

CONCRETO ECO AMIGÁVEL PARA ESTRUTURAS SUSTENTÁVEIS

ECO FRIENDLY CONCRETE FOR SUSTAINABLE STRUCTURES

Gustavo Isaia, Doutorando (UFSM); Eduardo Rizzatti, Doutor (UFSM); Silvane S. Silva, Doutoranda (UFSM); Geraldo Isaia, Doutor (UFSM); André Lübeck, Doutor (UFSM)

PALAVRAS CHAVE

Sustentabilidade; concreto eco amigável; filer calcário; cinza volante; emissão de CO_{2eq}

KEY WORDS

Sustainability; eco friendly concrete; limestone filler; fly ash; CO_{2eq} emission

RESUMO

O presente artigo apresenta estudo de concretos eco amigáveis com a substituição de cimento Portland (CP) por teores muito elevados de filer calcário (FC) em misturas binárias e ternária com cinza volante (CV) em proporções de 50 a 80%, com relações a/ag de 0,25 e otimização da granulometria por empacotamento de partículas. São apresentados resultados de resistência à compressão axial, da emissão de CO_{2eq}, do consumo de energia e intensidade de ligante, com os quais foram calculados índices comparativos para observar o desempenho das misturas com adições minerais relacionadas ao concreto referência. Do ponto de vista da sustentabilidade, foi possível elaborar um concreto com resistência à compressão de 51,8 MPa, aos 91 dias, com 77 kg_{CO2}.m⁻³ de concreto, onde 80% do CP foi substituído por 70% de FC e 10% de CV, com consumo de apenas 97 kg.m⁻³ de CP (87 kg.m⁻³ de clínquer) e 104 L.m⁻³ de água. O estudo mostra a obtenção de concreto estrutural com fck de até 80 MPa com emissões de CO_{2eq} e consumo de energia muito baixos, através do emprego de elevados teores de adições minerais, e reduzido impacto ambiental.

ABSTRACT

This article presents study of eco friendly concretes with Portland cement (PC) replacement by very high levels of limestone filler (LF) in binaries and ternary mixtures with fly ash (FA) in proportions of 50 to 80% with a/cm relationships of 0.25 and optimized granulometry by particles packing. Compressive axial strength, CO_{2eq} emissions, energy consumption and binder intensity results are presented, with which comparative indexes were calculated to observe the mixtures performances with mineral additions related do the reference concrete. From the point of view of sustainability, it was possible to produce an eco-friendly concrete with a compressive strength of 51.8 MPa, at 91 days, with 77 kg_{CO2}.m⁻³ of concrete, where 80% of the PC was replaced by 70% of LF and 10% FA using only 97 kg.m⁻³ of PC (87 kg.m⁻³ of clinker) and 104 L.m⁻³ of water. The study shows the achievement of structural concrete with fck of up to 80 MPa with very low CO_{2eq} emissions and energy consumption, through the use of high levels of mineral additions and reduced environmental impact.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem como seu principal material o CP para a execução de obras e serviços, seja na utilização de argamassa, concreto e outros derivados, tornando assim esse material, individualmente, o mais consumido pelo homem em suas diversas formas. A produção mundial de CP em 2018 foi 4,1 bilhões de toneladas, cerca de $540 \text{ kg.hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e no Brasil 52 milhões de ton e $350 \text{ kg.hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (SNIC, 2019). A produção de CP supera o consumo de alimentos, segundo Agopyan e John (2011), o que confere a dimensão e importância deste material de construção.

Depois da água, o concreto de CP e seus derivados constituem-se no material mais utilizado no mundo, correspondendo a 11,4 bilhões de ton.ano^{-1} ou, $3.750 \text{ kg.hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, valor 10 vezes maior do que qualquer outro material ou 2 vezes a soma total de todos os demais materiais de construção. Para a produção desta enorme quantidade de concreto são necessários, por ano, aproximadamente, 5 bilhões de toneladas de agregado graúdo, 3,8 bilhões de toneladas de agregado miúdo e ainda, pelo menos, 1,2 bilhões de m^3 de água incluindo-se as operações de molhagem das formas, lavagem de utensílios e das cubas, dos caminhões betoneiras e da água para a cura do concreto pelo período mínimo de 3 dias. Acresce-se ainda a emissão potencial de 1 bilhão de ton.ano^{-1} de gases de efeito estufa (GEE) (SNIC, 2019).

O CP é também o material que mais colabora para a emissão dos GEE porque cerca de 2/3 da sua composição são carbonatos cálcicos que são descarbonatados no forno de queima que, somados à combustão de fontes energéticas, geralmente de origem fóssil, são as fontes primárias da poluição atmosférica produzida por esse material. Além disso, por ser o maior produto manufaturado no mundo, em massa, fornece a dimensão da relação antagônica entre desenvolvimento econômico requerido pela sociedade atual e a sustentabilidade global do planeta, pelo declínio das condições atmosféricas adversas e pelo consumo de recursos naturais não renováveis.

A mitigação dos GEE causados pela fabricação do CP é proporcional à redução do teor de clínquer e aumento das adições minerais (AM), sejam de qualquer fonte mineral ativa ou inerte, convencional ou não convencional, experimentalmente comprovada (JOHN et al., 2018). A escolha das AM a serem incorporadas ao CP ou em substituição ao mesmo devem atender a critérios de disponibilidade e economicidade e, de preferência, serem resíduos, subprodutos ou coprodutos de outros processos industriais, que apresentem baixa emissão de GEE, e que possuam menor balanço de emissão de CO_2 .

Entre as AM inertes as mais empregadas são os FC moídos juntamente com o clínquer, porque são encontrados em quase todos os lugares do mundo, como os calcários donde provém, porque conferem boas características reológicas aos concretos frescos e, principalmente, diminuem o custo por serem produtos baratos e de baixa emissão de carbono. Na produção de CP, normas internacionais limitam o uso dos FC entre 5% e 35%, dependendo do continente e da cultura tecnológica, como AM inerte em moagem conjunta com o clínquer nas plantas industriais. Pesquisas atuais direcionam para o aumento do uso do FC em substituição ao CP em teores maiores que os previstos em normas, inclusive em misturas ternárias com pozolanas, com o intuito de se obter concretos mais resistentes, sustentáveis e de custo unitário mais barato, sem perda de suas características de durabilidade.

Sob o ponto de vista da sustentabilidade o emprego de FC no CP possui grande relevância em relação a outras AM ou pozolanas, porque é abundante e inerte, isto é, pouco contribui para as emissões dos GEE, possui baixo custo e, geralmente estão disponíveis em jazidas próximas às fábricas de CP. Entretanto, o uso conjunto de uma AM inerte e outra ativa pode trazer benefícios não só para as propriedades do concreto como para a sustentabilidade, em especial quando se realizam comparações em bases unitárias, kg.m^{-3} , MPa^{-1} , por exemplo.

Em vista do exposto, o presente trabalho tem por objetivo a apresentação de dados de concretos eco amigáveis através da inclusão de níveis mais elevados de FC, em substituições binárias com o

CP e ternária com CV, porque são produtos regionais disponíveis em escala industrial para aproveitamento junto com o CP. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, cálculo da intensidade de ligantes, emissão de CO₂ e do consumo de energia. A possibilidade de aumentar o teor de FC em concreto estrutural é um objetivo que vem ao encontro de ampliar a sustentabilidade deste material e contribuir para diminuição da emissão dos gases de efeito estufa no meio ambiente. Este trabalho apresenta a factibilidade do uso do FC em teores maiores do que a literatura atual apresenta, em geral, limitados em 50% de substituição em relação à massa ou volume de CP. Trata-se de estudo prospectivo com o intuito de diminuir o consumo de clínquer em valores abaixo de 100 kg.m⁻³ de concreto estrutural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A sustentabilidade do filer calcário

Considerando que a emissão média de CO₂ para a produção de uma tonelada de CP é de 617 kg tem-se que as taxas de redução deste gás na produção do CP são proporcionais a substituição de FC, tendo em vista que ele não requer calcinação, representando redução na energia térmica consumida, bem como uma diminuição nas emissões, o que representa uma parte comercial do produto CP. Com a utilização de FC incorporado ao CP, menos clínquer é produzido, assim como sua utilização constitui-se em uma solução que agrega aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade. Duas são as principais fontes de emissões de CO₂ na indústria cimenteira, a calcinação do calcário, principal ingrediente bruto para a fabricação de clínquer e o consumo de combustível fóssil, principalmente, para aquecimento das matérias-primas até a temperatura necessária para a formação do clínquer nos fornos rotativos (GCCA, 2017).

O carbonato de calcário possui cerca de 50% em massa de CO₂, sendo liberado no processo de calcinação e o responsável por 60% das emissões CO₂ produzidas em uma fábrica de CP. Estas emissões são mitigadas, em parte, pela incorporação de maior teor de FC, pois menos clínquer é usado na produção do CP. Estudos

apontam que as reduções nas emissões de CO₂ são proporcionais à diminuição da quantidade de clínquer no CP misturado (HERFORT, 2008).

O passivo energético e ambiental não está presente por ocasião da utilização do FC. Via de regra os CP com FC são mais finos que os CP comuns (sem substituição), sendo necessário, portanto, um consumo maior de energia durante a etapa de moagem. Entretanto este gasto energético maior é compensado com a diminuição na produção de clínquer. Assim o saldo líquido em relação as emissão de CO₂ é menor. Um impacto ambiental positivo na substituição do clínquer por FC reside no fato de uma menor demanda de matéria-prima, que reduz o consumo de recursos naturais. Utilizando-se dados médios, são necessárias de 1,3 a 1,4 toneladas de matérias-primas para a produção de 1 tonelada de CP, sendo que com a utilização do FC há uma redução de 10% no consumo destes materiais (DAMTOFT et al., 2008).

Outro ponto favorável a utilização do FC é sua menor emissão e CO₂ relacionada ao transporte, haja visto que a matéria-prima é a mesma do clínquer. Estes e outros aspectos deverão elevar o consumo do FC nos CP num futuro próximo, bem como sua maior aceitação nas normas técnicas sobre o assunto. Contudo estudos devem ser aprofundados para melhor investigar as características do concreto elaborado com substituição de FC, em especial no que diz respeito a resistência mecânica e durabilidade (HERFORT, 2008).

2.2 O filer calcário e os altos teores de substituição

Estudos realizados nas últimas três décadas para investigar o desempenho do FC no CP mostram que os teores de substituição estão aumentando, entretanto, ainda existem controvérsias com respeito ao comportamento reológico, mecânico e de durabilidade, com resultados discrepantes (Lollini et al., 2014). À medida que o teor de FC aumenta na pasta de CP, sem controle granulométrico e de quantidade de água, os fatores a/ag aumentam e o desempenho diminui. Para melhorar esse comportamento é preciso diminuir a água, aumentando a mobilidade

das misturas com superplastificantes e, principalmente, controlar o arranjo entre partículas para diminuir os vazios pelo aumento da compacidade entre os grãos de CP e de FC na pasta e desta com os agregados. Estes princípios permitem a redução da demanda de água e, portanto, simultaneamente, a minimização do teor de clínquer de CP. Segundo Fennis e Walraven (2012) é possível conceber concreto com baixa emissão de CO₂, no qual 50% do CP é substituído por AM, usando a tecnologia de empacotamento de partículas na otimização das misturas.

Palm et al. (2016) realizaram pesquisa sobre a utilização de altos teores de FC (teores acima de 50%) em substituição ao CP estudando as propriedades mecânicas, de durabilidade e características ecológicas, concluindo que: a) concretos com CP contendo até 50% de FC e um fator a/ag de 0,35 podem ter propriedades suficientes para aplicação prática se uma supervisão rigorosa for assegurada; b) o fator a/ag é o principal parâmetro para CP com alto teor de FC; c) os resultados mostraram que o FC parece não ser totalmente inerte. A contribuição do FC para a resistência à compressão também é notável quando uma quantidade maior de clínquer de CP é substituída; d) todos os concretos feitos de CP com 50% em massa de FC e fator a/ag de 0,35 tinham pelo menos uma resistência à compressão igual ou superior à das misturas de referência com fator a/ag de 0,50. Assim, concretos com teores elevados de FC possuem viabilidade de apresentar resultados promissores, segundo apresenta a literatura nas duas últimas décadas, em relação a resistência à compressão e sustentabilidade.

3. METODOLOGIA

O planejamento experimental foi dividido em duas etapas. Na primeira, realizou-se a caracterização dos materiais a serem utilizados na pesquisa, seguida da determinação da compatibilidade entre o cimento CPV-ARI e o aditivo escolhido tendo por base a determinação do teor mais adequado. Na segunda, foi realizado o estudo do empacotamento de partículas com

vistas a dosagem dos traços, para obtenção de concretos de maior compacidade.

As misturas de estudo foram pré-estabelecidas, baseadas em estudos prévios, com a utilização de quatro tipos de traços, variando o nível de substituição do cimento pelas adições minerais: a) Referência (REF) com 100% de CP; b) FC50 com 50% de CP e 50% de FC; c) FC60 com 40% de CP e 60% de FC; d) FC70CV10 com 20% de CP, 70% de FC e 10% de CV, todos com fator a/ag 0,25. Em etapas posteriores foram realizadas, as moldagens e ensaios dos corpos de prova para a determinação da resistência à compressão axial (MPa), cálculos das emissões de CO₂ (kgCO₂.m⁻³), dos consumos de energia (MJ.m⁻³), das intensidades de ligante (kg.m⁻³.MPa⁻¹) e, por último, dos índices de sustentabilidade.

3.1 O cimento Portland e as adições minerais

O cimento Portland utilizado foi do tipo CPV-ARI, de alta resistência inicial, porque é o que se encontra no mercado brasileiro e regional com menor teor de FC, (máximo de 10%) conforme NBR 16697 (ABNT, 2018). De acordo com relatório de análise química da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), este CP possui teor de calcita de 7%, gesso de 2,5% e a perda ao fogo de 0,5%, o que leva a um teor de clínquer de $\approx 90\%$. Os resultados das propriedades físicas deste CP atenderam os requisitos da norma supracitada.

O FC escolhido é proveniente da extração de jazidas localizadas em Caçapava do Sul (RS), originário de rocha calcítica, abundante na região. O FC foi moído em moinho de bolas em três diferentes tempos de moagem 60, 120 e 180 minutos, sendo utilizado este último por apresentar a melhor composição granulométrica e índice de desempenho. A CV procedente da usina termoelétrica de Candiota (RS) foi moída por 60 e 120 minutos, no moinho de bolas, tendo sido selecionado este último pelas mesmas razões apontadas para o FC. A CV é classificada como uma pozolana Classe F, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014). Na Tabela 01 é possível observar as características física destes materiais, na Tabela 02 encontram-se os resultados das

análises químicas, na Tabela 03 o tamanho das partículas e na Figura 01 a distribuição granulométrica dos materiais.

Tabela 01: Características físicas dos aglomerantes

Características físicas	CPV-ARI	FC	CV
Massa específica (g/cm ³)	3,03	2,69	2,36
Superfície específica BET (m ² /g)	1,71	8,22	1,04
Índice de desempenho com CP aos 28 dias (%)	-	92,39	92,00
Material retido na peneira # 75 µm (%)	0,54	12,74	-
Tamanho médio dos grãos (µm)	9,11	2,09	11,75
Início de pega (h)	3h:25min	-	-
Fim de pega (h)	4h:15min	-	-
Consistência normal (%)	30,4	-	-
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	36,7 MPa	-
	7 dias	46,8 MPa	-
	28 dias	53,3 MPa	-

Fonte: Autores

Tabela 02: Características químicas dos aglomerantes

Composição química	CPV-ARI	FC	CV
Óxido de Cálcio (CaO)	60,18	53,60	1,00
Dióxido de Silício (SiO ₂)	19,89	1,04	68,81
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	4,87	0,20	23,51
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	2,83	0,27	4,70
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	3,45	1,14	-
Óxido de Magnésio (MgO)	3,40	0,31	2,16
Óxido de Potássio (K ₂ O)	1,04	0,02	0,39
Óxido de Titânio (TiO ₂)	0,30	-	0,16
Óxido de Estrôncio (SrO)	0,22	-	-
Anidrido Fosfórico (P ₂ O ₅)	0,16	-	-
Óxido de Manganês (MnO)	0,04	-	0,68
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	-	0,82	-
Perda ao Fogo (PF)	0,56	41,41	0,10

Fonte: Autores

Tabela 03: Tamanho dos aglomerantes

Aglomerantes	Dimensão média (µm)	Diâmetro de 10% das partículas (µm)	Diâmetro de 90% das partículas (µm)
Cimento CPV-ARI	9,11	1,09	23,12
Filer Calcário	2,09	0,73	19,42
Cinza Volante	11,75	1,25	26,93

Fonte: Autores

Observa-se que o índice de desempenho do FC é praticamente igual ao da CV, apesar de o primeiro ser quase inerte e a segunda uma pozolana. A provável causa deste comportamento é a maior finura BET do FC cujos grãos mais finos geram reações químicas mais intensas e rápidas, formando carboaluminatos que preenchem os poros da pasta, como também à maior atração devida ao potencial superficial zeta.

Também se evidencia que os diâmetros médios do FC e CV, respectivamente, 2,09 e 11,75 µm, mostram que o primeiro é quase 6 vezes menor do que o segundo, justificando os índices de desempenho com o CP serem praticamente iguais (≈ 92%), apesar de o FC apresentar pouca reatividade química (algumas vezes considerado inerte), enquanto a CV resulta em reações pozolânicas importantes. Estas características físico-químicas do FC mostram que estes efeitos agindo simultaneamente, podem produzir aumento de resistência por meio da sinergia entre eles.

3.2 Agregados

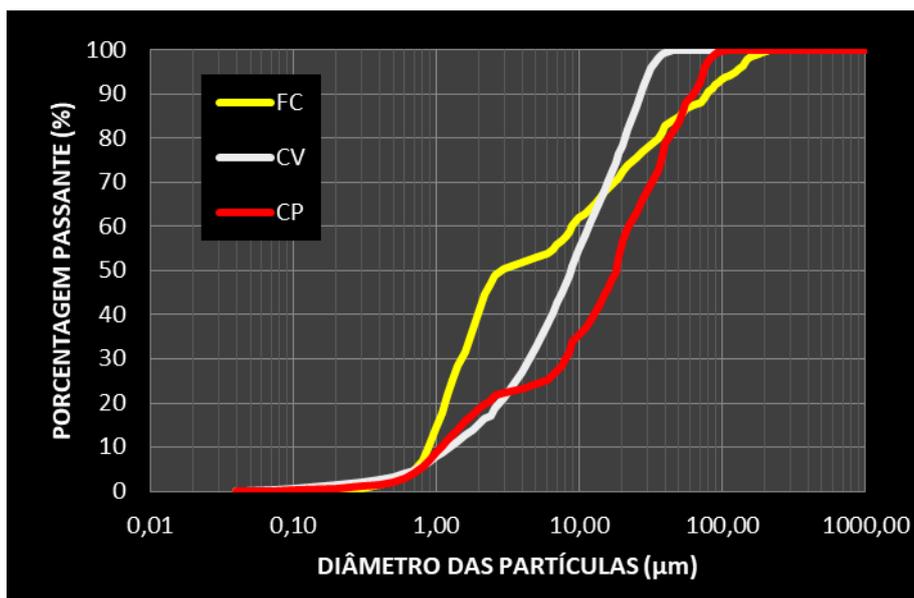
Tendo em vista um melhor empacotamento de partículas, foram utilizadas duas areias provenientes das jazidas de Santa Maria (RS), classificadas como fina (D_{máx} < 1,2 mm) e média (D_{máx} < 2,4 mm), a fim de fornecer grãos de dimensões que possibilitem a melhor transição dos grãos finos do CP e AM com o agregado graúdo, atendendo as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009). O agregado graúdo é oriundo de pedras britadas de origem diabásica, classificado como brita 0 (D_{máx} ≤ 12,5 mm). A Tabela 04

Tabela 04: Características físicas dos agregados

Propriedades	Areia fina	Areia média	Brita 0
Módulo de finura	1,14	1,49	6,96
Diâmetro máximo Característico (mm)	0,6	1,20	19,00
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,62	2,46
Massa aparente (g/cm ³)	2,56	2,61	3,36
Massa unitária (g/cm ³)	1,68	1,65	1,22
Volume de vazios (%)	36,34	36,77	50,40
Abrasão Los Angeles (%)	-	-	11,07
Índice de forma	-	-	2,09
Absorção de água (%)	0,31	0,33	3,17

Fonte: Autores

Figura 01: Distribuição granulométrica dos aglomerantes



Fonte: Autores

resume os resultados da caracterização dos agregados.

3.3 Aditivo

Para aumentar o empacotamento das partículas fez-se necessário dispersar as partículas finas da pasta com a utilização de aditivo hiperplastificante, em quantidade compatível com as necessidades dos parâmetros utilizados para as propriedades reológicas dos concretos produzidos. Para este estudo foi escolhido o hiperplastificante Master Glenium 54 da BASF à base de policarboxilatos. Para verificar o teor ótimo de aditivo a ser utilizado nas misturas, realizou-se a verificação da compatibilidade deste com o CP escolhido. Foi realizado o ensaio do cone Marsh sendo encontrado um teor ótimo de 1% sobre a massa de CP. Um resumo das características físicas e químicas do aditivo selecionado é apresentado na Tabela 05.

3.4 Empacotamento de partículas

A análise do empacotamento entre as partículas dos agregados, CP e AM foi executada com o auxílio do programa computacional EMMA (*Elkem Materials Mix Analyzer*), para realizar uma dosagem granulométrica baseada nos tamanhos reais dos grãos finos dos materiais componentes.

Tabela 05: Propriedades do aditivo hiperplastificante

Propriedades	Master Glenium 54
pH	5 a 7
Teor de sólidos (%)	38 a 42
Densidade (g/cm ³)	1,10
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido Branco Turvo

Fonte: Autores

Para cada traço, foram especificadas as quantidades, densidades e curvas granulométricas dos materiais. Por meio da variação na proporção entre os insumos, buscou-se aproximar a curva das misturas com a curva ideal. Recomendado pelos autores Funk e Dinger (1992) e por Oliveira et al. (2000), fez-se o uso do modelo matemático de Andreassen modificado, pois é o que melhor se adapta quando são utilizadas partículas de pequeno tamanho incorporadas à mistura. Para o favorecimento do adensamento (misturas com maior trabalhabilidade) o coeficiente de distribuição “q” utilizado para o cálculo foi 0,35, conforme recomendado pelo método.

3.5 Dosagem

Tabela 06: Traço unitário definitivo em volume

Traço	a/ag	CP	FC	CV	Areia fina	Areia média	Brita 0	Aditivo (%)
REF	0,25	1	-	-	1,09	1,09	2,82	4,20
FC50	0,25	0,54	0,46	-	1,16	1,16	3	3,60
FC60P	0,25	0,43	0,57	-	1,16	1,16	3	3,65
FC70CV10	0,25	0,21	0,69	0,1	1,16	1,16	3	3,56

Fonte: Autores

Tabela 07: Quantidade de materiais em kg por metro cúbico (kg.m⁻³) e aditivo em litros por metro cúbico (L.m⁻³)

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

Fonte: Autores

Em fase preliminar realizaram-se moldagens com os materiais constituintes com o intuito de obter-se o teor ideal de argamassa e de água, ou seja, o teor mínimo que, por meio de observações experimentais, a massa de concreto se mantivesse compacta, coesa e sem vazios (HELENE; TERZIAN, 1992). Obtiveram-se valores de 53%, em massa, para a argamassa e 8,33% para a água, os quais permaneceram fixos em todos os traços. A mistura foi realizada com perfuratriz de alta potência (900 W) e rotação (645 a 1.400 rpm), em conjunto com pás misturadoras de alta eficiência em um recipiente metálico, tendo em vista a necessidade de maior energia de mistura devido ao baixo fator a/ag, igual a 0,25.

Conforme Helene e Terzian (1992), no que se refere à sequência de inserção dos materiais no recipiente metálico, primeiramente, procurou-se adotar a ordem de mistura especificada pela NBR 12821 (ABNT, 2009). Posteriormente ajustou-se a seguinte sequência de inserção dos materiais que foi utilizada para todos os traços: a) 100% do CP, AM, água e aditivo; b) areias; c) brita. No teste de abatimento do tronco de cone, efetuado de acordo com NBR NM 67 (ABNT, 1998), a consistência do concreto foi preservada constante para todas as misturas, aplicando-se como referência o intervalo de 100±20 mm. O traço unitário definitivo e as quantidades de materiais por metro cúbico podem ser observadas nas Tabela 06 e 07 respectivamente.

4. RESULTADOS

4.1 Resistência à compressão

Foi realizado o ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015) e ensaiados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2003), para as idades de 28 e 91 dias. Os corpos de prova foram confeccionados em número de 4 em cada idade de ensaio adotando a média entre os valores a fim de determinar a resistência a compressão. Os resultados da resistência à compressão axial são apresentados na Tabela 08, juntamente com os valores de desvio padrão. Pode-se observar que nos traços com AM a resistência à compressão diminui com o aumento

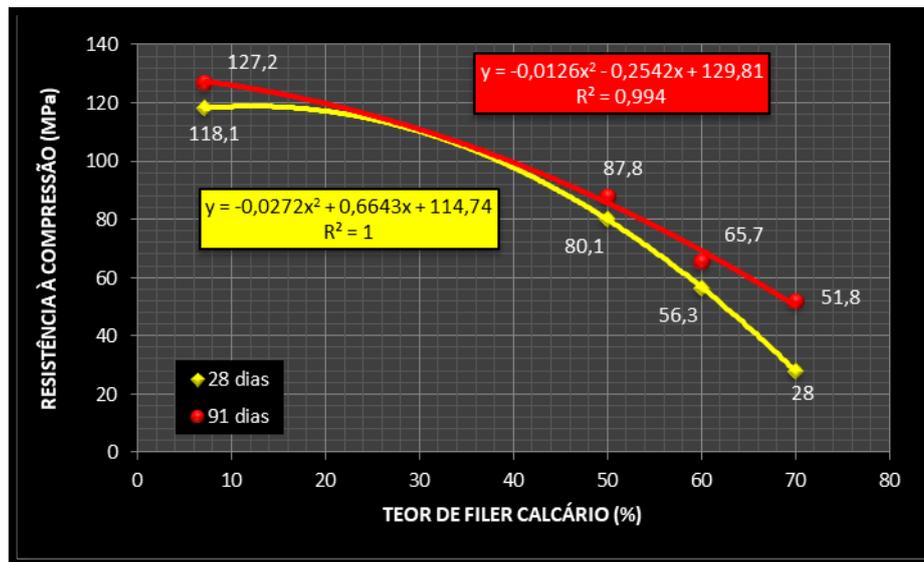
Tabela 08: Resistência à compressão axial com o desvio padrão

Traço	fc 28 dias (MPa)	fc 91 dias (MPa)
REF	118,1 ± 3,6	127,2 ± 1,2
FC50	80,1 ± 1,7	87,8 ± 2,1
FC60	56,3 ± 0,6	65,7 ± 1,6
FC70CV10	28,0 ± 0,4	51,8 ± 0,5

Fonte: Autores

no teor das mesmas (Figura 02), bem como nenhum traço obteve resistência à compressão igual ou superior ao REF.

Figura 02: Teor de filer calcário x resistência à compressão



Fonte: Autores

Para as idades de 28 e 91 dias, não foi possível corroborar a afirmação de Feltrin et al. (2016) onde ocorreu aumento na resistência à compressão dos concretos, com o aumento da substituição de FC para um dado fator a/ag . Também não foi possível comprovar os estudos de Daminieli (2013) onde todas as misturas com FC apresentaram resistências superiores quando comparadas com a referência para um mesmo fator a/ag igual a 0,5. Por outro lado, os dados da resistência à compressão nas idades de 28 e 91 dias, indicam uma conformidade com os trabalhos de Madani e Ramezaniyanpour (2016), Zhao et al. (2015) e Dhir (2007), onde a resistência à compressão foi reduzida em todas as idades com o aumento do teor de FC para um mesmo fator a/ag .

No intuito de melhor explicar os motivos para o pequeno desenvolvimento da resistência à compressão entre os 28 e 91 dias nos traços com FC, apontam-se os dados de Courard *et al.* (2018). Esses autores explicam que nas misturas cimentícias com FC, primeiramente há formação de etringita por consumo do monossulfato; em um segundo momento o monossulfato é exaurido formando-se monocarboaluminato pelo consumo do hemicarboaluminato e no terceiro, a fase hemicarboaluminato é esgotada por carbonato de cálcio adicional, não reagindo mais, embora permaneça como uma fase estável. A formação de

etringita e de monocarboaluminato resultam em preenchimento dos poros, redução da porosidade e aumento da resistência à compressão, ao passo que quantidades adicionais de carbonatos na reação, porventura ainda existentes, aumentam o teor de poros, freando o aumento da resistência. O teor mínimo de substituição de clínquer por FC foi de 50%, o que resultou em quantidades substanciais de carbonatos que podem ser responsáveis pelo aumento da porosidade e pelo comprometimento da progressão das resistências à compressão.

Outra explicação é a alta superfície específica (BET) e o elevado teor de FC que podem resultar na aglomeração dos finos da mistura, o que leva a uma dificuldade maior do contato com a água, que por sua vez reduz a reatividade do FC. Uma reatividade mais baixa do FC leva a formação de menores quantidades de carboaluminatos não permitindo diminuição da porosidade e, conseqüentemente, o aumento da resistência à compressão. No caso de fatores a/ag baixos (0,25) esta situação pode vir a ser intensificada (Perlot et al., 2013).

Além das questões já levantadas, uma explicação bastante plausível e simples consiste nas conclusões de Dhir (2007), onde justifica-se a diminuição da resistência à compressão com o aumento dos teores de FC por meio da redução no

teor de CP. Neste caso pode-se dizer que ocorreu o efeito “diluição”, tendo em vista a substituição de partículas de um material mais reativo (cimento Portland CPV-ARI), por outras de menor reatividade e/ou inerte (FC) (Irassar, 2009). Como consequência desse efeito tem-se a diminuição dos produtos de hidratação, resultando na minoração da resistência à compressão do concreto em todas as idades.

Entre os traços com resultados aos 91 dias, destaca-se o FC70CV10 com 51,8 MPa de resistência à compressão no qual observa-se o efeito sinérgico entre a CV e o FC conforme descrito por Deschner et al. (2012) e De Weerd et al. (2011). A sinergia ocorre pela interação do FC com os aluminatos fornecidos pela CV durante a reação pozolânica, assim como os provenientes da própria hidratação do CP, levando a formação de carboaluminatos em maior quantidade, desta maneira há uma redução na porosidade e um aumento da resistência à compressão. Contudo a manifestação dos efeitos sinérgicos entre a CV e o FC não ocorreu até 28 dias como pode ser observado pela evolução da resistência à compressão. A explicação para o mecanismo de interação entre o FC e a CV é dada por Detwiler e Metha (1989) quando explicam que há uma preeminência do efeito físicos nas primeiras idades (até 7 dias) e que somente após os 28 dias a sinergia entre efeitos físicos e químicos se tornam relevantes.

Com efeito, Isaia et al. (2003) declaram que o aumento de resistência à compressão em misturas ternárias em presença de pozolana, é fruto de uma ação híbrida, combinada e sinérgica entre o efeito de hidratação (clínquer Portland), efeito pozolânico (CV) e o efeito físico (FC). Tendo em vista o baixo teor de clínquer Portland no traço em questão (20%) os níveis de resistência alcançados pelo FC70CV10 ocorreram, além do efeito hidratação do clínquer, também, pelas ações físicas e pozolânicas pois, neste caso, o imbricamento entre as partículas de CP com as AM são tão importantes quanto a quantidade de hidratos formados.

Ao analisar a resistência à compressão dos concretos eco amigáveis estudados verifica-se que os valores estão acima dos 50 MPa cuja

classificação enquadra-se em concretos de alta resistência (CAR). Desta maneira pode-se depreender que uma das vias para o aumento da sustentabilidade deste tipo de concreto ocorre pela utilização de resistências mais elevadas. Com isso poderão ser produzidas estruturas que possuam desempenho equivalente aquelas com a utilização de concretos com resistências à compressão convencionais, todavia com um volume de concreto menor (DE MATOS et al., 2019; GARTNER; HIRAO, 2015; SCRIVENER et al., 2018).

Sendo assim com o aumento da resistência à compressão dos concretos eco amigáveis, menores serão as emissões de CO₂ por MPa e conseqüentemente maior será a sustentabilidade (CAMPOS, 2015; DAMINELLI et al., 2010; DAMINELLI, 2013). Neste sentido Mehta e Monteiro (2014) afirmam que sua utilização (concretos mais resistentes) possui a capacidade de mitigar os efeitos nocivos dos materiais de construção ao meio ambiente, onde a conservação de recursos naturais, mediante a utilização deste tipo de material, constitui-se em uma atitude sustentável.

4.2 Emissão de CO₂ e Consumo de energia

A Tabela 09 mostra a quantidade de CO₂ emitida por m³ de concreto em relação à resistência à compressão. Para obtenção dos resultados foram aplicados os seguintes coeficientes de emissão de CO₂ (em kg_{CO2}.ton⁻¹): a) CP = 617 (GCCA, 2017); b) FC = 26 (Habert et al., 2013); c) CV = 10; d) areia = 3; e) brita = 4; f) água = 5; g) aditivo = 94 (Isaia e Gastaldini, 2004). Os coeficientes referem-se a valores médios para cada um dos materiais constituintes.

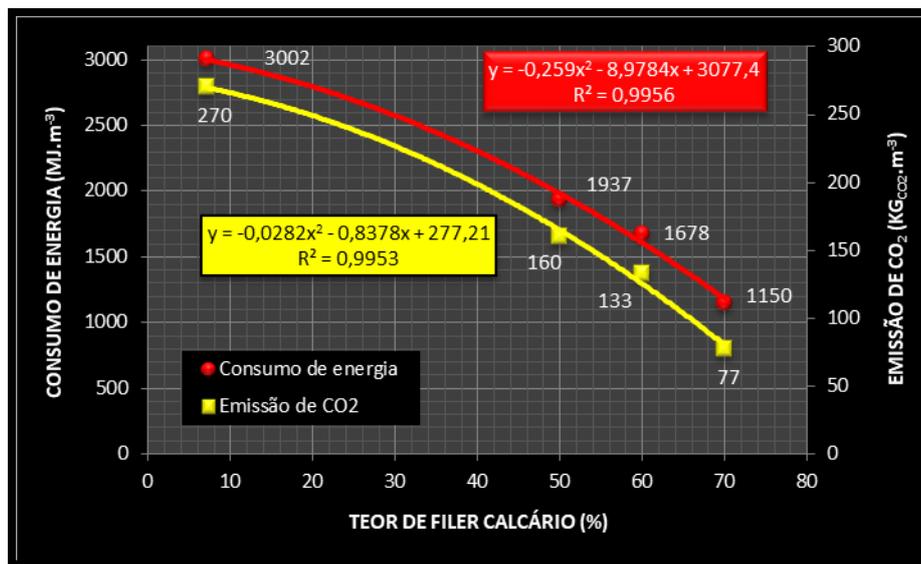
Observa-se que a emissão de CO₂ por m³ de concreto é diretamente proporcional ao teor total de CP e a resistência à compressão axial e inversamente proporcional ao de FC (Figura 03). Com a substituição de 50% de FC há redução de 40,7% na emissão total de CO₂, com 60% de 50,7% e com 70% de 71,5%, respectivamente,

Tabela 09: Emissão de CO₂ total do concreto (kg.m⁻³) e unitária (kg.m⁻³.MPa⁻¹), bem como consumo de energia total do concreto (MJ.m⁻³) e unitária (MJ.m⁻³.MPa⁻¹)

Traço	Emissão total CO ₂ (kg _{CO2} .m ⁻³)	Emissão unitária de CO ₂ 28 dias (kg _{CO2} .m ⁻³ .MPa ⁻¹)	Emissão unitária de CO ₂ 91 dias (kg _{CO2} .m ⁻³ .MPa ⁻¹)	Consumo Energia (MJ.m ⁻³)	Energia unitária 28 dias (MJ.m ⁻³ .MPa ⁻¹)	Energia unitária 91 dias (MJ.m ⁻³ .MPa ⁻¹)
REF	270	2,3	2,1	3002	25,4	23,6
FC50	160	2	1,8	1937	24,2	22,1
FC60	133	2,4	2	1678	29,8	25,5
FC70CV10	77	2,8	1,5	1150	41,1	22,2

Fonte: Autores

Figura 03: Teor de filer calcário x emissão de CO₂ e consumo de energia



Fonte: Autores

constatando-se, assim, a influência da diminuição do teor de CP nas emissões de CO₂ do concreto. Atesta-se, desta forma, a proporcionalidade entre emissão de CO₂ e resistência à compressão, porque há necessidade do aumento do teor de CP para obtenção de resistências mais elevadas, isto é, diminuição da relação a/ag.

Segundo Kjellsen et al. (2005) o clínquer Portland é responsável por mais de 91% das emissões de CO₂ do concreto, logo, ações que diminuam o teor de clínquer constituem em boa opção para a redução da emissão dos GEE's e para o aumento da sustentabilidade global das estruturas de concreto. No presente trabalho o percentual de emissões de CO₂ do clínquer Portland em relação ao total do concreto foram: 87% para o REF, 82% para o FC50, 80% para o FC60 e 70% para o FC70CV10, observando-se

uma diminuição proporcional da participação nas emissões de CO₂ do concreto, com a minoração do teor de clínquer nas misturas.

Costa (2012) apresenta concreto com cimento Portland CPV-ARI com resistência à compressão axial de 50 MPa, consumo de CP de 487 kg.m⁻³ e emissões de 485 kg_{CO2}.m⁻³, enquanto que, no presente trabalho, o traço FC70CV10, aos 91 dias, apresentou resistência de 51,8 MPa, consumo de CP de 97 kg.m⁻³, consumo de 87 kg.m⁻³ de clínquer e emissões de 77 kg_{CO2}.m⁻³. Observa-se que, em relação aos dados do autor supracitado, houve redução de 390 kg.m⁻³ de CP, 408 kg.m⁻³ de CO₂ que representam - 80 % e -84 %, respectivamente, de redução por m³, para obtenção de praticamente a mesma resistência à compressão (50 MPa x 51,8 MPa).

Conforme Daminieli (2013), quanto maior a resistência à compressão do concreto menores são as emissões unitárias de CO₂ em kg_{CO2}.m⁻³.MPa⁻¹. Na Tabela 09 é possível observar que, aos 28 dias, a afirmação do autor está em consonância com os valores encontrados, à exceção do REF. A 91 dias, para os traços binários, observa-se que houve diminuição do índice de emissão de CO₂ com a resistência à compressão. Entretanto, para o traço ternário FC70CV10, para a menor resistência observada de 51,8 MPa, houve queda acentuada do índice unitário, devido ao efeito das reações pozolânicas e sinérgicas que propiciaram aumento da resistência à compressão em 85% de 28 para 91 dias, enquanto a emissão de CO₂ permaneceu a mesma nesse período.

Ainda Daminieli (2013) encontrou valores entre 1,5 e 2 kg_{CO2}.m⁻³.MPa⁻¹ aos 28 dias, os quais situam-se entre os menores índices de CO₂ encontrados na literatura nacional e internacional. Na Tabela 09 é possível constatar que a média dos valores aos 28 dias é de 2,4 kg_{CO2}.m⁻³.MPa⁻¹, ou seja, 20% acima do valor máximo do intervalo indicado. Ainda segundo esse mesmo autor, o menor valor possível para a produção de concretos, sem a substituição de CP por AM, é de 4 kg_{CO2}.m⁻³.MPa⁻¹ aos 28 dias, sendo que o valor do REF, sem substituição de clínquer no presente trabalho, nesta idade, é de 2,3 kg_{CO2}.m⁻³.MPa⁻¹, ou seja, 43% menor que o proposto. Estes dados demonstram o bom desempenho do concreto eco amigável proposto em relação a emissão de CO₂ por m³ de concreto indicando que a substituição de CP por FC e CV impacta positivamente a redução da emissão de GEE's. Constata-se, ainda, que aumentando a idade de controle para 91 dias, o valor unitário de emissão de CO₂ para as misturas com FC e CV é, em média, de 1,8 kg.m⁻³.MPa⁻¹, mostrando a importância da idade de cura em benefício do aumento da sustentabilidade do concreto, principalmente para misturas ternárias com pozolanas.

A Tabela 09 mostra a quantidade de energia total consumida por m³ de concreto, a partir dos coeficientes de consumo (em MJ.ton⁻¹), os quais foram os seguintes: a) CP = 5.780; b) CV = 300; c) areia = 90; d) brita = 140; e) água = 1.130; f) aditivo = 15.030 (Isaia e Gastaldini, 2004); g) FC = 120

(estimado). Os coeficientes referem-se a valores médios para cada um dos materiais constituintes. Os resultados demonstram que o consumo de energia é diretamente proporcional a resistência à compressão e ao consumo de CP e inversamente proporcional ao teor de FC (Figura 03). Com a substituição de 50% de FC, há uma redução de 35,5 % no consumo de energia, com 60% de 44,1 % e com 70 % de 61,7 %, respectivamente, constatando-se, assim, a influência da diminuição o teor de CP no consumo de energia do m³ de concreto. Atesta-se, assim, a proporcionalidade entre consumo de energia e resistência à compressão, porque há necessidade do aumento do teor de CP para obtenção de resistências mais elevadas, isto é, diminuição do fator a/ag.

Do ponto de vista da sustentabilidade, os valores referentes ao consumo de energia demonstram a eficácia da substituição de CP por AM (FC e CV), haja visto as reduções relevantes observadas variando de 3002 MJ.m⁻³ para REF a 1150 para 70FC10CV, diferença de 62 %. Entretanto, para os consumos unitários, em prazo mais dilatado, 91 dias por exemplo, a variação é muito pequena, com média geral para todos os traços de 23,4 MJ.m⁻³.MPa⁻¹ e coeficiente de variação de apenas 6,8 %, mostrando que há certa equivalência entre os consumos de energia e a resistência à compressão. Um consumo total menor de energia por m³ de concreto, significa que menos combustíveis fósseis serão utilizados, bem como menores serão as emissões de GEE advindas da utilização deste tipo de combustível. Com isso é obtido um duplo benefício ambiental, ou seja, a diminuição do consumo de energia por um lado e a redução na emissão de GEE por outro.

4.3 Intensidade de ligante (IL)

Tendo em vista que um dos principais caminhos para a diminuição das emissões de CO₂ e de consumo de energia no CP é sua substituição por AM, geralmente a quantificação desta redução ocorre por meio de um índice. Daminieli (2013) propôs um índice que representa o consumo de materiais aglomerantes correlacionado com a respectiva resistência à compressão axial do concreto, denominado de *Intensidade de Ligantes* (IL). O índice correlaciona o consumo total de ligantes (impacto ambiental) em kg.m⁻³, com a

resistência à compressão axial (desempenho) em MPa. O estudo elaborado pelo autor calculou a IL em diversos trabalhos publicados no âmbito nacional, internacional e de mercado. Em seu estudo Damineli (2013) observou que o teor mínimo de IL encontrado foi de 5 kg.m⁻³.MPa⁻¹, sendo que não foi computado no cálculo da IL as substituições por FC, somente os materiais ligantes (cimentos). Posteriormente Scrivener et al. (2018) ampliaram esses estudos propondo novos parâmetros para concretos com resistência superior a 50 MPa cujo valor mínimo de IL seria de 5 kg.m⁻³.MPa⁻¹ aos 28 dias; para 30 MPa de 8 kg.m⁻³.MPa⁻¹; enquanto a média global para essa idade e todas as resistências seria de 12 kg.m⁻³.MPa⁻¹.

Os resultados referentes a IL são mostrados na Tabela 10, cujos resultados encontrados estão, em parte, de acordo com a proposição de Scrivener et al. (2018). Na classificação daqueles autores, os concretos com resistência superior a 50 MPa apresentaram IL ≥ 5 kg.m⁻³.MPa⁻¹, sendo que na

Tabela 10: Intensidade de ligante - IL (kg.MPa⁻¹)

Traço	Ligante (kg.m ³)	IL 28 dias (kg.MPa ⁻¹)	IL 91 dias (kg.MPa ⁻¹)
REF	382	3,2	3,0
FC50	214	2,7	2,4
FC60	173	3,1	2,6
FC70CV10	109	3,9	2,1

Fonte: Autores

presente pesquisa, os valores obtidos nos três traços ensaiados com resistência à compressão maior que 50 MPa, a IL calculada foi, em média, de 3,0 kg.m⁻³.MPa⁻¹, valor 40% menor que o proposto pelos autores. Outro aspecto a ser mencionado refere-se ao traço FC70CV10 com uma IL de 3,9 kg.m⁻³.MPa⁻¹ a 28 dias o qual apresentou resistência à compressão bastante abaixo da proposição daqueles, entretanto mostra que a mistura com 70% de FC e 10% de CV enquadra-se em concretos com resistências próximas às usualmente utilizadas no mercado, demonstrando a possibilidade de elaboração de concretos convencionais com reduzida IL, indicando a possibilidade da otimização do uso de ligantes com teores próximos de 100 kg.m³ em concretos com resistências mais baixas. Segundo Scrivener et al. (2018) a média global para todas

as resistências apresentou uma IL de 12 kg.m⁻³.MPa⁻¹, sendo que a média encontrada no presente trabalho foi de 3,2 kg.m⁻³.MPa⁻¹ aos 28 dias, ou seja 73,3% inferior ao valor proposto pelos autores.

Também na Tabela 10 observa-se que a IL aos 91 dias de idade em relação aos 28 dias mostra reduções sensíveis em todos os traços. Este comportamento ocorre devido a quantidade de ligante ser constante ao longo do tempo, enquanto a resistência à compressão aumenta com o tempo de cura do concreto. Este efeito da idade do concreto, pode ser constatado na mistura ternária FC70CV10, a qual apresentou redução na IL, de 46,1%. Este comportamento ocorreu devido à evolução da resistência à compressão que cresceu 85%, de 28,0 MPa a 28 dias para 51,8 MPa a 91 dias, baixando a IL de 3,9 para 2,1 kg.m⁻³.MPa⁻¹ neste período, com um consumo de aglutinante de apenas 109 kg.m³.MPa⁻¹, consumo de água de 104 L.m³ e relação a/ag de 0,25. Este reduzido valor de IL constitui-se no menor obtido na presente investigação e, frente aos números da literatura, encontra-se entre os mais baixos apresentados por Damineli (2013).

Observa-se, então, a importância do tempo de cura de concretos, em especial os compostos com traços ternários de CP com pozolanas ou outras AM. Neste caso as reações pozolânicas, devidas à conjugação dos efeitos químicos e físicos que se processam ao longo do tempo, possuem um efeito importante, levando a diminuição dos volumes de poros, como atestam várias pesquisas relatadas pela literatura, por meio de ensaios de porosimetria. Como consequência, há aumento e melhoria nas propriedades gerais do concreto, especialmente quanto à durabilidade, vida útil e, sobretudo ao desempenho global quanto à sustentabilidade das estruturas.

4.4 Sustentabilidade

Para o cálculo do desempenho frente à sustentabilidade foram empregados índices relativos proporcionais aos resultados obtidos para cada uma das variáveis que compõe o estudo, de modo descendente para as propriedades positivas, e ascendentes para as negativas. A Tabela 11 mostra que foram arbitrados índices

proporcionais, cabendo à resistência à compressão índice 100 para o traço com o maior valor para as idades de 28 e 91 dias. Para o consumo de clínquer, emissão de CO₂ e consumo de energia foi atribuído o índice 100 para o traço com menor valor, porque essas três variáveis são

propriedades com o tempo, tão maior quanto mais elevado for o efeito sinérgico destas últimas, conforme descrito por Isaia *et al.* (2003). Frisa-se, então, que a sustentabilidade não depende somente da substituição de CP por AM, mas também da idade com que são medidas as

Tabela 11: Índices de consumo de clínquer, resistência à compressão, emissão de CO₂ e consumo de energia

Traço	Consumo clínquer	Resistência aos 28 dias	Resistência aos 91 dias	Emissão CO ₂	Consumo de energia	Sustentab. 28 dias (M.G.)	Sustentab. 91 dias (M.G.)
REF	22,8	100,0	100,0	28,5	38,3	39,7	39,7
FC50	40,7	67,8	69,0	48,1	59,4	53,0	53,2
FC60	50,3	47,7	51,6	57,9	68,5	55,5	56,6
FC70CV10	100,0	23,7	40,7	100,0	100,0	69,8	79,9

Fonte: Autores

inversamente proporcionais à resistência à compressão. A escolha do traço mais sustentável deu-se através da maior média geométrica (M.G.) entre as quatro variáveis de estudo.

Aos 28 dias os traços que apresentaram as maiores médias geométricas para os índices de sustentabilidade foram com FC em misturas binárias e ternária com CV. O FC70CV10 apresentou o menor valor no quesito consumo de clínquer, emissão de CO₂ e consumo de energia sendo o traço mais sustentável, apesar do seu desempenho em relação à resistência à compressão ter sido muito baixo devido ao reduzido valor apresentado aos 28 dias. Observa-se que os traços com FC em misturas binárias apresentaram valores muito próximos de M.G. com uma diferença inferior a 5%. O traço REF se posiciona em último lugar, por causa da sua maior emissão de CO₂, consumo de energia e de clínquer.

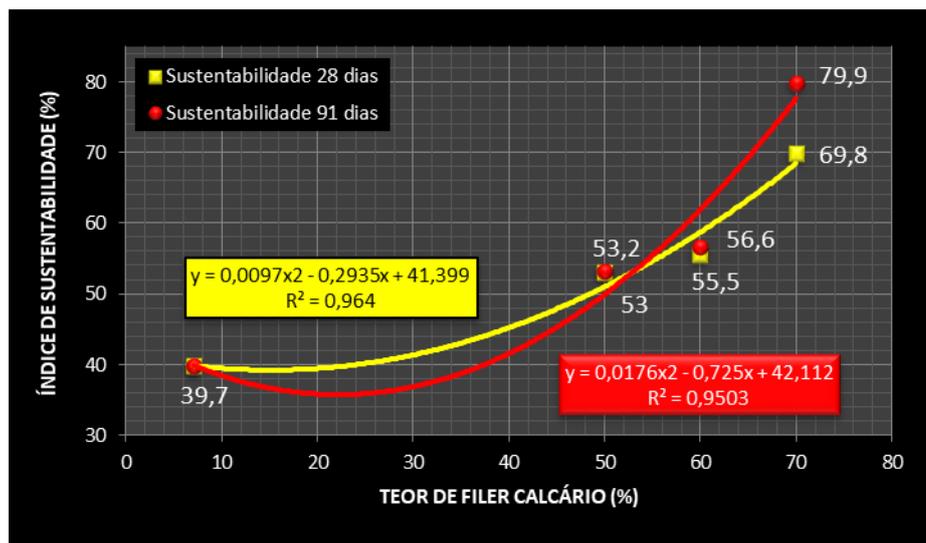
Aos 91 dias o traço que apresentou a maior média geométrica foi o FC70CV10 com índice 79,9%, seguido do FC60 e FC 50. Aos 91 ocorreu um distanciamento maior do traço FC70CV10 que apresentou os menores valores para consumo de clínquer, emissão de CO₂ e consumo de energia e, ainda, obteve incremento de 85% na resistência à compressão, com $f_{c91} = 51,8$ MPa, o que lhe conferiu o melhor desempenho nessa idade. Observa-se quão importante é a consideração da idade do concreto para o seu desempenho global, porque a ação das AM em geral e das pozolanas em particular, conferem evolução em suas

propriedades do concreto.

Na Figura 04 é possível observar uma proporcionalidade entre o teor de FC e o índice de sustentabilidade, ou seja, à medida que mais FC é adicionado aos traços maior a sustentabilidade em ambas as idades de controle. Importante notar que a ordem de sustentabilidade dos traços é dada pelo teor de FC, iniciando no REF (menos sustentável) e finalizando no FC70CV10 (mais sustentável). Outro aspecto a ser destacado refere-se a similaridade dos valores do índice de sustentabilidade aos 28 e 91 dias de idade. A exceção do FC70CV10 (28 e 91 dias) os demais traços apresentaram valores muito próximos (até quase iguais) nas duas idades de controle. Este fato deve-se aos índices proporcionais terem sido muito próximos nas duas idades de controle o que levou a índices de sustentabilidade igualmente similares.

Com respeito à durabilidade, variável fundamental para a sustentabilidade e não abordada no presente trabalho, sabe-se que concretos com resistências superiores a 50 MPa e fator $a/ag \leq 0,30$, geralmente apresentam bom desempenho. Com efeito, à medida que diminui a porosidade da pasta, o transporte de fluidos é dificultado porque para os poros menores que o diâmetro crítico, a permeação e difusão de fluidos reduz-se drasticamente. Malhotra *et al.* (2000) mostram que, para misturas com 150 kg.m⁻³ de CP, 200 kg.m⁻³ de CV, 102 L.m⁻³ de água, com

Figura 04: Índice de sustentabilidade x teor de filer calcário



Fonte: Autores

fator $a/ag = 0,29$, apresentaram boa durabilidade, especialmente para as variáveis relacionadas com a corrosão da armadura, para estudos in situ com até 10 anos de idade.

Igualmente, Isaia et al. (2012), em análise estatística com 7.308 resultados para variáveis da microestrutura e da durabilidade, mostrou que, entre as variáveis dependentes que integram o modelo geral das regressões lineares múltiplas, o teor de adições minerais e o fator a/ag foram as que mostraram a maior significância estatística. Com respeito às variáveis ligadas com à durabilidade, o melhor desempenho de concretos com adições minerais foi obtido com o teor de 70%, fator $a/ag = 0,35$ e resistência à compressão acima de 50 MPa, devido aos efeitos físico, químico e sinérgicos que se processam ao longo do tempo, conforme já ressaltado por diversos trabalhos publicados na literatura. Comportamento semelhantes quanto ao desempenho à durabilidade são esperados pelas misturas deste trabalho com teores de FC maiores que 50%, 10% de CV, fator $a/ag = 0,25$ e volume total de água da ordem de 100 L.m^{-3} .

5. CONCLUSÃO

O trabalho mostra que é possível obter-se um concreto eco amigável com baixa emissão de CO_2

e consumo de energia, através do emprego de teores elevados de FC, baixo fator a/ag , com granulometria controlada por meio do empacotamento das partículas, utilização de aditivo hiperplastificante, com trabalhabilidade de $100 \pm 20 \text{ mm}$, resultando em benefícios para a sustentabilidade global das estruturas de concreto.

Os traços investigados mostram a possibilidade de produzir-se concreto eco amigável, com teores de CP da ordem de 238 kg.m^{-3} e $f_{c28} = 80,1 \text{ MPa}$ e de 192 kg.m^{-3} de CP com $f_{c28} = 56,6 \text{ MPa}$, respectivamente com 50% e 60% de FC em substituição ao CP. Aos 91 dias de idade, a mistura com 70% de FC e 10% de CV apresentou $f_{c91} = 51,8 \text{ MPa}$, emissão de $77 \text{ kgCO}_2.\text{m}^{-3}$ e consumo de energia de 1.150 MJ.m^{-3} , com apenas 97 kg.m^{-3} de CP (87 kg.m^{-3} de clínquer) e 104 L.m^{-3} de água, o que representa uma intensidade de ligante de apenas $2,1 \text{ kg.MPa}^{-1}$, um dos menores já publicados pela literatura, o que demonstra a excepcional sustentabilidade não só deste traço como dos demais pesquisados.

Foi constatada a possibilidade de execução de concreto eco amigável, com f_{ck} entre 20 e 80 MPa, dependendo da escolha do teor de adição mineral e idade de controle (28 ou 91 dias), sendo possível a aplicação deste tipo de concreto em construções usuais com uma idade de controle de 28 dias e f_{ck} de 20 MPa. Os resultados mostraram que uma das vias para o aumento da sustentabilidade dos

concretos eco amigáveis ocorre pela utilização de resistências mais elevadas.

Em relação aos traços com AM foi possível constatar que eles emitem uma quantidade menor de CO₂ e consomem menos energia quando comparados ao REF, sendo os parâmetros citados inversamente proporcionais ao teor de FC e diretamente proporcionais a resistência à compressão. Assim os dados deste trabalho mostram a possibilidade de obter-se concretos eco amigáveis, devido ao baixo consumo de CP (clínquer) e de água de ordem de 100 kg.m⁻³, para níveis de resistência à compressão de 50 MPa, a 91 dias de idade. Portanto, são concretos muito sustentáveis ao meio ambiente.

Uma descrição apropriada para o desempenho dos traços apresentados no presente trabalho é dada por Agopyan e John (2011): "*Um material mais resistente (concreto), mais durável e que emprega menos matéria prima de alto consumo energético, como a fração clínquer do cimento Portland, é, sem dúvida, um material mais sustentável*".

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro - RJ, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo Blucher, 2011 (Série Sustentabilidade, 5).
- CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do Cimento Portland: Estudo experimental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- COSTA, B. L. C., **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil**. Dissertação, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- COURARD, L.; HERFORT, D.; VILLAGRÁN, Y. **Limestone powder**. In: DE BELIE, N.; SOUTSOS, M.; GRUYART, E. (Eds.). RILEM State-of-the-art Reports, Technical Committee 238 SCM, Working Group 4., Cham: Springer, v. 25, p. 122-151, 2018.
- DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. 237 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2013.
- DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S. **Measuring the Eco-Efficiency of Cement Use**. Cement and Concrete Composites, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.
- DAMTOFT, J. S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; GARTNER, E.; SORRENTINO, D. (2008) **Sustainable development and climate change initiatives**. Cement and Concrete Research 38:115–127.
- DE MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; PRUDÊNCIO JR, L. R. **Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes**. Construction and Building Materials, v. 225, p. 941–955, 2019.
- DE WEERDT, K.; HAHA, M. B.; LE SAOUT, G.; KJELLEN, K. O. **Hydration mechanisms of**

ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. Cement and Concrete Research, n. 41, p. 279-291, 2011.

DESCHNER, F.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B. **Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash.** Cement and Concrete Research, v. 42, p. 1389-1400, 2012.

DETWILER, R. J.; MEHTA, P. K. **Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete.** ACI Materials Journal, v. 86, n. 6, p. 609-614, 1989.

DHIR, R. K.; LIMBACHIYA, M. C.; McCARTHY, M. J. **Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction.** Materials and Structures, v. 40, n. 5, p. 459-473, 2007.

FELTRIN, C. S.; ISAIA, G. C.; RUVIARO, E. R.; RODRIGUES, A.; RIBEIRO, L. **Empacotamento de partículas com fíler calcário em concretos: um estudo das propriedades e sustentabilidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 58., Belo Horizonte, 2016. Anais... Belo Horizonte: IBRACON.

FENNIS, S. A.; WALRAVEN, J. C. **Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design.** Heron, v. 57, n. 2, p. 73-101, 2012.

FUNK, J.; DINGER, D. **Particle packing, part III: discrete versus continuous particles sizes.** Inter-ceram, n. 41, p. 332-334, 1992.

GARTNER, E.; HIRAO, H. **A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete.** Cement and Concrete Research, v. 78, p. 126-142, Jun. 2015.

GCCA. **Global Cement and Concrete Association (2017).** <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>. Acesso em: 02 abr. 2020.

HABERT, G.; DENARIE, E.; SAJNA, A.; ROSSI, P. **Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes.**

Cement and Concrete Composites, n. 38, p. 1-11, 2013.

HELENE, P. R.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini, 1992.

HERFORD, D. (2008). **Developments needed in the production and use of cement for large reductions in CO₂ emissions by 2050.** In: Proceedings of the Anna Maria workshop IX sustainable cements: challenges, opportunities & applications (November 11-14).

IRASSAR, E. F. **Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler - A review.** Cement and Concrete Research, v. 39, n. 3, p. 241-254, 2009.

ISAIA, G. C., GASTALDINI, A. L. G., **Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso.** Ambiente Construído, v.4, n.2, pp. 19-30, Abr/Jun. 2004.

ISAIA, G. C.; FURQUIM, P.; GASTALDINI, A. L. G. **A statistical approach of binary and ternary concrete mixtures with mineral additions.** Construction & Building Materials, v. 36, p. 597-603, 2012.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. **Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete.** Cement & Concrete Composites, v. 25, p. 69-76, 2003.

JOHN, V. M.; DAMINELI, B. L.; QUATTRONE, M. **Fillers in cementitious materials: Experience, recent advances and future potential.** Cement and Concrete Research, v. 114, p. 65-78, 2018.

KJELLSSEN, K. O.; GUIMARAES, M.; NILSSON, A. **The CO₂ balance of concrete in a life cycle perspective.** Danish Technological-DTI, 2005.

LOLLINI, F.; REDAELI, E.; BERTOLINI, L. **Effects of Portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete.** Cement and Concrete Composites, v. 46, 2014, p. 32-40.

MADANI, H.; RAMEZANIANPOUR, A. A. The influence of Ultrafine **Filler Materials on Mechanical and Durability Characteristics of Concrete**. Civil Engineering Infrastructures Journal, p. 251-262, 2016.

MALHOTRA, V. M.; ZHANG, M. H.; READ, P. H.; RYELLI, J. **Long-Term Mechanical Properties and Durability Characteristics of High-Strength/High-Performance Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials under Outdoor Exposure Conditions**. ACI Materials Journal, v. 97, no. 5, September-October 2000.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2o Ed. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILLEGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224p.

PALM, S; PROSKE, T.; REZVANI, M.; HAINER, S.; MULLER, C.; GRAUBNER, C. A. **Cements with a high limestone content – Mechanical properties, durability and ecological**

characteristics of the concrete. Construction and Building Materials, v. 119, p. 308-318, ago. 2016.

PERLOT, C.; ROUGEAU, P.; DEHAUDT, S. **Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry**. Cement & Concrete Composites, v. 44, p. 50-57, nov. 2013.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry**. Cement and Concrete Research, v. 114, n. March, p. 2–26, 2018.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **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, 64 p., 2019.

ZHAO, H.; SUN, W.; WU, X.; GAO, B. **The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures**. Journal of Cleaner Production, v. 95, p.66-74, 2015.