

Selection of low impact concrete mixtures based on life-cycle assessment mixtures

Contribuição da avaliação de ciclo de vida na seleção de misturas de concreto de menor impacto ambiental



M. G. SILVA ^a
margomes.silva@gmail.com

V. GOMES ^a
vangomes@gmail.com

M. R. M. SAADE ^b
marcellarms@hotmail.com

Abstract

Over the past decades, extensive research has been carried out to reduce the environmental impacts associated with the cement and concrete production. Life-cycle assessment (LCA) enables the quantification of the environmental loads and offers a useful perspective to scientifically support such studies. In this paper, we demonstrate LCA's contribution to the selection of low environmental impact concretes, using breakwater coreloc components as a case study. A detailed experimental study was designed for the selection of an alkali activator for blast furnace slag (bfs) to produce concrete suitable for breakwater structures; for the evaluation of concrete properties and for the performance assessment of full scale elements in the field, as well as in the laboratory. Sodium silicate-activated bfs concrete mixtures achieved the best results in terms of performance requirements. Our cradle-to-gate life-cycle assessments showed that, though this chemical activator indeed produces lower global warming potential mixtures than the reference portland CP V-ARI concrete, it induces relevant impacts in several environmental categories. Such information is critical when selecting and optimizing low-impact concrete mixture design, and would not be detected in typical experimental studies that are exclusively guided by compliance with performance requirements.

Keywords: life cycle assessment, breakwaters, alkali activated binders, blast furnace slag.

Resumo

Ao longo das últimas décadas, inúmeras pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de reduzir os impactos ambientais da produção de cimentos e concretos. Por auxiliar na quantificação das cargas ambientais, a técnica de avaliação de ciclo de vida (ACV) oferece uma perspectiva particularmente útil a tais estudos. Neste artigo, demonstra-se a contribuição da ACV na seleção de concretos de menor impacto ambiental, utilizando componentes para contenção de ondas marinhas (tipo coreloc) como estudo de caso. Um programa experimental teve como objetivo selecionar um ativador alcalino para escória de alto-forno adequado ao processo de produção, avaliar propriedades de corpos-de-prova de concreto e o desempenho de componentes em escala natural, em campo e em laboratório. A ativação da escória de alto-forno por silicato de sódio alcançou os melhores resultados para os critérios de desempenho selecionados. Entretanto, as avaliações de ciclo de vida do 'berço ao portão' demonstraram que, apesar de realmente reduzir o potencial de aquecimento global em relação ao concreto com CP V-ARI, o emprego deste ativador traz impactos relevantes em várias categorias ambientais. Estas são informações cruciais para seleção e otimização da dosagem de concretos de menor impacto ambiental, e não seriam detectadas em estudos experimentais exclusivamente orientados a desempenho.

Palavras-chave: avaliação de ciclo de vida, componentes para contenção de ondas, ligantes álcali-ativado, escória de alto-forno.

^a Federal University of Espírito Santo, Technology Center, Department of Civil Engineering, Vitória, ES, Brazil;

^b University of Campinas, School of Civil Engineering, Architecture and Urbanism, Department of Architecture and Construction, Campinas, SP, Brazil.

1. Introdução

O cimento Portland é responsável por 74 a 81% do total de emissão de CO₂ do concreto [1]. Por sua vez, a produção do clínquer Portland responde por cerca de 90% do total de emissão de CO₂ do cimento, em decorrência da descarbonatação do calcário e do uso intensivo de combustível fóssil no forno [2][3].

A partir deste cenário, várias pesquisas e estudos têm sido direcionados para a redução dos impactos ambientais da fabricação do cimento, priorizando o desenvolvimento de cimentos com redução do teor de clínquer; a substituição do calcário por outras matérias-primas; a utilização de mixes alternativos de combustíveis, o aumento da eficiência térmica e/ou elétrica dos fornos e a captura e o armazenamento de carbono [4][5].

Em 2015, o Programa das Nações Unidas “*Sustainable Building and Climate Initiative*” criou um grupo de trabalho para prospectar alternativas tecnológicas viáveis para reduzir a emissão de CO₂ e aumentar a eficiência ao longo da cadeia de valor do cimento, focando, particularmente, soluções em termos de materiais [6]. As principais conclusões deste estudo são que, nos próximos 20 ou 30 anos, duas abordagens podem contribuir significativamente para redução de emissões relativas à produção e ao uso de cimento e concreto: o aumento do uso de adições minerais como substituto parcial do clínquer do cimento Portland; e uso mais eficiente do clínquer do cimento Portland em argamassas e concretos [6]. O entendimento daqueles autores é que os cimentos Portland devem continuar dominando o mercado, ao menos em um futuro próximo, devido à economia de escala, ao nível de otimização do processo de produção, à disponibilidade de matéria-prima e à confiança do mercado nesses produtos. Também em 2015, foi iniciado o desenvolvimento do Brazilian Cement Technology Roadmap pela indústria de cimento nacional, alinhado com estratégias e diretrizes do Global Cement Roadmap [4] e da CSI/WBCSD [7]. Esta iniciativa, coordenada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pelo Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), mapeou o estado atual e futuro (2050) da indústria de cimento no Brasil, em termos de emissões de CO₂ e de suas principais alternativas de redução. Uma visão estratégica sobre adições minerais e outros substitutos do clínquer foi realizada, com o objetivo de identificar potencialidades, desafios e oportunidades a serem consideradas em planos de ação para mitigar essas emissões em um cenário potencial de crescimento de produção de cimento [2]. Cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa estão entre os aluminossilicatos residuais utilizados como substitutos parciais do clínquer na fabricação de cimento Portland [2]. Filer calcário e argilas calcinadas são outras adições minerais que, na forma de misturas ternárias com clínquer, despontam como alternativas de redução de emissão de CO₂ da cadeia de cimento e concreto em um cenário de insuficiência de geração de adições minerais residuais [6]. Esses autores defendem, inclusive, que o teor de filer calcário pode ser também aumentado por meio do controle das dimensões das partículas e pelo uso de aditivos dispersantes, resultando em cimentos com reduzida demanda por água [6].

No início de 2018, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) reativou o CE-018:100.001, com o objetivo de revisar as normas brasileiras de especificação de cimento Portland, tendo como uma das linhas de discussão questões relativas ao aumento de adições minerais no cimento, de forma semelhante ao que já está acontecendo na comunidade europeia, na revisão da EN197-1: 2011 [8].

O uso de misturas binárias, ternárias ou mesmo quaternárias, produzidas a partir da combinação de diferentes adições minerais e clínquer Portland, tem motivado algumas trajetórias de pesquisa [5][6]. O desenvolvimento de ligantes constituídos a partir da ativação de sílico-aluminatos, como cinza volante, escória de alto-forno ou metacaulim, por solução de hidróxidos, carbonato e silicatos alcalinos, tem atraído a atenção de pesquisadores de diversas partes do mundo [9] [10]. Scrivener et al. (2016) [6] ponderam que a contribuição desses ligantes na mitigação de emissão de CO₂ depende, de um lado, da disponibilidade do material a ser ativado - como escória de alto-forno, muito mais simples de ser utilizada como adição mineral na fabricação de cimento Portland, cinza volante e argila calcinada - e, de outro, de tecnologias para produção de ativadores alcalinos de menor custo e menos intensivas no uso de energia e em emissões.

Os estudos em ligantes e concretos produzidos por ativação alcalina foram iniciados nos anos 30, com a análise pioneira de Kuhl sobre a pega de misturas de escória de alto-forno moída e uma solução de KOH. Pesquisas subsequentes realizadas por Purdon, na década de 40, e Glukhovskiy, nos anos 60, configuram outros marcos importantes. Esforços em ligantes álcali ativados à base de escória de alto-forno progrediram significativamente nas décadas de 80 e 90 [9]. O interesse em pesquisas sobre ligantes álcali-ativados foi particularmente impulsionado por preocupações ambientais e cresceu exponencialmente nos anos 2000, devido à possibilidade de obtenção de elevadas resistências mecânicas e atendimento das exigências de durabilidade, com potencial redução de consumo de energia e de emissão de gases de efeito estufa [10][11].

Este cenário de pesquisa ensejou uma série de projetos de P&D para estrategicamente prospectar possibilidades para valorizar coprodutos siderúrgicos, particularmente a escória de alto-forno. Dentre estas iniciativas, o desenvolvimento de componentes tipo ‘coreloc’ para contenção de ondas marinhas foi iniciado em 2002. Um estudo experimental detalhado foi desenhado para selecionar um ativador alcalino para a escória de alto-forno adequado a esta aplicação, e, ao mesmo tempo, avaliar propriedades físicas, mecânicas e a durabilidade, com base em testes de laboratório de corpos-de-prova de concretos produzidos por ligantes de escória de alto-forno álcali-ativada. Componentes em escala natural também foram monitoradas em campo e em laboratório [12][13].

A demonstração da competitividade destes ligantes do ponto de vista de desempenho ambiental tornou-se fundamental para apoiar a continuidade de investigações no tema. A avaliação de ciclo de vida (ACV), regida pelas normas ISO 14040:2006 [14] e ISO 14044:2006 [15], consolidou-se ao longo da última década, o que a posiciona como uma adição valiosa a ensaios de laboratório e de campo, por constituir a plataforma mais apropriada para comparação dos impactos ambientais de alternativas de ligantes e concretos [16].

O objetivo deste artigo é demonstrar que o emprego de avaliação de ciclo de vida complementa a abordagem tradicionalmente orientada ao cumprimento de requisitos de desempenho, e fornece informação fundamental para seleção de concretos de menor impacto ambiental.

2. Materiais e métodos

Uma abordagem teórica e experimental detalhada foi estabelecida para otimizar o projeto do componente para contenção de ondas marinhas (tipo coreloc) e a dosagem dos concretos avaliados.

Tabela 1

Características físicas do cimento Portland CP III-40 RS, do ligante com 50% de CP III-40 RS e 50% de escória de alto-forno moída e do cimento CP V-ARI

Ensaio		CP III-40 RS ¹	50% CP III-40 RS + 50% escória de alto-forno moída	CP V-ARI ²
Finura - Resíduo na peneira de 0,075 mm (%)		0,6	0,4	0,01
Pega	Início (h:min,)	2:50	2:30	2:00
	Fim (h:min,)	4:20	4:30	2:25
Expansibilidade Quente (mm)		0	1	0
Massa específica (kg/m ³)		2.986	2,94	3,09
Superfície específica Blaine (cm ² /g)		4.220	4.150	4.817
Resistência à compressão axial (MPa)	1 dia	-	-	26,0
	3 dias	16,9	14,2	39,8
	7 dias	31,7	23,4	43,8
	28 dias	49,5	42,8	50,6

Fonte: ¹os autores e ²o fabricante

Utilizamos um framework triplo para análise. Primeiramente, para selecionar o ativador alcalino e o(s) ligante(s) produzido(s) por ativação alcalina da escória de alto-forno a prosseguir para a fase de investigação aprofundada. A segunda perspectiva envolveu a avaliação de desempenho em campo e em laboratório de componentes imersos em água do mar. Finalmente, a terceira lente de análise compreendeu avaliações de ciclo de vida do 'berço ao portão', que limitam as fronteiras do sistema à dosagem apropriada e à produção de componentes, para os concretos que atenderam as exigências de projeto de componentes para contenção de ondas marinhas, seguindo as diretrizes da ISO 14044:2006 [15].

A aplicação da ACV depende de uma série de definições cruciais, tais como: fronteiras do sistema, unidade funcional, critério de alocação, escolha do método para avaliação de impactos ambientais e fontes de dados de primeiro (isto é: coletados especificamente

para o estudo) e/ou segundo plano (dados genéricos), contidos em bases de dados.

O exame da literatura indica que poucos autores quantificaram o impacto ambiental de ligantes álcali-ativados: [17][18][19][20][21]. Dentre aqueles que se valeram de avaliação de ciclo de vida, a maioria realizou estudos do 'berço ao portão' [16]. Quanto à unidade funcional, Habert e Ouellet-Plamondon [16] concluíram que concretos com teor de pasta similares oferecem uma base de comparação mais apropriada e caracterizam a equivalência funcional necessária para comparação em ACV. Estas duas decisões metodológicas foram também adotadas no presente estudo.

Tabela 3

Principais características químicas do cimento Portland CP V-ARI

Composição química	Teor (%)
Anidro sulfúrico (SO ₃)	2,87
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,20
Resíduo insolúvel	0,46
Perda ao fogo	3,80

Fonte: o fabricante

Tabela 4

Composição química da escória granulada de alto-forno moída

Composição química	Teor (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	33,02
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	12,64
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,68
Óxido de cálcio (CaO)	42,83
Óxido de magnésio (MgO)	7,71
Enxofre (S)	1,06
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,17
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,31
Óxido de titânio (TiO ₂)	0,60

Fonte: os autores

Tabela 2

Composição química do cimento Portland CP III-40 RS

Composição química	Teor (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	29,88
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	9,92
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	1,43
Óxido de cálcio total (CaO)	50,95
Óxido de magnésio (MgO)	5,78
Anidro sulfúrico (SO ₃)	0,69
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,09
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,36
Enxofre (S)	0,62
Anidro carbônico (CO ₂)	0,15
Óxido de cálcio livre (CaO)	2,30
Óxido de titânio (TiO ₂)	0,38
Resíduo insolúvel	0,35
Perda ao fogo	0,32
Equivalente alcalino em Na ₂ O (0,658 x K ₂ O%+Na ₂ O%)	0,33

Fonte: os autores

Tabela 5

Composição química e características físicas da escória granulada de alto-forno moída

Composição química	Teor (%)
Dióxido de silício (SiO_2)	33,02
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	12,64
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	0,68
Óxido de cálcio (CaO)	42,83
Óxido de magnésio (MgO)	7,71
Enxofre (S)	1,06
Óxido de sódio (Na_2O)	0,17
Óxido de potássio (K_2O)	0,31
Óxido de titânio (TiO_2)	0,60
Finura na peneira nº 325 (%)	0,4
Superfície específica Blaine (cm^2/g)	4.100
Massa específica (kg/m^3)	2.906

Fonte: os autores

2.1 Materiais empregados

Foram utilizados ligantes produzidos a partir de ativação da escória granulada de alto-forno por clínter (proveniente de cimento CP III-40 RS, com aproximadamente 70% de escória de alto-forno), cal CH I, silicato de sódio (módulo de sílica igual a 1,62; teor de sólidos 47,78%) e gipsita (finura inferior a 0,075mm). O grau de vitrificação e o índice de refração da escória granulada de alto-forno de natureza básica foram, respectivamente, 96% e 1,65. A composição química e as características físicas da escória granulada de alto-forno empregada na produção dos ligantes álcali-ativados são compatíveis com dados da literatura e com as prescrições das normas brasileiras. Da mesma forma, a escória granulada de alto-forno tem características físicas compatíveis com as exigências de normas brasileiras para agregados miúdos e com os dados da literatura, apresentando, no entanto, forma angulosa. Como agregado graúdo, foi empregada uma escória bruta de alto-forno, obtida por resfriamento lento, britada nas granulometrias de brita 1 e de brita 2. A caracterização dos materiais está apresentada nas Tabela 1 a Tabela 12 e nas Figura 1 a Figura 4.

A Tabela 13 apresenta os quantitativos de materiais utilizados em cada concreto de ligante de escória de alto-forno álcali-ativada para modelagem da avaliação de ciclo de vida. Para comparação com os resultados das avaliações de ciclo de vida dos concretos da Tabela 13, foram elaboradas dosagens experimentais de concretos

Tabela 6

Grau de vitrificação, índice de refração e características físicas da escória granulada de alto-forno

Ensaio	Resultado
Grau de vitrificação (%)	96
Índice de refração	1,65
Natureza	Básica
Módulo de finura	2,94
Dimensão máxima característica	2,4 mm
Massa específica	2,80 kg/dm^3
Massa unitária no estado solto	1,28 kg/dm^3
Teor de materiais pulverulentos	0,18 %
Teor de argila em torrões e partículas friáveis	0,1 %

Fonte: os autores

Tabela 7

Características físicas da areia

Características físicas	
Dimensão máxima característica	2,4 mm
Módulo de finura	2,56
Teor de materiais pulverulentos	0,14%
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	0,00%
Impurezas orgânicas húmicas	Mais clara
Massa específica	2,65 kg/dm^3
Massa unitária no estado solto	1,43 kg/dm^3

Fonte: os autores

com agregados naturais e cimentos Portland (CP V-ARI e CP III-40 RS) (Tabela 14), e realizadas avaliações de ciclo de vida desses concretos. O cimento CP V-ARI (~90% de clínter e 6% de filer calcário) aproxima-se do OPC (ordinary Portland cement) e permite comparabilidade com publicações internacionais; enquanto o CP III-40 RS (~24% de clínter, 70% de escória de alto-forno e 1,8% de filer calcário), além de representar a alternativa com menor teor de clínter normalizada nacionalmente, é o tipo de cimento mais empregado na região de estudo. Estes cimentos eram provenientes de uma mesma planta, utilizavam o mesmo clínter e as mesmas fontes de adições minerais.

Todos os concretos foram dosados experimentalmente, tendo o método do American Concrete Institute (ACI) como referência,

Tabela 8

Características físicas da escória bruta de alto-forno nº 1 e nº 2

Característica	Escória bruta B1	Escória bruta B2
Dimensão máxima característica	19 mm	32 mm
Módulo de finura	6,98	7,20
Massa específica	2,56 kg/dm^3	2,55 kg/dm^3
Massa unitária no estado solto	1,32 kg/dm^3	1,24 kg/dm^3
Teor de materiais pulverulentos	1,54%	1,28%
Teor de argila e partículas friáveis	1,55%	1,28%
Abrasão Los Angeles, 40% B1 e 60% B2	28%	28%

Fonte: os autores

adotando 46,6 MPa como resistência à compressão de dosagem aos 28 dias de idade (fck igual a 40MPa, desvio padrão de 4MPa). O teor de pasta (27%), o teor de argamassa (58%), a relação água/materiais secos (9,4%), a relação água/ligante (0,45) e o tra-

Tabela 9

Características físicas das britas nº 1 e nº 2

Características físicas	Content (%)
Dimensão máxima característica	19,0 mm
Módulo de finura	6,93
Teor de materiais pulverulentos	0,43%
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	0,16%
Massa específica	2,77 kg/dm ³
Absorção	0,50%
Massa unitária no estado solto	1,47 kg/dm ³
Massa unitária no estado compactado	-
40% brita nº. 1 + 60% brita nº 2	1,60 kg/dm ³
Abrasão Los Angeles, 40% brita nº. 1 + 60% brita nº 2	38%

Fonte: os autores

Tabela 10

Composição química e características físicas da cal hidratada CH I

Composição química	Teor (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	0,93
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,27
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,36
Óxido de cálcio (CaO)	72,48
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	0,14
Óxido de sódio (Na ₂ O)	-
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,07
Perda ao fogo	25,28
Material retido na peneira no 30 (g)	0
Material retido na peneira no 200 (g)	0,37
Massa específica (kg/dm ³)	2,32

Fonte: os autores

ço unitário (1 : 1,04 : 0,62 : 0,93 : 0,45; ligante : agregado miúdo : agregado graúdo (B1) : agregado graúdo (B2): água; em massa) foram mantidos constantes em todos os concretos, e atendem à recomendação de [16] para assegurar equivalência funcional nas avaliações de ciclo de vida. Considerando o teor de sólidos do silicato de sódio (47,78%), a água de amassamento foi corrigida nas misturas com este ativador, de modo a manter constante a relação água/ligante em todas as misturas.

Tabela 11

Composição química e massa específica da gipsita

Composição química	Teor (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	5,36
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,47
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,38
Óxido de cálcio (CaO)	37,55
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	47,30
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,05
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,26
Perda ao fogo	8,85
Massa específica (kg/dm ³)	2,64

Fonte: os autores

Tabela 12

Características físicas e químicas do silicato de sódio

Item analisado	Resultados
Na ₂ O (%)	18,196
SiO ₂ (%)	29,584
Sólidos totais	47,780
Umidade	52,220
Módulo de sílica (SiO ₂ / Na ₂ O)	1,62
Densidade a 25° C (g/l)	1,605
Viscosidade a 25 °C (cP)	830
Graus ° Be	54,5

Fonte: o fabricante

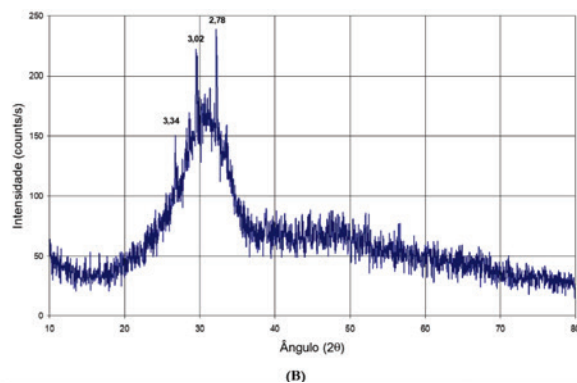
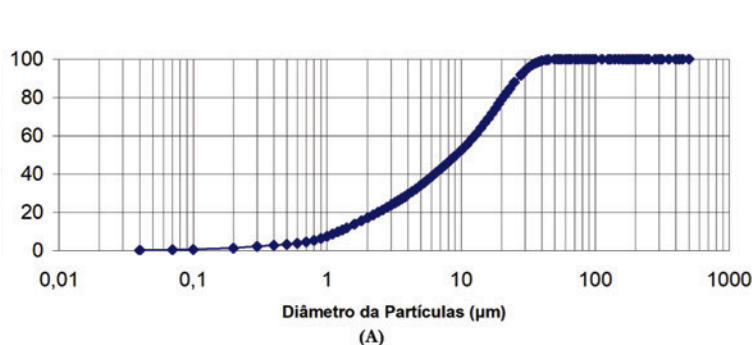


Figura 1

Curva granulométrica (A) e difratograma de Raios X (B) da escória granulada de alto-forno moída

Fonte: os autores

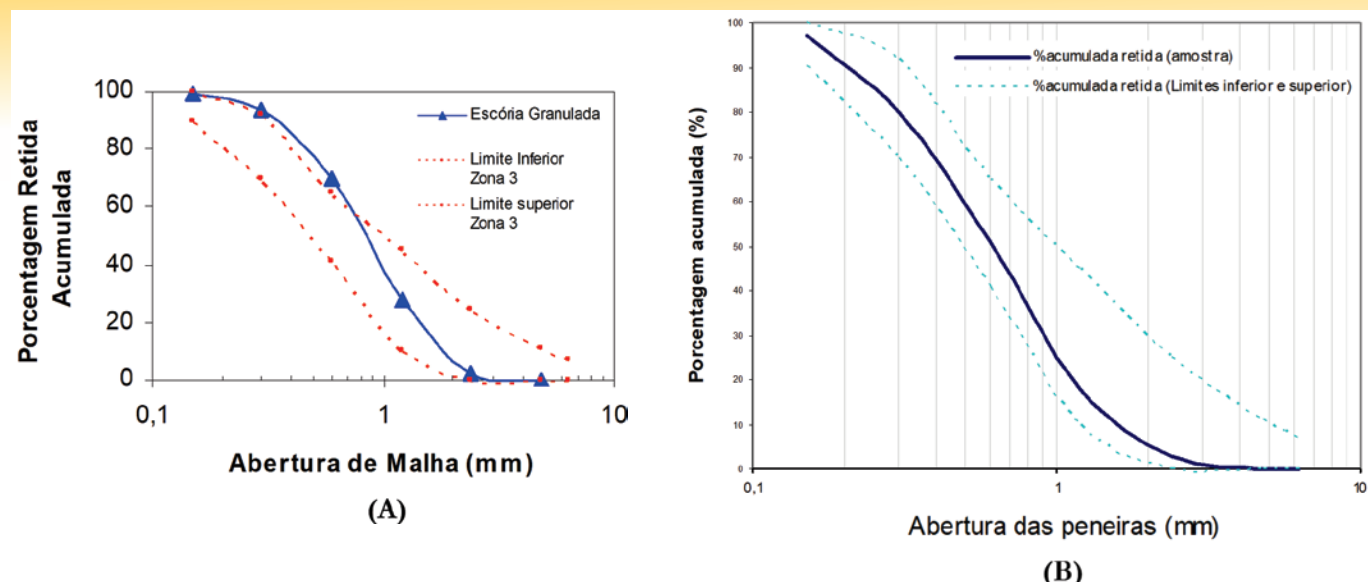


Figura 2

Curva granulométrica da escória granulada de alto-forno (A) e da areia (B)

Fonte: os autores

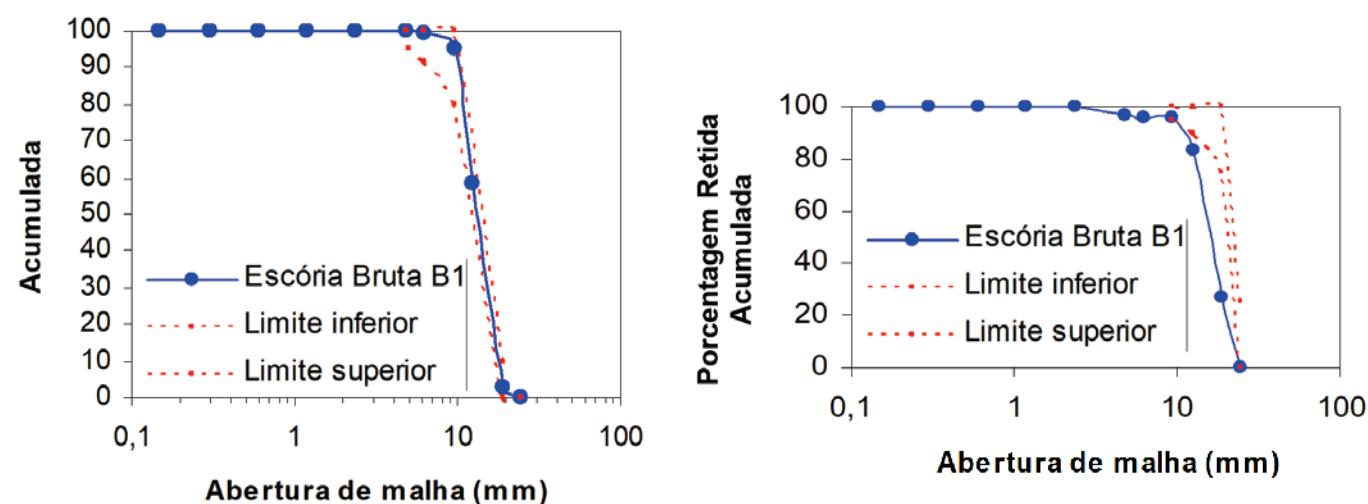


Figura 3

Curva granulométrica da escória bruta de alto-forno no 1 e no 2

Fonte: os autores

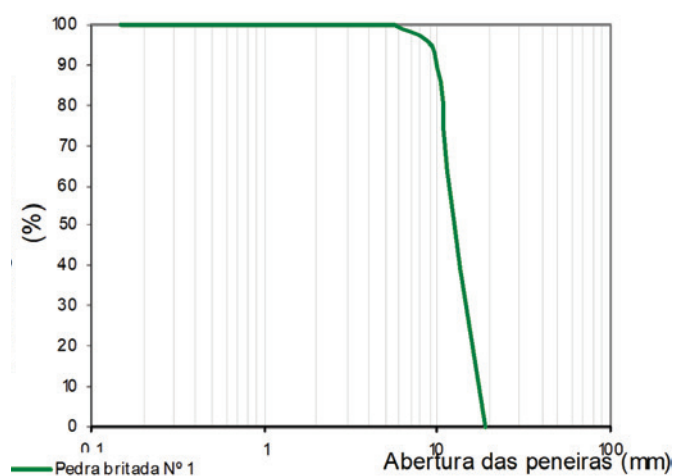


Figura 4

Curva granulométrica da brita n° 1

Fonte: os autores

2.2 Projeto dos componentes para contenção de ondas marinhas

Na definição da geometria dos componentes para contenção de ondas marinhas foram considerados o atendimento de tensões internas de flexão e de torção, utilizando o método dos elementos finitos para o cálculo destas tensões [22], e a facilidade de produção. A geometria do componente que apresentou as menores tensões internas é do tipo coreloc e encontra-se ilustrada na Figura 5. Os componentes foram dimensionados seguindo a Equação de Hudson [Equação 1], fornecida por [23].

$$W = \frac{w_r \cdot H^3}{K_d \cdot (S_r - 1)^3 \cdot \cot g(\alpha)} \quad (1)$$

Onde:

W é a massa do componente de contenção de ondas;

w_r é a massa específica do material empregado no componente de contenção de ondas;

Tabela 13

Materiais utilizados nos concretos de escória de alto-forno álcali-ativada, em kg, para modelagem da avaliação de ciclo de vida

Mistura	CP III-40 RS	Escória granulada de alto-forno moída	Cal CH I	Silicato de sódio	Gipsita	Escória granulada de alto-forno*	Escória bruta de alto-forno		Água
							B1	B2	
A	20,00	20,00	–	–	–	41,76	24,76	37,00	18,00
B	9,41	27,39	3,20	–	–	41,76	24,76	37,00	18,00
C	9,41	26,59	4,00	–	–	41,76	24,76	37,00	18,00
D3	–	31,41	2,00	6,59	–	41,76	24,76	37,00	14,55
D4	–	28,58	2,00	9,42	–	41,76	24,76	37,00	13,08
D5	–	27,01	2,00	10,99	–	41,76	24,76	37,00	12,26
E	–	36,80	0,80	–	2,40	41,76	24,76	37,00	18,00

* Usada como agregado miúdo ** Usada como agregado graúdo B1 (9,5-19 mm) e B2 (19-25 mm) | **Fonte:** os autores

Tabela 14

Materiais utilizados nos concretos de cimento Portland, em kg, para modelagem da avaliação de ciclo de vida

Mistura	CP III-32 RS	CP V-ARI	Areia	Brita B1	Brita B2	Água
CP III-32	40	–	41,76	24,76	37,00	18
CP V-ARI	–	40	41,76	24,76	37,00	18

Fonte: os autores

H é a altura da onda de projeto;

K_d é o coeficiente de estabilidade;

S_r é a relação entre a massa específica do material e a massa da específica da água (do mar); e

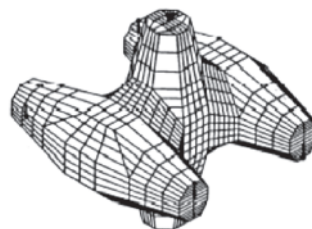
α é o ângulo de inclinação da camada de revestimento.

Os valores adotados para coeficiente de estabilidade (13) e massa específica do concreto (2300 kg/m³) foram também extraídos de [23].

2.3 Avaliação de propriedades de concretos de ligantes de escória de alto-forno álcali-ativada

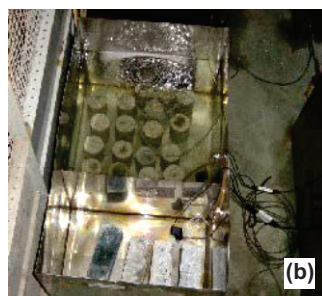
Estudos anteriores avaliaram a consistência (slump test), o teor de ar incorporado, a massa específica no estado fresco e a resistência à compressão de corpos-de-prova aos 7 e 28 dias de idade; resistência à tração na flexão e por compressão diametral, a massa específica, absorção de água, o índice de vazios, absorção de água por capilaridade e módulo de deformação de corpos-de-prova aos 28 dias de

idade; retração por secagem de corpos-de-prova aos 365 dias de idade; e resistência ao ataque de sulfato e resistência à penetração de

**Figura 5**

Geometria dos componentes para contenção de ondas marinhas (tipo coreloc)

Fonte: os autores

**Figura 6**

(a) Componentes para contenção de ondas marinhas (tipo coreloc) em ambiente marinho; (b) corpos-de-prova em tanque simulando o ambiente marinho; (c) corpos-de-prova na câmara úmida

Fonte: os autores



Figura 7

Componentes retirados do ambiente marinho, após 1 ano

Fonte: os autores

íons cloreto de corpos-de-prova de concretos com ligantes de escória de alto-forno álcali-ativada [12][13].

Dez componentes em escala natural ficaram em ambiente marinho durante um ano para avaliação da durabilidade (Figura 6a, Figura 7). Após este período, foram extraídos testemunhos e preparados corpos-de-prova para avaliação da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, massa específica, absorção, índice de vazios e difusão de cloretos.

Em paralelo, corpos-de-prova de controle foram mantidos por um ano em tanques com água do mar, com simulação do movimento de maré por um sistema de bombeamento (Figura 6b), e em ambiente de câmara úmida (Figura 6c). Após este período, foram avaliadas a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral,

Tabela 15

Fontes de dados para modelagem do ciclo produtivo dos constituintes dos concretos

Material ¹	Fonte
Escória de alto-forno	Relatórios de indústria siderúrgica ²
Cimento CP III-40	SILVA, 2006b [34]
Gipsita	Base de matéria-prima do SimaPro 7.3 ³
Cal hidratada	Ecoinvent v.2.2
Calcário	
Clínquer	
Água	
Silicato de sódio	
Areia	
Granito ⁴	

[1] as matrizes energéticas dos dados internacionais foram adaptadas para a matriz brasileira; [2] os dados de produção da escória de alto-forno foram retirados de relatórios encaminhados ao órgão ambiental, disponibilizados por uma siderúrgica; [3] base de dados do SimaPro 7.3 para matérias-primas sem processamento industrial; [4] adaptado dos dados de produção da brita basáltica da base de dados Ecoinvent v2.2.

Fonte: os autores

massa específica, absorção, índice de vazios e difusão de cloretos. Os resultados obtidos foram analisados utilizando técnicas de estatística descritiva. Para determinar as diferenças estatisticamente significantes (nível de significância de 5%) entre as médias dos resultados das propriedades supracitadas, foram utilizados testes de hipóteses paramétricas (ANOVA e Duncan).

2.4 Avaliação de ciclo de vida (ACV) dos concretos

Para cada concreto funcionalmente conforme - isto é: misturas que atendam aos requisitos e critérios de desempenho normalizados e/ou definidos para as condições de serviço - foram realizadas ACVs do 'berço ao portão', observando as diretrizes metodológicas da ISO 14040: 2006 [14], e utilizando a plataforma SimaPro 7.3 [24]. A unidade funcional definida para comparar as diferentes misturas de concretos foi "uma unidade de resistência característica à compressão (1MPa)". A Tabela 15 indica as fontes de dados utilizadas na modelagem do ciclo produtivo dos concretos. Na indisponibilidade de dados locais, foi utilizada a base de dados Ecoinvent v.2.2, substituindo a matriz energética apresentada naqueles processos pela matriz brasileira.

As limitações atuais para regionalização de dados da versão 3.0 da base Ecoinvent, e para transitar pelas diferentes versões da plataforma SimaPro e métodos de avaliação de impactos ambientais nelas disponíveis, dificultam a comparação direta com resultados recentemente publicados por alguns autores, como [16]. Optamos, então, por manter o uso do SimaPro v.7.3, da nossa adaptação da base Ecoinvent v.2.2, para avaliação de processos no Brasil, e do método de avaliação de impacto CML baseline 2001 v.2.05, que empregamos em estudos anteriormente publicados [25][26].

Uma vez modelados os processos produtivos e obtidos os respectivos inventários para cada concreto, calculamos os seguintes indicadores de ciclo de vida: (i) energia renovável (Eren) e (ii) energia não-renovável (Enren); (iii) potencial de aquecimento global (GWP); (iv) potencial de acidificação (AP); (v) potencial de eutrofização (EP); (vi) potencial de criação de ozônio fotoquímico (POCP); (vii) potencial de depleção da camada de ozônio (ODP); (viii) pegada de água azul (bWF); e (ix) consumo de matéria-prima não renovável (NRC). Os sete primeiros indicadores compõem a estrutura mínima de categorias de impacto ambiental das declarações ambientais de produtos de materiais e componentes de construção, normalizadas pela EN 15804: 2012 [27].

Os dois primeiros indicadores, energia renovável (Eren) e energia não-renovável (Enren), investigam o uso de recursos energéticos ao longo do ciclo de vida de um produto e auxiliam na indicação e priorização de potenciais de economia de energia. O terceiro indicador, associado ao potencial de aquecimento global (GWP), mensura as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida do produto avaliado e é de extrema relevância em processos notadamente intensivos em termos de emissão de carbono, como é o caso da clínquerização. Os indicadores de potencial de acidificação (AP) e de eutrofização (EP) mensuram efeitos que afetam diretamente ecossistemas, contribuindo para sua depleção. A acidificação, causada pela emissão de substâncias ácidas ou que, combinadas a elementos naturalmente presentes na

atmosfera, tornam-se ácidas, impacta na qualidade do solo, do ar e das águas, além de atacar estruturas construídas pelo homem. A eutrofização, por sua vez, é fenômeno causado pelo excesso de macro nutrientes no ambiente, causado por emissões de (primariamente) matéria orgânica ao ar, água e solo. O indicador potencial de criação de ozônio fotoquímico (POCP) mensura potenciais níveis de formação de ozônio troposférico, substância reativa tóxica para seres humanos e ecossistemas. O potencial de depleção da camada de ozônio (ODP) mensura as emissões de diferentes gases clorofluorocarbonados (ou semelhantes) que contribuem para o aumento da depleção da camada, que, por sua vez, permite que maior radiação UV-B alcance a superfície terrestre, afetando a saúde humana, animal, ecossistemas terrestres e aquáticos. Além de obrigatórios em declarações ambientais de produtos de materiais e componentes de construção, os indicadores acima descritos são utilizados na maioria dos estudos de avaliação de ciclo de vida [28]. Os últimos dois indicadores, apesar de pouco documentados em declarações ambientais de produtos de materiais e componentes de construção, reportam informações de uso de recursos muito relevantes para concretos: (i) a pegada de água azul é medida direta do consumo de água potável ao longo do ciclo de vida do produto avaliado, e (ii) o consumo de matéria-prima não renovável soma todos os elementos abióticos consumidos durante o ciclo de vida do produto. Ambos apontam para o potencial de depleção dos recursos naturais mensurados na atividade estudada. A consideração dos indicadores que fogem à típica investigação de emissões de carbono em avaliações de ciclo de vida de concreto permite que, à medida em que caminhamos para concretos "carbono-eficientes", outros impactos ambientais sejam também controlados a fim de evitar a transferência de problemas ambientais.

O cálculo da pegada de água azul (bWF) seguiu o procedimento proposto por [29], aplicando um filtro na análise de inventário de forma a somar o consumo de água superficial e subterrânea de diferentes fontes no ciclo de vida [Equação 2]. Analogamente, o cálculo do consumo de matéria-prima não renovável soma as entradas de recursos minerais no ciclo de vida [Equação 3].

$$bWF = \left(\sum_{i=1}^n bW_i \text{ por unidade funcional} \right) \quad (2)$$

Onde:

bWF é a pegada de água azul, em m³/MPa;

bWi é a fonte de água azul, superficial ou subterrânea, identificada no inventário de ciclo de vida; e

n é o número de fontes de água azul identificadas.

$$NRc = \left(\sum_{i=1}^n NR_i \text{ por unidade funcional} \right) \quad (3)$$

Onde:

NRc é o consumo de matéria-prima não renovável, em kg/MPa;

NRi é a matéria-prima não renovável identificada no inventário de ciclo de vida; e

n é o número de diferentes tipos de matéria-prima não renovável identificados.

Para o cálculo da energia primária embutida (E, representando todos os recursos energéticos utilizados desde a extração de matéria-prima para fabricação do concreto), utilizamos o método

Cumulative Energy Demand (CED), que totaliza as entradas de energia primária no ciclo de vida de determinado produto, em MJe. Os cálculos das frações de energia renovável e não-renovável foram feitos separadamente, seguindo a Equação [4].

$$E = \left(\sum_{i=1}^n E_i \text{ por unidade funcional} \right) \quad (4)$$

Onde:

E é a energia primária embutida nas misturas de concreto, em MJ_e/MPa, proveniente de fontes renováveis (E_{ren}) e não renováveis (E_{nren});

E_i é a fonte de energia primária identificada no inventário de ciclo de vida; e

n é o número de fontes de energia primária identificadas.

O potencial de aquecimento global (GWP), de acidificação (AP) e de eutrofização (EP), de criação de ozônio fotoquímico (POCP) e de depleção da camada de ozônio (ODP) foram calculados utilizando o método CML baseline 2001 v.2.05. O cálculo do potencial de aquecimento global consistiu na multiplicação da massa de gases de efeito estufa (GEE) emitidos por seus fatores de emissão equivalente [Equação 5].

$$GWP = \left(\sum_{i=1}^n GWP_i \times m_i \text{ por unidade funcional} \right) \quad (5)$$

Onde:

GWP representa o potencial de aquecimento global, em kg de CO_{2e}/MPa;

GWP_i é o fator de equivalência de potencial de aquecimento global para cada gás de efeito estufa (GEE) considerado pelo CML 2001 v.2.05;

n é o número de gases de efeito estufa (GEE) considerados; e

m é a emissão de cada gás de efeito estufa (GEE), em massa.

Analogamente, os potenciais de depleção da camada de ozônio (ODP, expresso em kg de CFC-11-equivalente/MPa), de acidificação (AP, expresso em kg de SO₂-equivalente/MPa), de eutrofização (EP, expresso em kg de PO₄-equivalente/MPa); e de criação de ozônio fotoquímico (POCP, expresso em kg de etileno-equivalente, C₂H₄-equivalente/MPa) foram calculados pela multiplicação do fator de equivalência de potencial de impacto para cada substância considerada pelo CML 2001 v.2.05, em cada categoria, por suas respectivas massas.

Para resolver problemas de multifuncionalidade intrínsecos ao caso de concretos confeccionados a partir de ligantes alcali-ativados à base de coprodutos [30], refinamos o cálculo da abordagem do impacto evitado tradicional, comumente utilizado em avaliações de ciclo de vida de processos multifuncionais [31]. A abordagem do impacto líquido evitado [17][18] considera o balanço das cargas geradas e evitadas pelo uso do coproduto e o distribui com base no problema inicial evitado por cada indústria envolvida. Desta forma, o impacto evitado pela indústria siderúrgica refere-se às cargas de fim de vida da escória de alto-forno, enquanto o impacto evitado pela indústria cimenteira refere-se à dispensa da produção de clínquer, substituído, por sua vez, pela escória de alto-forno. Adicionalmente, realizamos uma análise de sensibilidade utilizando a alocação de impactos [15] como método de distribuição. Foram adotados os critérios de alocação com base na massa e no valor econômico do ferro gusa e da escória de alto-forno.

3. Apresentação e discussão de resultados

3.1 Resistência à compressão e consistências dos concretos de cimento Portland

A Tabela 16 apresenta os resultados de consistência (slump test) e de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade de corpos-de-prova de concretos de cimento Portland. A análise de variância (5% significância) demonstra não haver diferença significativa entre as resistências à compressão aos 28 dias de idade dos concretos com os cimentos CP III-40 RS e CP V-ARI. O teste de Duncan (5% significância) também identificou um grupo homogêneo, representado pelas resistências à compressão aos 28 dias de idades dos concretos com os dois cimentos Portland. As resistências à compressão obtidas atendem ao fck adotado no projeto dos componentes.

3.2 Seleção de ativador e do concreto de ligante de escória de alto-forno álcali-ativada

A Tabela 17 reúne os resultados de consistência (slump test) e de resistência à compressão, aos 7 e 28 dias de idade, de corpos-de-prova dos concretos de ligantes de escória de alto-forno álcali-ativada confeccionados. Os concretos de ligantes de escória de alto-forno que utilizaram clínquer (Mistura A), clínquer + cal (misturas B e C), cal + gipsita (mistura E) e silicato de sódio com 3% Na₂O (mistura D3) como ativadores não atenderam ao fck adotado no projeto dos componentes e foram descartados.

Já os concretos de ligantes de escória de alto-forno ativada por silicato de sódio nos teores de 4% e 5% de Na₂O (misturas D4 e

D5, respectivamente), atenderam à resistência à compressão de projeto. A mistura D4 foi selecionada para prosseguir nas avaliações por apresentar adequada resistência à compressão ao menor teor de ativador.

3.3 Propriedades do concreto de ligante de escória de alto-forno álcali-ativada selecionado (mistura D4)

A Tabela 18 apresenta os resultados de consistência (slump test), teor de ar incorporado e massa específica no estado fresco da mistura D4. A Tabela 18 apresenta, ainda, os resultados de resistência à compressão (corpos-de-prova aos 7 e 28 dias de idade); de resistência à tração na flexão e por compressão diametral, massa específica, absorção de água, o índice de vazios, absorção de água por capilaridade e módulo de deformação (corpos-de-prova aos 28 dias de idade); retração por secagem (corpos-de-prova aos 365 dias de idade); e resistência ao ataque de sulfato e resistência à penetração de íons cloreto de corpos-de-prova confeccionados com a mesma mistura.

A Tabela 19 reúne os resultados de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, massa específica, absorção, índice de vazios e difusão de cloretos de corpos-de-prova imersos em tanques com água do mar, que simulavam o movimento de maré, e de corpos de prova da mistura D4 mantidos em ambiente de câmara úmida. Nesta mesma tabela, estão os resultados de corpos-de-prova de testemunhos extraídos do componente confeccionado com a mistura D4, após um ano em ambiente marinho.

Todas as misturas produzidas em betonadas diferentes tiveram suas resistências à compressão e abatimentos registrados, para efeito de

Tabela 16

Consistências (slump test) e resistências à compressão de concretos de cimento Portland. A análise de variância (5% significância) demonstra não haver diferença significativa entre as médias. O teste de Duncan (5% significância) identificou um grupo homogêneo (CP III + CP V)

Mistura	Ligante	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)	
			7 dias	28 dias
CP III	Cimento Portland CP III-40 RS	100	40,35	48,47
CP V	Cimento Portland CP V-ARI	110	43,06	50,16

Fonte: os autores

Tabela 17

Consistências (slump test) e resistências à compressão de concretos de ligantes de escória de alto-forno álcali-ativada. A análise de variância (5% significância) demonstra haver diferença significativa entre as médias. O teste de Duncan (5% significância) identificou cinco grupos homogêneos (E; D3; B+C; A e D4+D5)

Mistura	Ligante	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)	
			7 dias	28 dias
A	Clínquer Portland	110	28,5	36,1
B	Clínquer Portland + cal	50	18,0	25,1
C	Clínquer Portland + cal	70	17,6	24,8
D3	Silicato de sódio, 3% Na ₂ O	190	17,6	22,1
D4	Silicato de sódio, 4% Na ₂ O	70	41,4	48,4
D5	Silicato de sódio, 5% Na ₂ O	150	46,8	49,7
E	Cal + Gipsita	30	13,0	16,2

Fonte: os autores

Tabela 18

Propriedades de corpos-de-prova confeccionados com a Mistura D4

Propriedades	Mistura D4
Abatimento (mm)	220,00
Ar incorporado (%)	2,20
Massa específica no estado fresco (kg/m^3)	2.274,00
Resistência à compressão (7 dias) (MPa)	42,50
Resistência à compressão (28 dias) (MPa)	48,40
Resistência à tração na flexão (28 dias) (MPa)	5,52
Resistência à tração por compressão diametral (28 dias) (MPa)	3,60
Massa específica (28 dias) (g/cm^3)	2,48
Absorção (28 dias) (%)	6,93
Índice de vazios (28 dias) (%)	14,64
Absorção de água por capilaridade (28 dias) (g/cm^2)	2,20
Módulo de deformação ($0.3f_c$) (28 dias) (GPa)	28,71
Ataque de sulfatos (%) – (solução de sulfato)	0,01
Ataque de sulfatos (%) – (solução com cal)	0,02
Resistência à flexão aos 90 dias de idade (MPa) – (solução de sulfato)	6,42
Resistência à flexão aos 90 dias de idade (MPa) – (solução com cal)	7,34
Retração por secagem (365 dias) (%)	0,09
Difusão de cloretos (C)	941 (muito baixa)

Fonte: os autores

melhor caracterização. É digno de nota a diferença de abatimento de misturas D4 produzidas em dias diferentes (Tabela 17 e Tabela 18), em ambiente de laboratório não refrigerado. Alguns pesquisadores citam que a própria intensidade de mistura pode resultar em aumento de temperatura por atrito, com aceleração de pega, endurecimento e alteração de trabalhabilidade [32].

A análise das Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19 evidencia que a mistura D4 é adequada à produção de componentes para contenção de ondas. Destacam-se a elevada resistência mecânica, reduzida difusão de cloretos, elevada resistência ao ataque de sulfatos, durabilidade em ambiente marinho. A retração exige cuidado com a cura na etapa de produção, e a absorção é compatível com a porosidade observada em concretos de ligantes de escória de alto-forno ativada com silicato de sódio. Essa linha de resultados foi explorada em outras publicações [9][10][11][12][13].

3.4 Avaliação do ciclo de vida dos concretos

A Figura 8 apresenta os valores obtidos para cada categoria de impacto em relação ao concreto com CP V-ARI (eixo vertical). Barras negativas, à esquerda do eixo, indicam desempenho ambiental superior ao do concreto com CP V-ARI. Como esperado, o emprego de CP III-40 RS em vez de CP V-ARI no concreto resulta em reduções consideráveis em todas as categorias de impacto, variando de 54% (consumo de matéria-prima não renovável) a 150% (potencial de aquecimento global). Também como esperado [33], a mistura D4 apresenta desempenho significativamente superior ao concreto com

Tabela 19

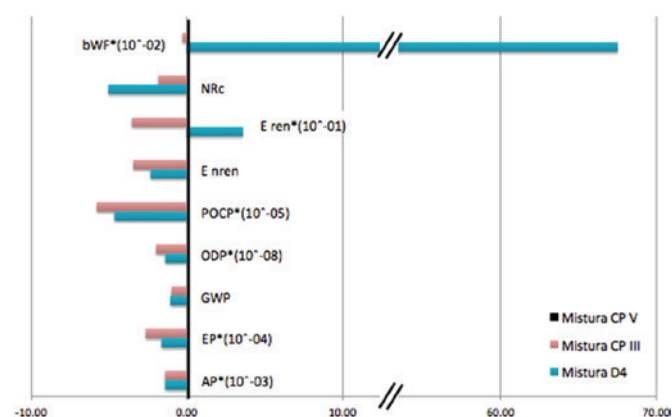
Propriedades de corpos-de-prova da mistura D4 em tanques com água do mar com simulação do movimento da maré [1] e em câmara úmida [2], e de testemunhos extraídos de componentes em escala natural após 365 dias de exposição ao meio marinho [3]

Propriedades	Mistura D4			
	28 dias	365 dias		
		[1]	[2]	[3]
Resistência à compressão (MPa)	48,4	54,1	50,2	51,9
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	3,60	4,12	4,10	3,82
Massa específica (g/cm^3)	2480	2530	2535	2660
Absorção (%)	6,93	8,02	7,92	7,21
Índice de vazios (%)	14,64	16,82	16,73	16,00
Difusão de cloretos (C)	941	653	481	823

Fonte: os autores

CP V-ARI, para todas as categorias, exceto energia renovável e, notavelmente, pegada de água azul. Estas categorias são amplamente influenciadas pelos elevados consumos de energia na produção de silicato de sódio, e de água na granulação da escória de alto-forno. No entanto, se comparada à alternativa de menor impacto ambiental atualmente disponível comercialmente (concreto com CP III-40 RS), a melhoria adicional de desempenho trazida pela mistura D4 limita-se a reduções de ~10% no potencial de aquecimento global e ~80% no consumo de matéria-prima não renovável, enquanto ocorre um aumento considerável em todas as demais, exceto potencial de acidificação, que se mantém.

A Figura 9, por sua vez, aponta que a contribuição do silicato de sódio, apesar de pequena para potencial de aquecimento global, é

**Figura 8**

Resultados das avaliações de ciclo de vida da mistura D4 e do concreto com CP III-40 RS, em relação ao concreto com CP V-ARI (eixo vertical): quanto mais à esquerda do eixo, melhor o desempenho ambiental

Fonte: os autores

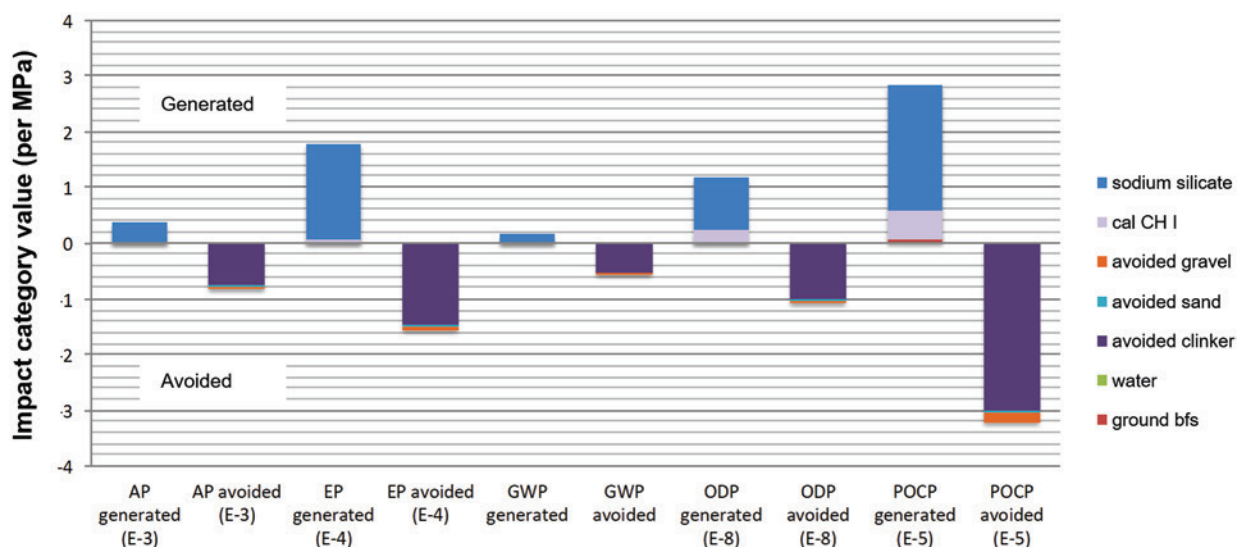


Figura 9

Análise de contribuição dos constituintes da mistura D4 nos resultados das categorias de impacto calculadas pelo CML baseline 2001 v.2.05

Fonte: os autores

considerável para as demais categorias de impacto calculadas pelo método CML baseline 2001 v.2.05, particularmente nos potenciais de oxidação fotoquímica (POCP) e de eutrofização (EP).

Em atendimento à determinação da ISO 14044: 2006 [15], analisamos a sensibilidade dos resultados à variação de métodos de distribuição de impactos na modelagem do processo multifuncional que gera a escória de alto-forno e demais coprodutos. Analisamos os resultados das misturas contendo coprodutos (D4 e CP III) para as categorias de impacto calculadas pelo CML baseline 2001 v.2.05,

considerando, além da abordagem do impacto líquido evitado, a alocação segundo os critérios de valor econômico e massa (Figura 10). Observa-se que as categorias potencial de aquecimento global (foco usual em avaliações ambientais de concretos) e de depleção da camada de ozônio são pouco sensíveis ao método de distribuição de impactos. Afora estas duas categorias, para o concreto com CP III-40 RS (~28 kg de escória de alto-forno, no ligante), apenas o potencial de oxidação fotoquímica (POCP) varia notavelmente, enquanto que, para a mistura D4, com teor de escória de alto-forno muito superior (~133 kg de escória de alto-forno, entre ligante e agregados), todas as categorias são bastante sensíveis, principalmente o potencial de oxidação fotoquímica (POCP). Em que pese esta variação, a mistura D4 sempre apresenta desempenho ambiental inferior ao do concreto com CP III-40 RS. É possível afirmar, ainda, a importância de se ir além de potencial de aquecimento global e considerar outras categorias de impacto cresce à medida em que a busca por concretos e cimentos ambientalmente superiores afasta-se dos ligantes à base de clínquer.

O processo de seleção de misturas aqui apresentado foi composto por três estágios de análise. O estágio 1 identificou que apenas os concretos com cimento CP III-40 RS e CP V-ARI e os concretos de ligantes à base de escória de alto-forno ativada por silicato de sódio D4 e D5 atenderam às exigências de desempenho funcional. Dentre os concretos de ligantes à base de escória de alto-forno ativada por silicato de sódio, a mistura D4 foi selecionada para prosseguir para o segundo estágio de análise em campo e laboratório. Ao final do estágio 2, o atendimento a exigências de desempenho funcional sugeria a seleção da mistura D4 (concretos de ligante à base de escória de alto-forno ativada por silicato de sódio constituído por 71,5% de escória de alto-forno moída, 5% de cal CH I e 23,5% de silicato de sódio, em massa) para a confecção dos componentes para contenção de ondas marinhas (tipo coreloc). Faltava determinar e validar seu benefício ambiental

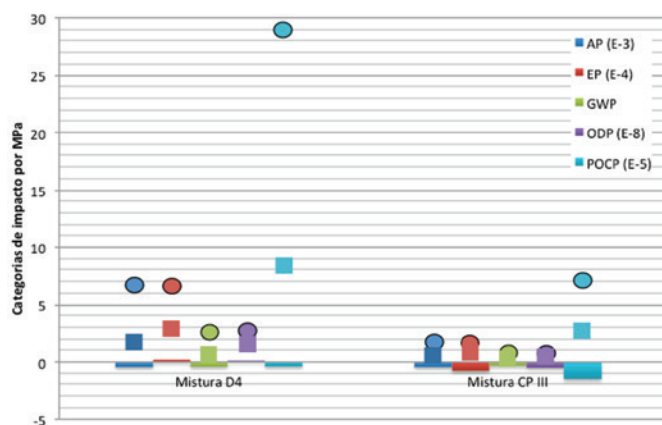


Figura 10

Análise de sensibilidade das categorias de impacto calculadas pelo CML baseline 2001 v.2.05 ao critério de distribuição de impactos: abordagem do impacto líquido evitado (colunas); e alocação por valor econômico (quadrados) e por massa (círculos)

Fonte: os autores

em relação a concretos tradicionais, como os confeccionados com o cimento Portland.

No terceiro estágio de análise, as avaliações de ciclo de vida do 'berço ao portão' mostraram claramente que o emprego do silicato de sódio como ativador de escória de alto-forno contribui muito pouco para o potencial de aquecimento global. Isto permite fornecer concretos funcionalmente adequados à aplicação em componentes para contenção de ondas a um potencial de aquecimento global 161% menor que o esperado para concretos com cimento CP V-ARI (~90% de clínquer, em massa), um resultado que é ligeiramente melhor (10%) que o obtido para concreto com cimento CP III-40 RS (~24% de clínquer, em massa). Entretanto, excluído o próprio potencial de aquecimento global da análise, o uso deste ativador no sistema ligante apenas supera o desempenho do concreto com CP III-40 RS para conteúdo não renovável (NRC). Os impactos em várias categorias ambientais são relevantes, e crescem com o aumento do teor de silicato. Esta situação não seria detectada em estudos experimentais típicos orientados a desempenho. Dirigir a escolha de dosagem com base exclusivamente em potencial de aquecimento global a ignoraria por completo.

4. Conclusões

Dentre as alternativas para a redução dos impactos ambientais de cimentos e concretos, sobretudo aqueles relacionados a emissão de CO₂, o emprego de adições minerais em substituição ao clínquer e o desenvolvimento de ligantes álcali-ativados têm atraído pesquisas em diversas partes do Brasil e do mundo. No entanto, a contribuição destes ligantes na mitigação de emissão de CO₂ depende da disponibilidade do material a ser ativado e de tecnologias para produção de ativadores alcalinos de menor custo, e menos intensivas em termos de energia e em emissões.

Para o caso analisado neste artigo – componentes de quebramar – demonstramos que, havendo disponibilidade de escória de alto forno, é possível produzir concretos a base de ligantes álcali-ativados que atendam aos requisitos de desempenho impostos pela aplicação desejada e a uma emissão de CO₂ inferior aos com cimentos Portland considerados. Mais ainda, demonstramos que a avaliação ambiental deverá ir além das emissões de CO₂, pois uma estratégia pautada por um único indicador de impacto ambiental pode criar novas dificuldades, ainda que aparentemente ofereça uma solução para o problema original.

Propomos, assim, a inclusão sistemática de ACV como uma etapa metodológica na seleção de misturas de concreto de baixo impacto ambiental, ainda nos estágios iniciais de desenvolvimento, para examinar as implicações das escolhas de materiais, considerando múltiplas categorias de impacto ambiental. Independentemente dos constituintes considerados nas misturas, demonstramos como a ACV complementa a abordagem tradicional orientada a desempenho e esclarece a seleção e otimização da dosagem de concretos de baixo impacto ambiental, destacando as misturas mais indicadas para avançar nas etapas subsequentes, com economia significativa de recursos e tempo de investigação.

5. Referências

- [1] FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture. *Int. Journal of Life Cycle Assessment*. 12 (5) 292-288.
- [2] SILVA, M. G.; BATTAGIN, A. F.; GOMES, V. Cimento Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2017.
- [3] HUMPHREYS, K.; MAHASANAN, M. Toward a Sustainable Cement Industry, Substudy 8, Climate Change. *World Business Council for Sustainable Development*. 2002. 34p.
- [4] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY/WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *Cement Technology Roadmap*. 2009, 36 p.
- [5] DAMTOFT, J.S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E.M. Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 115–127.
- [6] SCRIVENER, K.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement based materials industry. *United Nations Environment Programme*. 2016.
- [7] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). *Relatório Anual, 2014*. Disponível em: <snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2014final>.
- [8] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 197-1:2011. *Cement- Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Brussels, Belgium, 2011.
- [9] PROVIS, J. L.; van DEVENTER, J. S. J. (ed.) *Alkali Activated Materials. State of the Art Report (Vol. 13)*. RILEM TC 224-AAM. Springer. 2014. 388p.
- [10] JUENGER, M.C.G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J.L.; IDEKER, J.H. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 1232–1243.
- [11] SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 750–763.
- [12] SILVA, M. G. (coordenador). *Estrutura Hidráulica de Proteção Contra a Ação de Ondas Marinhas. Relatório Técnico, Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES)*. Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo, 2006a.
- [13] COELHO, M. A. M.; SILVA, M. G.; SOUZA, F. L. S.; SARMENTO, R.; ZANDONADE, E.; MORIMOTO, T.; HELMER, J. L. Bloco de concreto tipo quebra-mar com escória de alto-forno ativada quimicamente. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais (São Paulo. Impresso)*, 2009, v.5, p.186 - 191.
- [14] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14040: *Environmental Management - Life cycle principles and Framework*. Switzerland, 2006a.
- [15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14044: *Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. Switzerland, 2006b.
- [16] HABERT, G.; OUELLET-PLAMONDON, C. Recent update on the environmental impact of geopolymers. *RILEM Technical Letters*, 1:17-23, 2016.
- [17] DAVIDOVITS, J. Environmental implications of Geopolymers. *Materials Today Plus*. 2015.

- [18] HEATH, A.; PAINE, K.; MCMANUS, M. Minimising the global warming potential of clay based geopolymers. *J Cleaner Prod*, 78: 75-83. 2014.
- [19] TURNER, L.K.; COLLINS, F.G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Constr Build Mater* (2013) 43: 125-130.
- [20] MCLELLAN, B.C.; WILLIAMS, R.P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G.D.. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *J Cleaner Prod* (2011) 19: 1080-1090.
- [21] HABERT, G.; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE, J.B., ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production* 19. 1229-1238, 2011.
- [22] MENANDRO, F. C. M.; Silva, M. G. ; Souza, F. L. S. ; Sarmiento, R. ; Zandonade, E. ; Morimoto, T.; Coelho, M. A. M. . Resposta Estrutural do Bloco Hydrus para Estrutura Hidráulica para Proteção de Ondas Marinhas. In: VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2006, São Paulo. Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo: EPUSP. v. 1. p. 1-10.
- [23] DEPARTMENT OF THE ARMY, WATERWAYS EXPERIMENT STATION, CORPS OF ENGINEERS, COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. Shore protection manual, vol II. 4th ed. Vicksburg, Miss: 1984.
- [26] GOEDKOOOP, M.; SCHRYVER, A. D.; OELE, M. Introduction to LCA with SimaPro 7. Amersfoort: Product Ecology Consultants, 2008. 82 p.
- [25] SAADE, M.; SILVA, M.; GOMES, V. Impact distribution in the steelmaking multifunctional process: a novel perspective on the avoided burden approach. In: Sustainable Built Environment Regional (SBE Zurich)_Expanding Boundaries: Systems Thinking for the Built Environment. Proceedings. Zurich, 2016c.
- [26] SAADE, M. R. M., SILVA, M. G., GOMES, V. Appropriateness of environmental impact distribution methods to model blast furnace slag recycling in cement making. *Resources, Conservation and Recycling*, v.99, p.40 - 40, 2015.
- [27] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. EN 15804. Brussels: 2012.
- [28] GUINÉE, J., GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M.A.J. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692 pp.
- [29] HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A K., ALDAYA, M. M., MEKONEEN, M. M. Water footprint assessment manual – Setting the Global Standard. 2001 London, Earthscan.
- [30] EUROPEAN UNION, 2008. (European Waste Framework) Directive 2008/98/EC of the European Parliament and the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. Official Journal of the European Union, 22/11/2008.
- [31] SAADE, M. R. M.; SILVA, M. G.; GOMES, V. O uso de distribuição de impactos em ACV's de processos multifuncionais: uma revisão sistemática da literatura publicada nos últimos 10 anos. V Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida. Anais. Fortaleza, CE. 2016bSA.
- [32] PINTO, A.T. Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino. Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal. 2004.
- [33] WEIL, M.; DOMBROWSKI, K.; BUCHWALD, A. Life-cycle analysis of geopolymers. In: Provis JL, Deventer JSJv (ed.) *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing, 2009.
- [34] SILVA, M. G. (coordenadora). Concreto de Alto Desempenho com Elevados Teores de Escória de Alto Forno: Estratégia para consolidar o Mercado da Escória de Alto Forno. Relatório Técnico, Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES). Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo, 2006b.