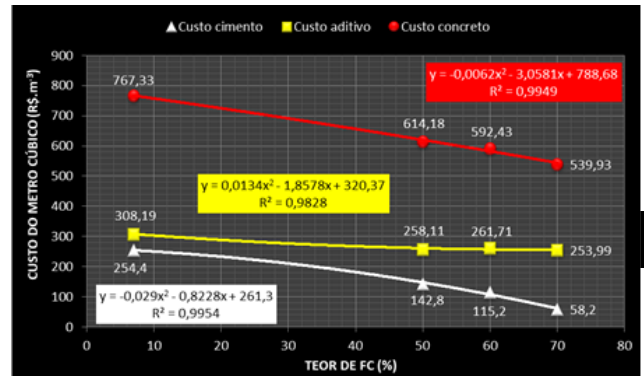


Figura 02 - Custo do metro cúbico de concreto, cimento e aditivos x teor de Fc.
 Fonte: Os Autores

Outro comportamento a ser observado diz respeito ao custo do aditivo por m³, no traço REF o valor foi 19,48% superior à média de custo das misturas com FC. Assim, a fora o REF, os demais traços tiveram uma diferença muito reduzida no custo do aditivo com média de R\$257,94. Não obstante o peso do aditivo para a totalidade das misturas foi muito similar com uma média de 43,6%. Em outra direção, o “peso” do cimento decaí quando a quantidade de FC se eleva, iniciando com 33,15% para o REF, 23,25% FC50, 19,45% FC60 e 10,78% FC70CV10. Estes números demonstram o peso do aditivo no custo total do m³ de concreto que independe da quantidade de FC, sendo desta maneira o insumo com maior peso específico na composição do custo.

3.4 Indicador global de sustentabilidade

Ao analisar a tabela 4 constata-se que a mistura com melhor indicador global de sustentabilidade é o FC70CV10 com 0,87, seguido do FC60 com 1,01, FC50 com 1,08 e por fim o REF com 1,41. Também é possível depreender que a classificação dos traços, quanto ao indicador global de sustentabilidade, segue a ordem inversa da quantidade FC como pode ser constatado na figura 1.

Assim quanto mais elevada for a quantidade de FC menor o valor do indicador global de sustentabilidade e mais sustentável é o traço. A classificação do Is vem corroborar os resultados prévios dos diversos índices apresentados anteriormente como: eco-indicador 99, consumo de energia, consumo de água, geração de resíduos, mudanças climáticas, emissão de CO_{2eq}, formação de material particulado e esgotamento fóssil. Na totalidade dos índices citados foi observado o mesmo comportamento, ou seja, quando a quantidade de FC se eleva o valor do índice diminui.

Outra forma de análise dos valores referentes ao Is, Ia e Ic é apresentada na figura 3, observando-se a posição relativa dos parâmetros uns em relação aos outros de modo a obter-se uma visão mais clara do contexto da sustentabilidade nas misturas estudadas. O índice de impacto ambiental (Ia) está totalmente contido dentro do índice de custo (Ic) indicando que, na totalidade das misturas, o parâmetro ambiental possui um desempenho melhor que o econômico.

138

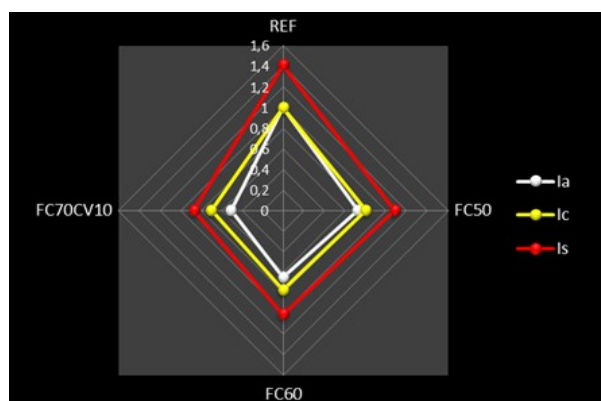


Figura 03 – Indicador global de sustentabilidade – gráfico tipo “radar”.

Fonte: Os Autores

A exceção a este comportamento é o REF que possui o mesmo valor para Ia e Ic indicando uma boa ecoeficiência, ou seja, um equilíbrio entre ambos os aspectos, todavia, devido ao valor unitário elevado o traço ficou classificado em último lugar.

A constatação de que as misturas com maiores quantidades de FC são mais eficientes na ótica ambiental pode ser verificada na figura 4 através do plano de ecoeficiência. Na referida figura, constata-se que a linha diagonal em branco indica a tendência de um dado traço ao equilíbrio entre os aspectos ambientais e econômicos.

Desta forma quanto mais próximo um traço estiver desta linha diagonal melhor será seu desempenho relativo em relação a estes dois aspectos. Já do ponto de vista absoluto o melhor resultado é aquele que mais se aproxima da origem por apresentar os menores valores nos aspectos ambientais e econômicos. Também observa-se que acima da linha diagonal branca está a área de prevalência do cenário econômico e abaixo o cenário ambiental.

Assim, na figura 4, foram plotados os pontos referentes a cada traço onde verifica-se que aqueles com maiores quantidades FC estão mais próximos da origem como é o caso do primeiro colocado (FC70CV10) nas coordenadas 0,70; 0,51. No lado oposto observa-se o REF nas coordenadas 1;1 o qual foi classificado em último lugar apesar de possuir um equilíbrio entre os aspectos ambientais e econômicos (linha diagonal branca). Com isso verifica-se que a melhor classificação está relacionada com a posição relativa de um ponto próximo a linha diagonal e a origem, concomitantemente, como é o caso do FC70CV10.

Também na figura 4 nota-se que as misturas estudadas possuem uma relevância maior do aspecto ambiental em relação ao econômico verificada pelo posicionamento das mesmas na área do “cenário ambiental”. Nota-se que quanto mais bem classificado é o traço mais distante da linha diagonal de ecoeficiência ele se encontra e maior é a prevalência do aspecto ambiental sobre o econômico. Desta maneira pode-se concluir que a incorporação do FC acarreta uma diminuição proporcional maior nos impactos ambientais do que na redução dos custos.

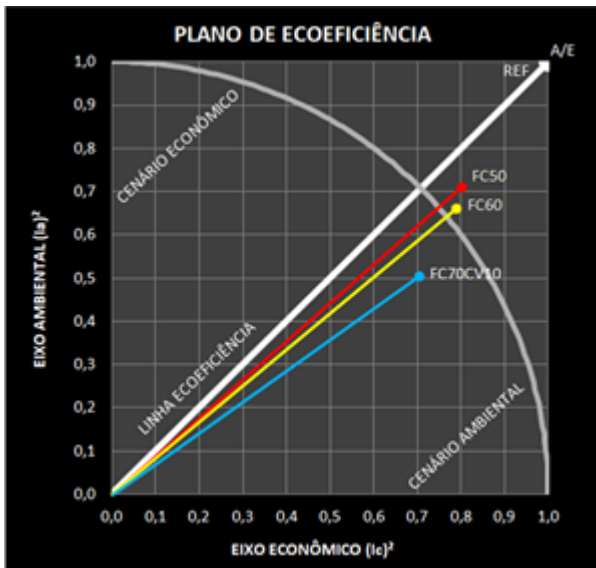


Figura 04 - Plano de ecoeficiência.
Fonte: Os Autores

3 CONCLUSÕES

Partindo-se da premissa que a troca do CP por FC tem o potencial de reduzir as consequências danosas do concreto no meio ambiente, pode-se constatar que o REF apresentou os maiores valores na totalidade dos índices ambientais estudados e o FC70CV10 os menores. Da mesma forma o traço REF apresentou o maior valor de custo do metro cúbico de concreto e por outro lado o FC70CV10 o menor.

Assim, o traço FC70CV10 (1º lugar) apresentou o melhor indicador global de sustentabilidade e o REF (4º lugar) o pior, sendo que, com a elevação da quantidade de FC na mistura, mais sustentável é o traço. Pode-se confirmar a performance do FC70CV10 pelas considerações de De Matos et al. (2019) e Yousuf et al. (2019) onde é colocado que a elevação da resistência à compressão nos concretos conduz a uma minoração na relação da quantidade do CP por MPa. No presente caso o REF teve um consumo de 3,33 kg de CP por MPa, por outro lado o FC70CV10 obteve 1,87. Desta maneira, nas misturas estudadas, a elevação da resistência à compressão conduziu a uma majoração no consumo de CP por MPa.

Lima (2010) também propõe que a utilização de concretos com resistências mais elevadas acarreta uma minoração da quantidade de material usado apesar da emissão unitária de CO_{2eq} ser maior, contudo poderá ocorrer uma redução nas emissões totais. Ao comparar os traços REF e FC70CV10, no que concerne ao

custo, verifica-se que $0,7 m^3$ do primeiro equivale a $1 m^3$ do segundo, sendo que o primeiro emite $4,69 kg_{CO_{2eq}} \cdot MPa^{-1}$, enquanto o segundo $4,11 kg_{CO_{2eq}} \cdot MPa^{-1}$. Todavia $0,7 m^3$ do REF emite $418,07 kg_{CO_{2eq}}$, enquanto $1 m^3$ do FC70CV10 possui uma emissão total de $212,83 kg_{CO_{2eq}}$, ou seja, uma diferença de 96,73%.

Assim, mesmo ocorrendo uma elevação na resistência à compressão, com uma diminuição de volume, a emissão total do REF é maior do que o FC70CV10 mostrando o impacto positivo da troca de CP por FC e suas consequências nos parâmetros que medem a sustentabilidade. Assim a utilização dos índices de resistência (MPa^{-1}) e emissão de CO_{2eq} ($kg_{CO_{2eq}}$) podem demonstrar os benefícios econômicos e ambientais do FC70CV10 o que vem a corroborar o resultado obtido na ACV e CCV.

Desta maneira, o trabalho mostrou a viabilidade da elaboração de concretos com teores elevados de FC, iguais ou acima de 50%, tendo em vista os resultados apresentados em relação a ACV e CCV. Com isso, pode-se dizer que os concretos propostos possuem os requisitos necessários para serem utilizados em estruturas de concreto armado do ponto de vista da sustentabilidade.

A partir deste estudo é possível um maior conhecimento à respeito do emprego de quantidades elevadas de FC devido ao desempenho apresentado em relação a sustentabilidade. Assim, constata-se que a inserção, em estruturas de concreto armado, de concretos com elevadas quantidades de FC, pode ser adotada considerando sua viabilidade técnica (maior resistência à compressão) e ambiental (menores teores de CP), baseada na performance das misturas estudadas.

REFERÊNCIAS

- ABCV. Associação Brasileira do Ciclo De Vida. **Site da entidade**. São Paulo: ABCV, 2020.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 15686-5: Edifícios e ativos construídos - Planejamento de vida útil - Parte 5 - Custo do ciclo de vida**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blücher, 2011.

BIERER, A. *et al.* Integrating life cycle costing and life cycle assessment using extended material flow cost accounting. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1289-1301, 2015.

CBCS. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Avaliação de ciclo de vida modular**. São Paulo: CBCS, 2014.

DE MATOS, P. R., SAKATA, R. D., PRUDÊNCIO, L. R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 941-955, 2019.

GCCA. Global Cement and Concrete Association. **GNR project reporting CO₂**. London: GCCA, 2017.

KJELLEN, K. O.; GUIMARAES, M.; NILSSON, A. **The CO₂ balance of concrete in a life cycle perspective**. Taastrup: Danish Technological Institute, 2005.

OSTERMEYER, Y.; WALLBAUM, H.; REUTER, F. Multidimensional Pareto optimization as an approach for site-specific building refurbishment solutions applicable for life cycle sustainability assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 1762-1779, 2013.

REAL, S. A. C. F. **Contributo da análise dos custos do ciclo de vida para projectar a**

sustentabilidade na construção. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

TCPO. Tabela de Composições e Preços para Orçamentos. **Tabela de composição de preços para orçamento**. São Paulo, PINI, 2020.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

YOUSUF, S.; SANCHEZ, L. F. M.; SHAMMEH, S. A. The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry. **Journal of Building Engineering**, v. 25, pp.100-114, Out. 2019.

AUTORES

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8536-6105>

GUSTAVO DE AGUIAR ISAIA (GAI), Dr. | Engenharia Civil (FACENS) | Sorocaba, SP, Brasil | Correspondência para: Rodovia Senador José Ermírio de Moraes, 1425 - Jardim Constantino Matucci, Sorocaba, SP, CEP 18085-784 | e-mail: gustavoaisaia@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5169-735X>

SILVANE SANTOS DA SILVA (SSS), Doutoranda | Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) | PPGECC | Santa Maria - RS | Correspondência para: Rua Elpídio de Menezes, 195/302; CEP 97105110, Santa Maria - RS | e-mail: silvaneengciv@hotmail.com

COMO CITAR ESSE ARTIGO

DA SILVA, Silvane Santos; ISAIA, Gustavo de Aguiar. Acv e ccv em concretos com elevados teores de filer calcário. **MIX Sustentável**, v. 8, n. 3, p. 130-141, mai. 2022. ISSN-e: 24473073. Disponível em: <http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>. DOI: <http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n3.130-141>.

Submetido em: 22/12/2021

Aprovado em: 06/05/2022

Publicado em: 31/05/20222

Editora Responsável: Lisiane Ilha Librelotto

Registro da contribuição de autoria:

EXEMPLO:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

GAI: conceituação, aquisição de financiamento, metodologia, visualização, escrita -rascunho original.

GAI e SSS: curadoria de dados, análise formal, administração do projeto, escrita -revisão e edição

SSS: investigação, validação

Declaração de conflito: nada foi declarado