

Os indicadores de ecoeficiência de concretos contendo adições minerais

The eco-efficiency indicators of concretes containing mineral admixtures

Ellen Cristina Barbosa Miranda^{1}*

Gabriela Sarmiento Campos²

Edigar Andrade Macedo Neto³

Ana Lucia Santana Freitas Conceição⁴

Cleber Marcos Ribeiro Dias⁵

Recebido: out.2020 | Aceito: fev.2021

Resumo

A produção de cimento Portland é responsável por cerca de 8% das emissões de CO₂ no mundo, o que exige medidas para reduzir o consumo deste material nas novas construções. O uso de adições minerais tem sido uma alternativa para a redução do consumo de cimento nos concretos. No entanto, em diversos estudos são relatadas reduções na resistência mecânica dos concretos com a redução do consumo de cimento. Além disso, a análise da ecoeficiência dos concretos com adições tem sido pouco explorada. Este artigo compara a ecoeficiência de concretos produzidos com diferentes adições minerais, através dos indicadores intensidade de CO₂ (IC) e intensidade de ligantes (IL). Foram avaliadas 332 formulações de concreto preparadas em diversos estudos disponíveis na literatura. A determinação do IC e do IL foi feita em concretos sem adição e em concretos que possuíam em sua composição as seguintes adições minerais: sílica ativa, metacaulim, cinza da casca de arroz, cinzas volantes ou fíler calcário. A IL dos concretos produzidos nos estudos consultados variou entre 3,52-18,59 (kg/m³)/MPa, enquanto a IC variou entre 3,34-18,12 (kgCO₂/m³)/MPa, o que mostra que tanto os concretos de elevada, quanto os de baixa ecoeficiência, têm sido desenvolvidos. A sílica ativa, cinza de casca de arroz e cinzas volantes se mostraram como as adições de maior capacidade de reduzir a IL e a IC dos concretos. Os concretos produzidos com CP II E-32 e CP II F-40 apresentaram menor média de IL e os produzidos com CP IV-32 e CP II E-32, menor média de IC.

Palavras-chave: cimento Portland, concreto, consumo de ligante, adições minerais, emissões de CO₂.

Abstract

Portland cement production is responsible for around 8% of CO₂ emissions in the world, which requires measures to reduce the consumption of this material in new buildings. The use of mineral admixtures has been an alternative for reducing the cement consumption in concretes. In several studies, reductions in the mechanical strength of concretes have been reported with the reduction of cement consumption. Besides, the analysis of the eco-efficiency of concretes with additions has been little explored. This article compares the eco-efficiency of concretes produced with different mineral additions, using the indicators CO₂ intensity (CI) and binder intensity (BI). A total of 332 concrete formulations prepared in several studies available in the literature were evaluated. The determination of CI and BI was made in concretes without addition and in concretes that had the following mineral admixtures in their composition: silica fume, metakaolin, rice husk ash, fly ash, or limestone filler. The BI of the concretes produced in the consulted studies varied between 3,52 and 18,59 (kg/m³)/MPa, while the CI varied between 3,34 to 18,12 (kgCO₂/m³)/MPa, which shows that both high and low eco-efficiency concretes have been developed. The silica fume, rice husk ash and fly ash proved to be the most effective additions to reduce the CI and BI of concretes. The concretes produced with CP II E-32 and CP II F-40 had greater potential for BI reducing, while the concretes produced with CP IV-32 and CP II E-32 were the CI lowest average.

Keywords: Portland cement, concrete, binder consumption, mineral additions, CO₂ emissions.

^{1,2,3,4,5}Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Campus Federação – Salvador - BA

^{1*}Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, ellen_miranda10@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da construção civil apresenta o maior consumo de matérias-primas no mundo, sendo responsável pelo consumo de aproximadamente 50% dos recursos naturais. Dentro desta cadeia, o concreto é o material mais utilizado (UNEP, 2003 *apud* SILVA, 2019; SOUZA, 2005; JOHN *et al.*, 2018). O cimento Portland e outros ligantes representam apenas 8 a 20% da massa total do concreto (DAMINELI, 2013), ainda assim, o grande impacto ambiental do concreto está relacionado à sua produção, uma vez que os processos de combustão envolvidos na produção de cimento são uma grande fonte de emissões de dióxido de carbono (CO₂), representando cerca de 8% das emissões antrópicas globais (LEHNE e PRESTON, 2018). Diante deste cenário, a otimização das formulações de concreto através da substituição parcial do cimento por adições minerais se mostra como uma alternativa para minimizar as emissões de CO₂ associadas a esta cadeia (THE CONCRETE CENTRE, 2009). No Brasil, a utilização de adições é uma das principais estratégias adotadas pela indústria do cimento, pois, segundo o relatório Roadmap Tecnológico do Cimento (2019), apresentado com objetivo de mapear a situação atual e as tendências futuras da indústria brasileira do cimento e propor alternativas para reduzir o seu impacto ambiental, elevar o uso de adições e reduzir a quantidade de clínquer no cimento pode evitar a emissão de 290 Mt de CO₂ até 2050.

O termo adição se refere a qualquer material, além de água, aditivos, agregados e cimento, que é utilizado como um ingrediente do concreto e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura (MALHOTRA e MEHTA, 1996). Porém, na literatura em geral, as adições são definidas como materiais utilizados com objetivo de somar ou substituir, parcialmente, o cimento (FONSECA, 2010). As adições minerais são classificadas em três grupos, de acordo com os seus efeitos físico-químicos, sendo estes: materiais pozolânicos, materiais cimentantes e fíler (DAL MOLIN, 2005). Os materiais pozolânicos são aqueles que numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento, formando compostos com propriedades cimentantes (ABNT, 1992). Os materiais cimentantes independem da presença de hidróxido de cálcio para produzirem materiais com estas propriedades. O fíler, material finamente dividido e sem reatividade química, que devido a sua fina granulometria atua basicamente com função de preenchimento dos vazios na mistura, agindo através do efeito físico de empacotamento (DAL MOLIN, 2005). Devido a estas características, o uso de adições tende a reduzir o consumo de cimento, tornando a aplicação do concreto mais sustentável, além de serem, na grande maioria dos casos, resíduos de algum processo industrial, evitando o descarte irregular desses materiais (RAISDORFER, 2015).

De acordo com Damineli *et al.* (2010), a ecoeficiência do concreto pode ser avaliada utilizando-se dois indicadores: intensidade de ligantes (IL) e intensidade de CO₂ (IC). Este primeiro permite medir a eficiência do uso de cimento no concreto avaliado, relacionando-se o consumo total de cimento do concreto com seu desempenho mecânico. O segundo indicador, mede o impacto associado ao concreto, relacionando a quantidade de CO₂ emitida na produção do clínquer presente no concreto com sua resistência mecânica, permitindo, então, avaliar o potencial poluidor do concreto.

Embora o uso de adições minerais em substituição parcial do cimento seja uma estratégia usualmente adotada para redução do impacto ambiental causado pelo concreto, a análise da eficácia deste método como forma de aumentar a ecoeficiência destes concretos ainda é pouco explorada. Neste contexto, o presente trabalho propõe avaliar o potencial do uso de adições minerais na produção de concretos ecoeficientes. Para tal, realizou-se a análise da ecoeficiência de concretos com adições preparados em estudos disponíveis na literatura brasileira, utilizando os indicadores IL e IC propostos por Damineli *et al.* (2010).

METODOLOGIA

Foram avaliadas 332 formulações de concretos constantes em 44 estudos¹ (artigos, dissertações e teses) desenvolvidos no Brasil entre 1998 e 2020. As buscas foram realizadas através de bases de dados, sendo estas, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações, repositórios de Universidades Federais, SciELO e ScienceDirect, e foram delimitadas a partir do uso de palavras-chaves, como, concreto, adições minerais, substituição parcial do cimento Portland, ecoeficiência do concreto e redução da emissão de CO₂. Os concretos avaliados possuíam em sua composição as seguintes adições minerais: sílica ativa em pó (SA), metacaulim (MC), cinzas volantes (CV), cinza de casca de arroz (CCA) ou fíler calcário (FC). Para comparação, foram avaliadas também formulações de concretos sem adições, denominadas de concretos de referência (REF). Para cada formulação foram selecionadas as variáveis necessárias para a determinação dos indicadores de ecoeficiência destes concretos, sendo elas, tipo de cimento Portland, consumo de cimento e resultados de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (h = 20 cm e Ø = 10 cm) aos 28 dias.

A ecoeficiência dos concretos foi determinada através de dois indicadores de ecoeficiência do uso de cimento (DAMINELI, 2010): intensidade de ligantes (IL) e intensidade de CO₂ (IC). O indicador IL pode ser calculado através da Equação 1, onde C_{cim} é o consumo total de cimento do concreto, em kg/m³, e Rc₂₈ é a resistência à compressão aos 28 dias, em MPa. Quanto maior for este indicador, maior o teor de ligante necessário para a realização da mesma função e, conseqüentemente, menor a ecoeficiência do concreto (DAMINELI, 2013).

$$IL = \frac{C_{cim}}{Rc_{28}} \quad (1)$$

A intensidade de CO₂ permite realizar uma estimativa do potencial de contribuição da formulação ao aquecimento global. Neste trabalho, esse indicador é determinado pela razão entre a massa total de CO₂ emitida na produção do clínquer presente no concreto (E_c), em kgCO₂/m³, e a resistência à compressão aos 28 dias (Rc₂₈), em MPa, conforme a Equação 2.

$$IC = \frac{E_c}{Rc_{28}} \quad (2)$$

Para o cálculo do E_c foram feitas as seguintes considerações: 1) As emissões referentes à produção e transporte dos agregados e adições minerais foram desprezadas (DAMINELI, 2010), uma vez que, a fabricação do cimento Portland é o principal contribuinte das emissões de CO₂ (MEDEIROS, 2019). 2) De acordo com a literatura, as emissões de CO₂ na produção do cimento podem variar entre 821,1 e 1151,7 kgCO₂ por tonelada de clínquer produzido (YAMAMOTO, 1997; JOSA, 2004; OLIVEIRA, 2014), desta forma, adotou-se o valor médio de 1 kg de CO₂ emitido para cada 1 kg de clínquer produzido (DAMINELI, 2010). 3) O teor de clínquer contido em cada formulação foi determinado como a média dos limites estabelecidos nas normas vigentes do ano de publicação de cada trabalho analisado, para cada tipo de cimento, sendo estas a NBR 5732 (ABNT, 1991a), NBR 5733 (ABNT, 1991b), NBR 5736 (ABNT, 1991c), NBR 11578 (ABNT, 1991d) e NBR 16697 (ABNT, 2018). Para todos os tipos de cimento foi considerado um teor médio de sulfatos de cálcio igual 4%.

A análise estatística dos resultados foi realizada no software Minitab Statistical 19®. Através desse software foi possível gerar gráficos demonstrativos e realizar testes estatísticos (teste de normalidade, teste Tukey e teste Mann-Whitney) para validação dos resultados. Além

¹ Os trabalhos podem ser consultados nas referências [1-4], [11-12], [16-19], [21], [23-28], [31-32], [34-35], [39], [41-47], [49-51], [53-58], [60-65].

disso, realizou-se a análise preditiva no software Design-Expert 11® por meio da ferramenta de regressão destinada a métodos de superfície de resposta (MSR) e aplicada a dados históricos. Para tal, foram estabelecidos os fatores numéricos (relação água/cimento, consumo de adição e consumo de cimento), os fatores categóricos (tipo de cimento e tipo de adição) e os parâmetros de resposta (resistência à compressão aos 28 dias, intensidade de ligantes e intensidade de CO₂). As séries foram submetidas à análise de variância (ANOVA) considerando transformação logarítmica dos dados amostrais e modelo linear, parâmetros que foram definidos a partir do gráfico de distribuição de resíduos e Lei de Abrams.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste artigo foram analisadas formulações de concretos retiradas de trabalhos desenvolvidos no Brasil e produzidos com os seguintes tipos de cimento Portland: CP I S 32, CP II E 32, CP II F 32, CP II F 40, CP II Z 32, CP IV 32 e CP V ARI. A Figura 01a apresenta o percentual da distribuição dos tipos de cimentos no total de formulações de concretos estudadas, onde é possível perceber que o CP V ARI foi o cimento utilizado em 67% das formulações avaliadas. O cimento CP V ARI apresenta, em média, entre 86 a 96% de teor de clínquer em sua composição (ABNT, 1991b; OLIVEIRA *et al.*, 2014; ABNT, 2018), além disso, este é considerado um cimento mais puro, apresentando baixo teor de adições minerais (até 5% de fíler calcário), sendo geralmente escolhido para o estudo de concretos com adições, a fim de diminuir a interferência de múltiplos fatores nos resultados (RAISDORFER, 2010; DAMINELI, 2013). Na Figura 01b é possível identificar a distribuição dos tipos de cimento para cada série estudada, nota-se que 97% das formulações da série FC são compostas de CP V ARI. Observa-se também que CCA é a única série em que a maior parcela das formulações não foi produzida com CP V ARI, sendo 44% da série desenvolvida com CP II F 32. O CP II F 32 é um cimento Portland composto com fíler calcário, com classe de resistência de 32 MPa e teor de clínquer variando entre 71 a 81% da composição total (ABNT, 1991d; ABNT, 2018).

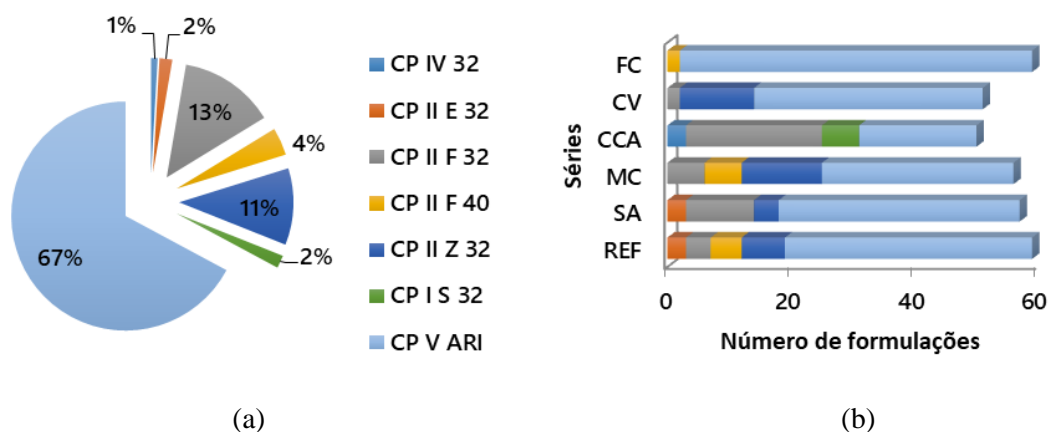


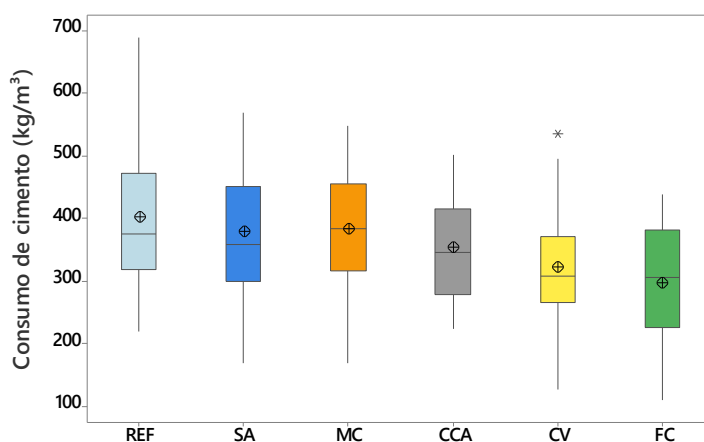
Figura 1 – Gráficos demonstrativos: a) do percentual de distribuição dos tipos de cimento no total de formulações avaliadas e; b) da distribuição dos tipos de cimento em cada série estudada

A Figura 02a apresenta o gráfico *boxplot* para os consumos de cimento dos concretos, onde é possível identificar os valores máximo e mínimo, a mediana, a média e valores limites do 1° e 3° quartil do consumo de cimento por série avaliada. É possível observar que o consumo de cimento varia de forma ampla nas diferentes séries, possibilitando uma análise abrangente da ecoeficiência dos concretos. Os concretos de referência (REF) apresentaram a maior média para o C_{cim} . Nesta série foi identificado um *outlier* ($C_{cim} = 690,0 \text{ kg/m}^3$), um valor muito afastado

da média do conjunto de dados, que foi excluído das demais análises deste artigo. Em relação aos concretos com adições, foi observado que a série CCA apresenta a menor faixa de variação do C_{cim} (de 223,0 a 502,1 kg/m³), enquanto a faixa de variação da série de concretos com fíler calcário (FC) é localizada na região de menores consumos de cimento, o que é uma indicação de que o uso deste tipo de adição é feito em concretos com menores faixas de resistência mecânica. Isto se confirma com a análise da Figura 01c.

A Figura 02b exibe o gráfico *boxplot* para os consumos de adições (C_{ad}) dos concretos. A partir desse gráfico é possível observar que os concretos com adição de fíler calcário apresentaram maior média para o C_{ad} , com faixa de variação entre 28,0 e 343,1 kg/m³, enquanto os concretos com sílica ativa e cinza de casca de arroz apresentaram menor média. Nota-se que a série SA apresentou menor faixa de variação do C_{ad} (13,6 a 90,2 kg/m³), o que indica que o uso desta adição é feito em concretos com maiores faixas de resistência mecânica, conforme apresentado na Figura 01c. Na literatura não existe uma conclusão sobre o teor ideal de sílica ativa em pó no concreto, uma vez que a definição deste teor depende de fatores, como, proporção dos materiais utilizados e propriedades desejadas ao concreto. No entanto, os teores usuais de sílica ativa são de 5 a 30% do consumo de cimento, sendo 10% o mais recomendado pelos pesquisadores (HOFFMAN, 2001), o que justifica o baixo consumo desta adição nos concretos avaliados. Em relação à influência do consumo desta adição nas propriedades do concreto no estado fresco, Liborio e Castro (2004) mostram que devido à sua elevada superfície específica, a incorporação desta adição no concreto requer uma quantidade maior de água, ou o uso de aditivos redutores de água, para alcançar a trabalhabilidade desejada, tornando-se uma desvantagem o seu elevado consumo nos concretos. Quanto ao comportamento no estado endurecido, estudos realizados demonstram que a utilização de teores de sílica ativa superiores à 15% apresentam aumento de resistência à compressão pouco significativo e aumento do custo do concreto (BIANCHINI, 2010).

Na Figura 02c é possível observar também que a sílica ativa (SA) tem sido empregada tanto em concretos com baixas resistências (~20 MPa), quanto em concretos de alta resistência (~90 MPa). Para a série FC, somente em duas formulações foram obtidas resistências entre 60 e 80 MPa. Estas foram consideradas *outliers* e não foram consideradas nas demais análises.



(a)

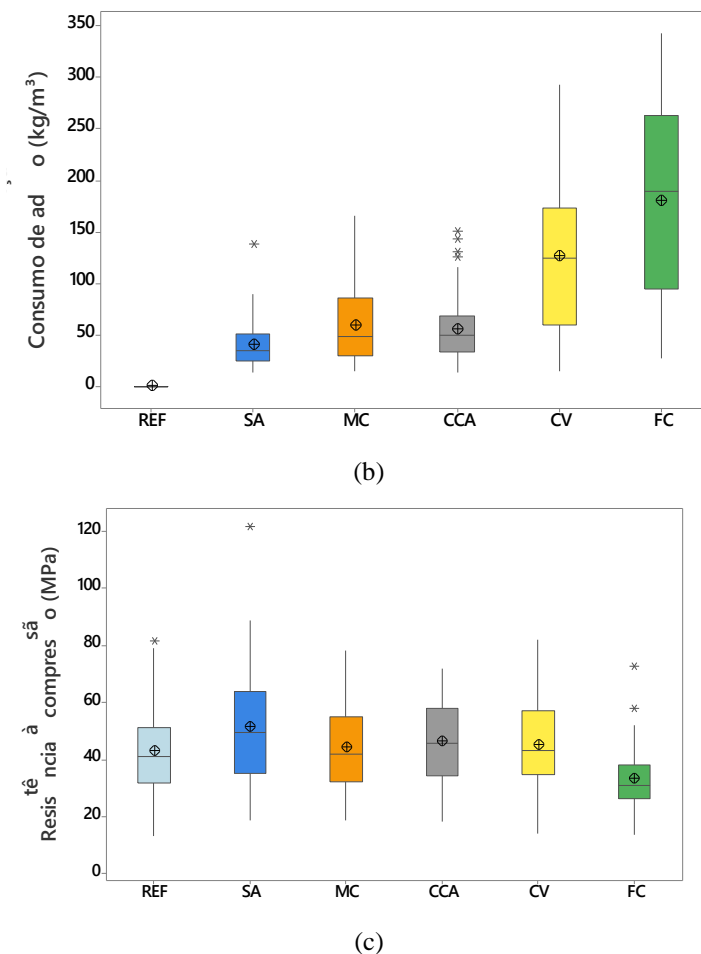


Figura 02 - *Boxplot* demonstrativo dos valores de: a) consumo de cimento por tipo de concreto estudado, b) consumo de adição e c) resistência à compressão aos 28 dias (* = *Outlier* e ⊕ = média)

Apesar dos dados serem oriundos de estudos de diferentes autores em que foram utilizados diferentes materiais, foi possível realizar uma estimativa do aumento da resistência do concreto com o uso das adições ajustando a Equação 3 (Lei de Abrams) aos dados de resistência à compressão e relação *a/c* de cada série de concreto. A Tabela 1 apresenta os parâmetros k_1 e k_2 da Equação 3 para as diferentes séries de concreto, bem como a estimativa do aumento médio de resistência à compressão com o uso das adições, em relação à série REF, para a mesma relação *a/c*. Esta estimativa foi feita comparando-se as curvas RC_{28} versus *a/c* das séries com adição com a curva da série REF. Ao observar a Figura 1, nota-se que 67% das formulações foram produzidas com CP V ARI e que todas as séries estudadas possuem trabalhos desenvolvidos com este tipo de cimento. Diante disso, visando aumentar o nível de confiabilidade da análise, optou-se por avaliar apenas as formulações produzidas com CP V ARI.

Quanto ao aumento estimado da resistência à compressão com o uso das adições, destacam-se os concretos das séries SA, MC e CCA. Para a mesma relação *a/c*, entre 0,30 e 0,50, os concretos contendo sílica ativa apresentam resistência à compressão cerca de 20 a 27% superior à dos concretos de referência, em média. As séries dos concretos com metacaulim ou cinza da casca de arroz apresentam, respectivamente, resistência à compressão cerca de 10 a 24% e 20 a 23% superior à dos concretos de referência. Nota-se que o fíler calcário promove

uma pequena redução da resistência à compressão, em média. Para os dados da série CV não foi obtido um bom ajuste para a Equação 3.

$$R_{c28} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (3)$$

Em que k_1 e k_2 são constantes e a/c é a relação água/cimento.

Tabela 1 – Constantes k_1 e k_2 e estimativa do aumento médio de resistência com o uso das adições.

Série	k_1	k_2	R^2	Estimativa do aumento da R_{c28}
REF	136,01	9,87	0,6738	---
SA	149,798	7,372	0,7518	20 a 27%
MC	125,331	5,476	0,4999	10 a 24%
CCA	174,299	11,244	0,8360	23 a 20%
CV	93,689	2,909	0,5327	0 a 25%
FC	107,374	5,729	0,6385	-7 a 4%

Intensidade de Ligantes (IL)

A Figura 03a apresenta o gráfico *boxplot* para os indicadores IL das séries de concretos. Dentre as que contêm adições minerais, as séries SA, CCA e CV apresentaram as menores médias para a IL, o que indica que a utilização destas adições permite obtermos concretos mais eficientes em termos do índice IL, embora as séries SA e CCA tenham apresentado consumos médios de cimento mais altos comparados às demais séries contendo adições. O teste de normalidade Anderson-Darling para o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicou que as ILs das séries REF, MC e FC seguem a distribuição normal. As ILs das séries SA, CCA e CV seguem uma distribuição assimétrica.

A Figura 03b apresenta o resultado do teste Tukey para as médias das ILs das séries com distribuição normal. Ao considerar um nível de significância de 5%, verifica-se que não é possível rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias das ILs dos concretos das séries REF, MC e FC. O teste Mann-Whitney, empregado para comparação envolvendo amostras com distribuição não normal, mostrou que há diferença significativa ($\alpha = 0,05$) entre a mediana das ILs da série REF e as das séries SA, CCA e CV, indicando que dentre as adições estudadas, estas são as que possuem maior capacidade de reduzir a IL dos concretos.

O fato da sílica ativa e da cinza da casca de arroz serem adições pozolânicas de alta reatividade, com altos teores de SiO_2 amorfo em suas composições (SOUZA, 2003), contribui para o aumento significativo da resistência mecânica dos concretos e, conseqüentemente, da redução da IL. É importante ressaltar que os índices IL para os concretos com cinza de casca de arroz, a depender das condições de cura, podem ser ainda melhores após 28 dias, uma vez que a resistência à compressão dos concretos contendo este tipo de pozolana tende a aumentar entre o 28º e o 180º dia (SILVA, 2019). A melhoria da resistência à compressão nos concretos com adição de sílica ativa é pouco significativa após o vigésimo oitavo dia (SOUZA, 2003).

A série FC é a que apresenta maior amplitude para a IL, variando entre 3,52 a 18,59 (kg/m³)/MPa. Os concretos das séries FC foram os que apresentaram menor média de consumo de cimento e, ainda assim, maior valor médio para a IL, o que pode ser explicado pela ocorrência das menores resistências à compressão dentre as séries. O fíler calcário é considerado ser uma adição fina que promove a redução de porosidade da mistura (FONSECA, 2016), no entanto, esta redução é obtida para teores especiais dependentes da distribuição granulométrica dos demais materiais particulados na mistura (DAMINELI, 2013; FONSECA, 2016). A incorporação desta adição em concretos de cimento Portland afeta o mecanismo e a cinética da hidratação do cimento, acelerando a hidratação dos grãos de clínquer em idades iniciais, otimizando o empacotamento de partículas da matriz cimentícia, fornecendo novos locais de nucleação para hidróxido de cálcio e permitindo a formação de carboaluminato de cálcio hidratado como resultado da reação entre o carbonato de cálcio do calcário e o aluminato tricálcico do clínquer Portland (BONAVETTI; RAHHAL; IRASSAR, 2001).

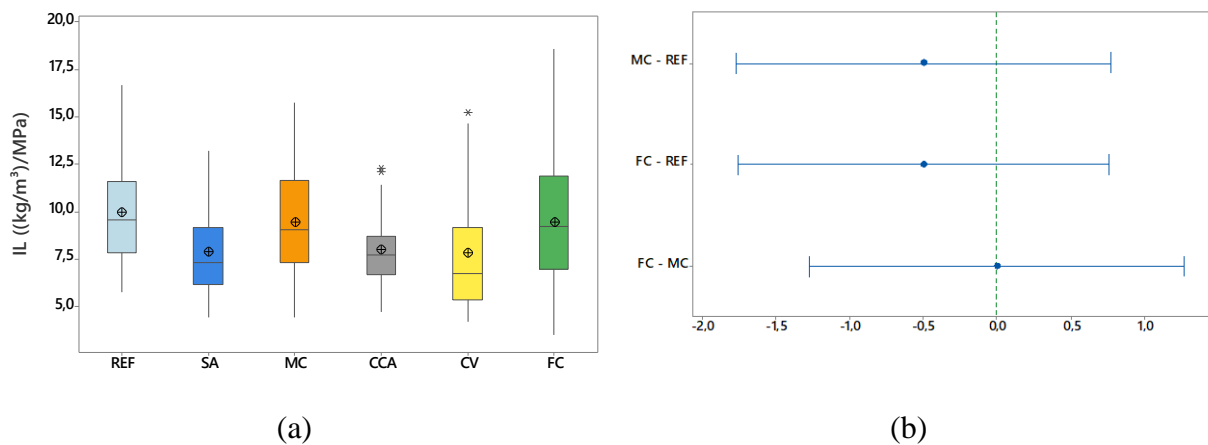


Figura 03 – a) *Boxplot* demonstrativo dos valores de IL para cada tipo de concreto estudado e b) Resultado do teste de Tukey dos valores das ILs para as séries com distribuição normal

Ao realizar uma análise das ILs de concretos com resistências à compressão inferiores à 50 MPa, observou-se que os concretos de maior ecoeficiência em relação ao indicador IL foram os da série CCA, que apresentaram IL médio de 8,89 (kg/m³)/MPa, não apresentando diferença estatisticamente significativa entre a mediana das ILs dos concretos com sílica ativa e cinzas volantes. Para concretos com Rc₂₈ superiores a 50 MPa, aqueles com adição de cinza volante apresentaram menor média (IL = 5,41 (kg/m³)/MPa) e menor faixa de variação (4,20 a 6,52 (kg/m³)/MPa), o que indica que esta adição é a melhor opção para redução da IL de concretos de alta resistência, juntamente com a série SA, uma vez que, não apresentam diferença estatisticamente significativa entre as suas médias.

Embora tenha apresentado estimativa de aumento médio de resistência à compressão similar ao da sílica ativa, ainda assim o metacaulim se mostrou como uma adição com baixo potencial para redução da intensidade de ligantes dos concretos. A Figura 04a mostra a relação entre a intensidade de ligantes e a resistência à compressão das séries MC e REF, onde é possível identificar uma distribuição de pontos homogênea. Ao sobrepor os gráficos da série MC e SA (Figura 04b), percebe-se que para os concretos com resistência inferior a 50 MPa, a série MC apresenta um aumento na dispersão de pontos em relação a SA, o que indica que os concretos com metacaulim possuem elevado consumo de cimento para uma mesma resistência mecânica. Para os concretos com resistência à compressão superior a 50 MPa, não se rejeita a hipótese de igualdade entre as médias de IL das séries MC e SA.

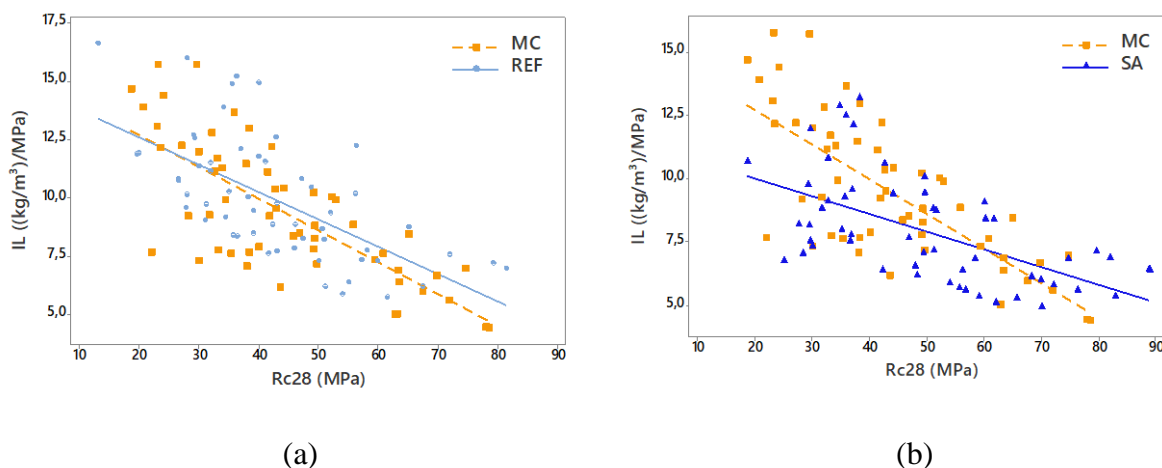


Figura 04 – a) IL versus R_{c28} das séries MC e REF e b) IL versus R_{c28} das séries MC e SA

Para entender a influência da relação água/cimento, consumo de adição, consumo de cimento e tipo de cimento no indicador IL, realizou-se análise preditiva aplicada a dados históricos no *software Design-Expert 11*®, conforme apresentado na Figura 05. A partir da Figura 05a é possível observar que a redução do fator água/cimento contribui para redução da intensidade de ligantes, uma vez que este fator está relacionado à resistência à compressão do concreto (Equação 3). As Figuras 05b e 05c apresentam a influência do consumo de adição e consumo de cimento na redução do indicador IL, onde é possível comprovar a eficácia da utilização de adições minerais em substituição parcial ao cimento Portland, em termos de redução de IL.

A Figura 05d mostra a relação entre os tipos de cimento empregados e a intensidade de ligantes do concreto. Nota-se que o CP II E 32, CP II F 40, CP I S 32 e CP V ARI apresentaram menor média de IL. Ao relacionar os tipos de cimento e a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos, Figura 05e, observou-se que os cimentos que apresentaram menor IL, foram os que alcançaram maior média de resistência à compressão, sendo o CP II E 32 e CP II F 40 os cimentos com maior potencial de redução deste indicador. Os cimentos compostos com fíler calcário (CP II F 32) e com pozolana (CP II Z 32), com classe de resistência de 32 MPa, demonstraram baixa capacidade de redução da IL, produzindo concretos com resistência à compressão média inferior aos outros tipos de cimento e, como consequência, com alta intensidade de ligantes.

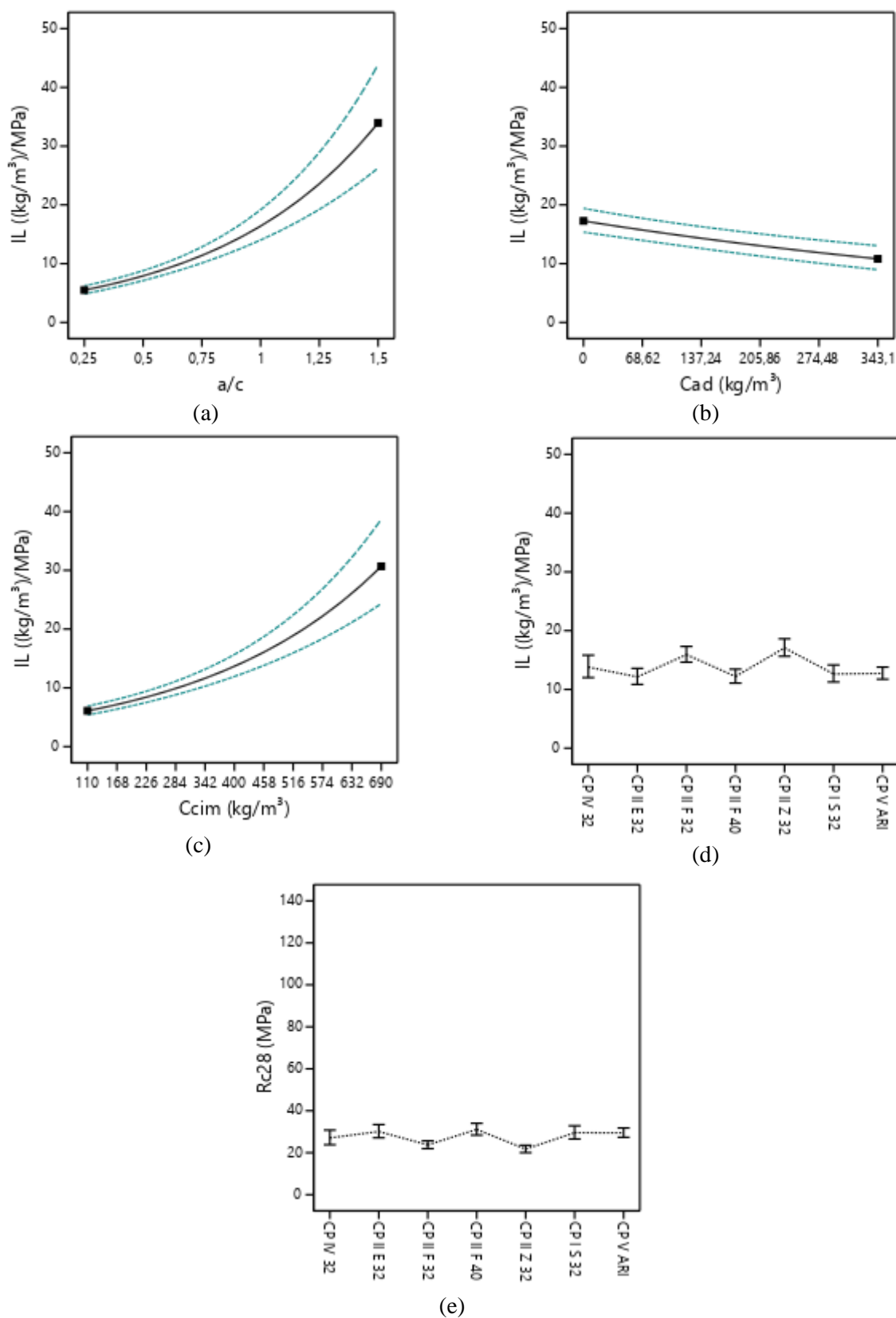


Figura 05 – Análise gráfica da relação entre a) IL e a/c, b) IL e consumo de adição, c) IL e consumo de cimento, d) IL e tipo de cimento e e) Rc₂₈ e os tipos de cimento.

Intensidade de CO₂ (IC)

A Figura 06a apresenta o gráfico *boxplot* para os indicadores IC das séries de concretos estudadas. Dentre as séries de concretos com adições minerais, as séries SA, CCA e CV apresentaram as menores médias para a IC. Embora os concretos com cinzas volantes tenham apresentado menor média, os concretos com adição de sílica ativa e cinza de casca de arroz apresentaram menor faixa de variação para IC, variando entre 4,02 a 11,63 kgCO₂/m³ e 3,82 a 10,04 kgCO₂/m³, respectivamente.

Ao realizar o teste de normalidade Anderson-Darling para o nível de significância $\alpha = 0,05$, observou-se que as ICs das séries REF, SA, MC, CCA e FC seguem distribuição normal, enquanto as ICs da série CV seguem distribuição assimétrica. A Figura 06b apresenta o teste Tukey para as médias de IC das séries que apresentaram distribuição normal. O teste Tukey a 95% de confiança indica que não existe diferença significativa entre as médias de IC dos concretos de referência e os concretos com adição de metacaulim e fíler calcário, indicando que estas são as adições com menor potencial para redução deste indicador. O teste Mann-Whitney, realizado em séries que seguem distribuição não normal, rejeitou a hipótese de igualdade entre as medianas de IC dos concretos de referência e os concretos com adição de cinza volante.

A série FC apresentou maior valor médio de IC, o que pode ser justificado devido a 97% das formulações analisadas terem sido produzidas com cimento CP V ARI (Figura 01), que possui entre 86 a 96% de teor de clínquer em sua composição. Quanto maior a parcela de clínquer, maiores emissões de CO₂ e, conseqüentemente, maior IC. Além disso, 93% das amostras estudadas de concreto com fíler calcário apresentaram resistência inferior a 50 MPa, diferente das demais adições que por possuírem efeito pozolânico, contribuem para o aumento da resistência do concreto. Em contrapartida, a amostra de concreto com adição de fíler calcário também apresentou o menor valor de IC dentre todas as formulações analisadas, mostrando que mesmo se utilizando uma adição com baixa capacidade de aumentar a ecoeficiência do concreto, outros fatores influenciam na determinação deste índice, como a relação água/cimento do concreto minimizada pelo uso de aditivos químicos e um bom projeto de empacotamento de partículas.

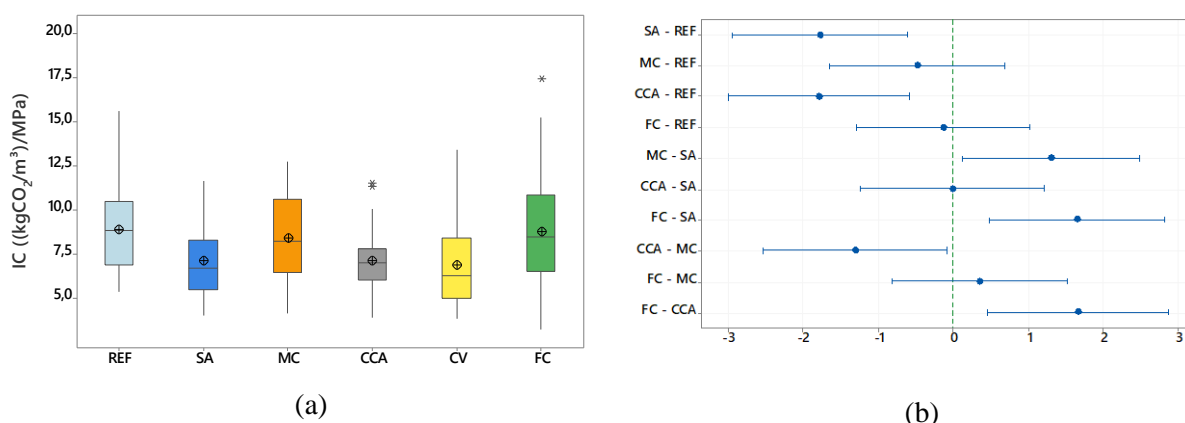


Figura 06 – a) *Boxplot* demonstrativo dos valores de IC para cada tipo de concreto estudado e b) Teste de Tukey dos valores de IC para cada tipo de concreto estudado.

Ao analisar as ICs de concretos com resistências à compressão inferiores à 50 MPa, observou-se que os concretos mais ecoeficientes em relação ao indicador IC foram os da série

CCA, que apresentaram IC médio de 7,63 (kg/m³)/MPa, não apresentando diferença estatisticamente significativa entre a média de IC dos concretos com sílica ativa e mediana dos concretos com cinzas volantes. Para concretos com R_{c28} superiores a 50 MPa, os concretos com adição de cinza volante apresentaram menor média (IC = 4,99 (kg/m³)/MPa) e menor faixa de variação (3,82 a 6,27 (kg/m³)/MPa), o que indica que esta adição é a melhor opção para redução da IL de concretos de alta resistência.

O metacaulim também se mostrou como uma adição com baixo potencial para redução da intensidade de CO₂ dos concretos. A Figura 07a mostra a relação entre a IC e a resistência à compressão das séries MC e REF, a partir de uma distribuição de pontos homogênea. Ao sobrepor os gráficos da série MC e SA (Figura 07b), nota-se o aumento na dispersão de pontos, o que indica que os concretos com metacaulim possuem elevado teor de clínquer para uma mesma resistência mecânica, em função do seu elevado consumo de cimento e tipo de cimento Portland utilizado. Para os concretos com resistência à compressão superior a 50 MPa, as médias de IC das séries MC e SA não apresentaram diferença estatisticamente significativa, mostrando que a adição de metacaulim pode ser uma opção para redução da IC de concretos de alta resistência.

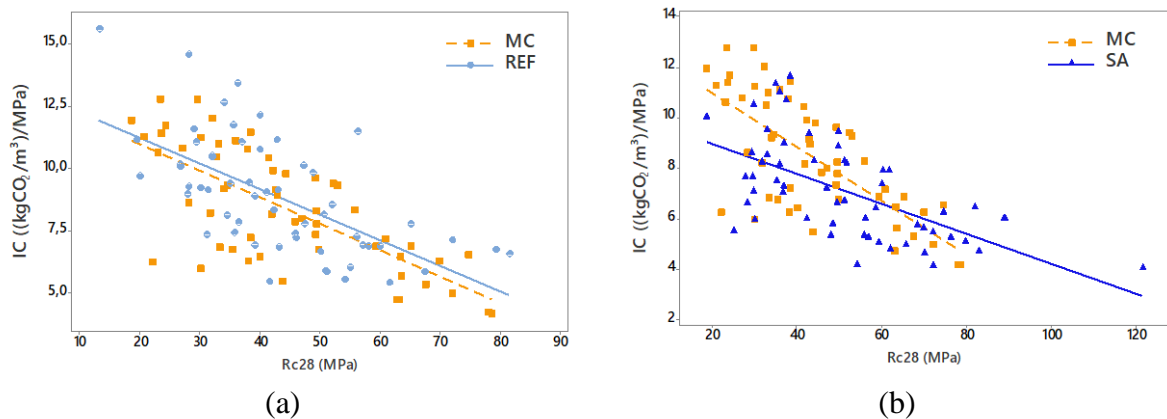


Figura 07 – a) IC versus R_{c28} das séries MC e REF e b) IC versus R_{c28} das séries MC e SA

A Figura 08 apresenta os resultados da análise preditiva aplicada a dados históricos no *software Design-Expert 11*®. Assim como nos resultados de IL, quanto menor a relação água/cimento, menor o indicador IC, visto que, quanto menor a relação água/cimento, maior será o seu desempenho mecânico (BAUER, VASCONCELOS e GRANATO, 2007). As Figuras 08b e 08c apresentam a influência do consumo de adição e consumo de cimento na redução da IC, comprovando a eficácia da utilização de adições minerais em substituição parcial ao cimento Portland, em termos de redução de IC, uma vez que, a redução do teor de clínquer está diretamente relacionada com a redução do consumo de cimento.

A Figura 08d mostra a relação entre o tipo de cimento e a intensidade de CO₂ do concreto, onde é possível perceber que o CP IV 32 e CP II E 32 apresentam maior capacidade de redução da IC dos concretos. Estes cimentos possuem baixo teor de clínquer em sua composição, podendo variar entre 41 a 81% e 47 a 90%, respectivamente. Embora o CP I S 32 e CP V ARI sejam os cimentos com maior teor de clínquer em suas composições (86 a 96% da composição total), foram os CP II F 32 e CP II Z 32 que apresentaram maior valor médio de IC, devido ao fato que os concretos desenvolvidos com estes cimentos apresentaram menor média de resistência à compressão aos 28 dias, conforme apresentado na Figura 05e.

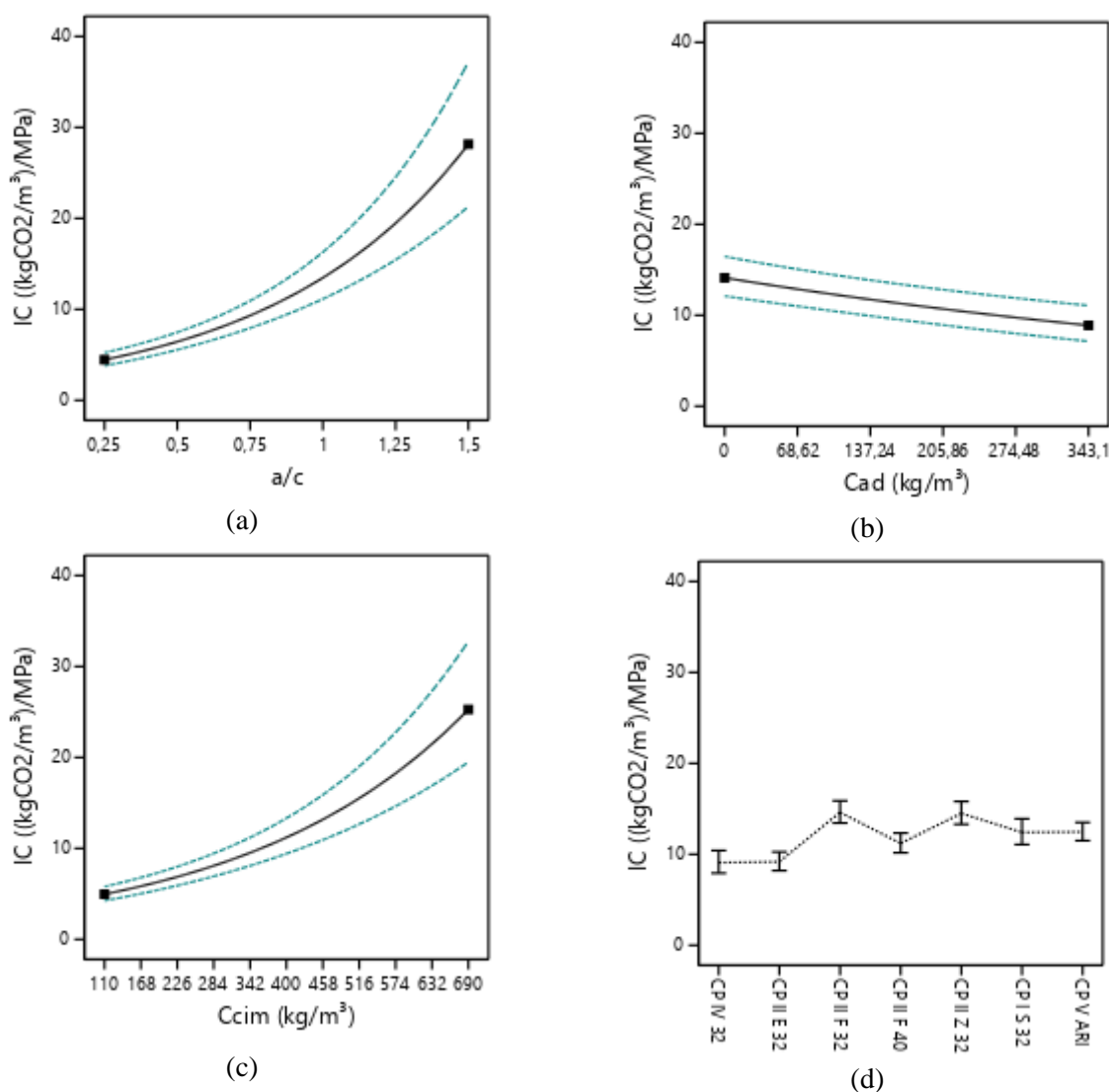


Figura 08 – Análise gráfica da relação entre a) IC e a/c , b) IC e consumo de adição, c) IC e consumo de cimento e d) IC e tipo de cimento.

CONCLUSÕES

Este trabalho comparou os indicadores de ecoeficiência IL e IC de formulações de concretos disponíveis na literatura. Dentre as adições estudadas neste trabalho, a sílica ativa, cinza de casca de arroz e as cinzas volantes se mostraram como as adições com maior potencial para reduzir o IL e IC dos concretos, com IL médio de 7,85, 8,01 e 7,83 $(\text{kg}/\text{m}^3)/\text{MPa}$ e IC médio de 7,08, 7,07 e 6,86 $(\text{kgCO}_2/\text{m}^3)/\text{MPa}$, respectivamente. Embora a série CV tenha apresentado menor média de IL e IC, esta série apresentou faixa de variação superior às séries SA e CCA. Os concretos com adição de metacaulim apresentaram estimativa de aumento de resistência à compressão similar aos concretos com sílica ativa, ainda assim, demonstraram baixa ecoeficiência em relação às médias dos dois indicadores, não havendo diferença estatisticamente significativa entre os seus resultados e os do concreto de referência. Porém, ao analisar os concretos com resistência superior a 50 MPa, percebeu-se que a diferença entre as médias de IL e IC das séries MC e SA não são estatisticamente significantes. A série FC também mostrou baixa ecoeficiência em função de IL e IC, uma vez que, estes concretos apresentaram resistência à compressão inferior a dos concretos com adições pozolânicas. Porém, devido à 97%

das formulações da série FC terem sido produzidas com um único tipo de cimento, CP V ARI, não foi possível realizar uma análise abrangente desta série. A análise dos concretos quanto ao seu desempenho mecânico mostrou que os concretos de alta resistência são os mais ecoeficientes e podem reduzir o consumo de cimento significativamente sem que ocorram perdas de resistência. Vale ressaltar a importância de obter formulações que reduzam tanto o IL quanto o IC dos concretos para o aumento da ecoeficiência dos mesmos.

REFERÊNCIAS

- [1] ABREU, A. G. Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais. 1998. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- [2] ALTHEMAN, D. *et al.* Evaluation of coal fly ash in cementitious matrices. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 10, n. 6, p. 1320-1337, 2017.
- [3] ALVARENGA, L. M. S. C. Influência do emprego de resíduo da britagem de granito e de cinza da casca de arroz nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto. 2016. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2016.
- [4] ARAÚJO, J. G. Influência de adições minerais pozolânicas e de finos de pedreira nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto auto-adensável. 2007. 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991a.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733. Cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991b.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736. Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991c.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991d.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 12653: Materiais pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 1992.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [11] BARATA, M. S. Concreto de alto desempenho no estado do Pará: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. 1998. 188p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- [12] BARBOSA, M. B. Utilização de resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de alto desempenho. 2006. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.
- [13] BAUER, E.; VASCONCELOS, P. H.; GRANATO, J. E. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Ed G. C. Isaia. São Paulo: Ibracon, 2007.

- [14] BIANCHINI, M. Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- [15] BONAVETTI, V. L.; RAHHAL, V. F.; IRASSAR, E. F. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 6, p. 853-859, 2001.
- [16] CAMPOS, H. F. *et al.* Low-cement high-strength concrete with partial replacement of Portland cement with stone powder and silica fume designed by particle packing optimization. *Journal of Cleaner Production*, v. 261, p. 121228, 2020.
- [17] CASAGRANDE, C. A. *et al.* Efeito da substituição do cimento por cinza volante em concretos autoadensáveis de alto desempenho. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*, v. 1, n. 21, p. 1-10, 2019.
- [18] CEZAR, D. S. Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento. 2011. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- [19] DAFICO, D. A. Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz. 2001. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [20] DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minererais para Concreto Estrutural. In: *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379.
- [21] DAMINELI, B. L. Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [22] DAMINELI, B. L. *et al.* Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.
- [23] DE SOUZA, F. B. *et al.* Análise comparativa das propriedades de concretos convencionais com substituição parcial do cimento portland por cinza da casca de arroz. *Revista de Iniciação Científica*, v. 12, n. 1, 2014.
- [24] DO CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minererais em estruturas de concreto. *Cerâmica*, v. 54, n. 331, p. 309-318, 2008.
- [25] FEDUMENTI, M. B. Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto. 2013. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. 2013.
- [26] FELTRIN, C. S.; ISAIA, G. C. Propriedades do concreto com adição de fíler calcário dolomítico. *Revista de Ciência e Inovação*, v. 3, n. 1, p. 58-71, 2018.
- [27] FIGUEIREDO, C. P. *et al.* The role of metakaolin in the protection of concrete against the deleterious action of chlorides. *RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 7, n. 4, 2014.

- [28] FOIATO, M. Estudo de concretos autoadensáveis com elevados teores de cinza volante para uso em grandes blocos de fundação. 2017. 217p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2017.
- [29] FONSECA, G. C. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2010.
- [30] FONSECA, T. V. Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca do arroz, fíler calcário e adição de cal hidratada. 2016. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- [31] HOFFMANN, A. T. Influência da adição de sílica ativa, da relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos. 2001. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.
- [32] ISAIA, G. C. *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 2, p. 233-252, 2017.
- [33] JOSA, A. *et al.* Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 8, p. 1313-1320, 2004.
- [34] KRAUS, Z. F. Investigação de misturas de argamassas para dosagem do concreto autoadensável contendo ora fíler calcário, ora aditivo promotor de viscosidade em substituição ao fíler. 2012. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.
- [35] KULAKOWSKI, M. P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. 2002. 180p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- [36] LEHNE, J.; PRESTON, F. Making concrete change: Innovation in low-carbon cement and concrete. Chatham House Report, Energy Environment and Resources Department: London, UK, p. 1-66, 2018.
- [37] LIBORIO, J. B. L.; CASTRO, A. L. A importância da avaliação reológica de pastas com e sem sílica ativa para produção de concretos estruturais com cimento Portland para obras marítimas. In: Seminary and Workshop for Oceanic Engineering. 2004.
- [38] MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. Pozzolanitic and cementitious materials. 1st Edition. London: CRC Press, 1996.
- [39] MATOS, P. R.; JUNCKES, R.; PRUDÊNCIO JR, L. R. Influência do uso de cinza volante na elevação adiabática de temperatura e resistência à compressão de concretos. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 24, n. 2, 2019.
- [40] MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Ecoeficiência do concreto considerando resistência à compressão, emissão de CO₂, resistividade elétrica e migração de cloretos. *Revista Técnico-Científica*, n. 21, 2019.
- [41] MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 4, p. 125-139, 2017.

- [42] MELO, K. A. Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário. 2005. 183p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.
- [43] MENDES, C. J. Concreto autoadensável utilizando cinza de casca de arroz: estudo das propriedades mecânicas. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo. 2015.
- [44] MIRANDA, L. R. M.; RESENDE, F. G.; CAPUZZO, V. M. S. Avaliação da durabilidade do concreto autoadensável com diferentes teores de fíler calcário em substituição ao cimento Portland. In: V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactable y Hormigones Especiales, 2018. Anais do Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales, Valência: Editorial Universitat Politècnica de València, 2018. p. 373-382.
- [45] MORAES, K. A. M. Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável. 2010. 212p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2010.
- [46] MOREIRA, B. P. Estudo da penetração de cloretos na camada de cobrimento do concreto com altos teores de cinza volante. 2004. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2004.
- [47] OLIVEIRA, A. M. Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão de armaduras induzidas por cloretos. 2007. 276p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2007.
- [48] OLIVEIRA, V. C. H. C. *et al.* Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 4, p. 167-181, 2014.
- [49] PEREIRA, A. M. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. *Revista Matéria*, v. 20, n. 01, p. 227-238, 2015.
- [50] PEREIRA, E. *et al.* Chloride accelerated test: influence of silica fume, water/binder ratio and concrete cover thickness. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 6, n. 4, p. 561-581, 2013.
- [51] RAISDORFER, J. W. Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos. 2015.
- [52] ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: <<http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- [53] SANTOS, S. Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho. 2006. 267p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.
- [54] SILVA, I. J. Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura. 2000. 279p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.
- [55] SILVA, S. S. Avaliação de propriedades físico-mecânicas de concretos com fíler calcário, em altos teores, cinza de casca de arroz e ativadores. 2019. 113p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2019.

[56] SIQUEIRA, T. P. L. Uso de finos de rocha granítica (FRG) e areia de britagem para a produção de concreto autoadensável. 2020. 217p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

[57] SOUZA, P. S. L. Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência. 2003. 203p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

[58] TEODORO, R. Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade. 2016. 191p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

[59] THE CONCRETE CENTRE. The concrete industry. Sustainability performance report. First report. The concrete centre, 2009.

[60] TIBONI, R. A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland. 2007. 196p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

[61] TRINDADE, G. H. Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos. 2011. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

[62] TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 4, n. 2, p. 247-276, 2011.

[63] VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. Ambiente Construído, v. 10, n. 1, p. 77-90, 2010.

[64] VICENTINI, A. H.; ASSUNÇÃO, C. C.; AKASAKI, J. L. Estudo do metacaulim para obtenção e produção de concreto autoadensável (CAA). Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 12, n. 4, 2016.

[65] WITZKE, F. B.; CORREIA, S. L.; JUNIOR, R. A. M. Abrasão superficial de concretos contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland. Revista Técnico-Científica, n. 21, 2019.

[66] YAMAMOTO, J. K. *et al.* Environmental impact reduction on the production of blended portland cement in Brazil. Environmental Geosciences, v. 4, n. 4, p. 192-206, 1997.