

CONCRETO ECO AMIGÁVEL PARA ESTRUTURAS SUSTENTÁVEIS

ECO FRIENDLY CONCRETE FOR SUSTAINABLE STRUCTURES

GUSTAVO ISAIA, M.Sc. | UFSM
EDUARDO RIZZATTI, Dr. | UFSM
SILVANE S. SILVA, M.Sc. | UFSM
GERALDO ISAIA, Dr. | UFSM
ANDRÉ LÜBECK, Dr. | UFSM

RESUMO

O presente artigo contempla o estudo de concretos eco amigáveis através da substituição do 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, emissão de CO₂eq, consumo de energia e intensidade de ligante, com os quais foram calculados índices comparativos para observar o desempenho das misturas. Do ponto de vista da sustentabilidade, foi possível elaborar um concreto com resistência à compressão de 51,8 MPa, aos 91 dias, com 77 kgCO₂.m⁻³ de concreto, onde 80% do CP foram substituídos 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 CO₂eq e consumo de energia muito baixos, através do emprego de elevados teores de adições minerais (AM) e reduzido impacto ambiental.

PALAVRAS CHAVE: Sustentabilidade; concreto eco amigável; filer calcário; cinza volante; emissão de CO₂eq

ABSTRACT

The present article contemplates the study of eco friendly concrete by substituting Portland cement (PC) for very high levels of limestone filler (LF) in binary and ternary mixtures with fly ash (FA) in proportions of 50 to 80%, with ratios 0.25 a/b and optimization of the particle size. Results of compressive strength, CO₂eq emission, energy consumption and binder intensity are presented, with which comparative indices were calculated to observe the performance of the mixtures. From the point of view of sustainability, it was possible to prepare concrete with a compressive strength of 51.8 MPa, at 91 days, with 77 kgCO₂.m⁻³ of concrete, where 80% of the PC were replaced by 70% of LF and 10% of FA, with consumption of 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 CO₂eq emissions and energy consumption, through the use of high levels of mineral additions (MA) and reduced environmental impact.

KEY WORDS: Sustainability; eco friendly concrete; limestone filler; fly ash; CO₂eq emission



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 kg.hab-1.ano-1 e no Brasil 52 milhões de ton e 350 kg.hab-1.ano-1 (VISED0 e PECCHIO, 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 kg.hab-1.ano-1, valor 10 vezes maior 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 m³ 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) (VISED0 e PECCHIO, 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 antagonista entre o desenvolvimento econômico requerido pela sociedade atual e a sustentabilidade global do planeta, pelo declínio das condições atmosféricas 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 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 deve 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 CO₂.

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 do 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 mais elevados 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 do FC juntamente com o 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 podem 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, 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 GEE no meio ambiente. Este trabalho apresenta a factibilidade do uso do FC em teores maiores do que a literatura atual apresenta, em geral, limitados a 50% de substituição em relação à massa ou volume de CP. Trata-se de um estudo prospectivo com o intuito de diminuir o consumo de clínquer em valores abaixo de 100 kg.m-3 em concreto estrutural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A sustentabilidade do filler 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

à substituição do FC, tendo em vista que ele não requer calcinação, representando uma redução na energia térmica consumida, bem como uma diminuição nas emissões, o que representa uma parte comercial do produto CP. Com a utilização do 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 do 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 respondendo por 60% das emissões produzidas em uma fábrica de CP. Estas emissões são mitigadas, em parte, pela incorporação 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, reduzindo 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, em relação à utilização do FC, é sua menor emissão de CO₂, relacionada ao transporte, haja vista que a matéria-prima é a mesma do clínquer. Estes e outros aspectos deverão elevar o consumo do FC nos CP em um 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 incorporação de FC, em especial no que diz respeito à resistência mecânica e durabilidade (HERFORT, 2008).

2.2 O fler 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 quantidade de água, aumentando a mobilidade das misturas com o uso de superplastificantes e, principalmente, controlar o arranjo entre partículas para diminuir os vazios pelo aumento da compactidade entre os grãos de CP e 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 CP. Segundo Fennis e Walraven (2012) é possível conceber concretos 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 um trabalho 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 CP é substituída; d) todos os concretos feitos de CP com 50% em massa de FC e fator a/ag de 0,35 apresentaram, 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 à resistência à compressão e a 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 compactidade.

As misturas do trabalho foram pré-estabelecidas, baseadas em estudos prévios, com a utilização de quatro tipos de traços, variando o nível de substituição do CP pelas

AM: 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 (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), o CP utilizado possui teor de calcita de 7%, gesso de 2,5% e perda ao fogo de 0,5%, o que leva a um teor de clínquer de ≈ 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.

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	-	-

Tabela 01: Características físicas dos aglomerantes

Fonte: Autores

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

Tabela 02: Características químicas dos aglomerantes

Fonte: Autores

Aglomerantes (µm)	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

Tabela 03: Tamanho dos aglomerantes

Fonte: Autores

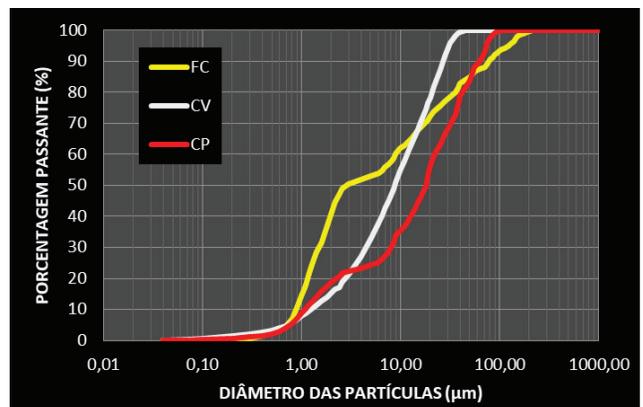


Figura 01: Distribuição granulométrica dos aglomerantes

Fonte: Autores

Observa-se que o índice de desempenho do FC é praticamente igual ao da CV, apesar do 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 ($\approx 92\%$), apesar do FC apresentar pouca reatividade química (algumas vezes considerado inerte), enquanto a CV resulta em reações pozolônicas importantes. Estas características físico-químicas do FC mostram que estes efeitos agindo simultaneamente, podem produzir aumento de resistência à compressão 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 ($D_{\text{máx}} < 1,2 \text{ mm}$) e média ($D_{\text{máx}} < 2,4 \text{ mm}$), 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 ($D_{\text{máx}} \leq 12,5 \text{ mm}$). A Tabela 04 resume os resultados da caracterização 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
Abrásão Los Angeles (%)	-	-	11,07
Índice de forma	-	-	2,09
Absorção de água (%)	0,31	0,33	3,17

Tabela 04: Características físicas dos agregados
Fonte: Autores

3.3 Aditivo

Para aumentar o empacotamento das partículas foi necessária a dispersão das mesmas na pasta através da 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. Para tanto 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.

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

Tabela 05: Propriedades do aditivo hiperplastificante
Fonte: Autores

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. 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

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 e 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 uma 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 (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 observados nas Tabelas 06 e 07 respectivamente.

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
FC60	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

Tabela 06: Traço unitário definitivo em volume
Fonte: Autores

Traço	CP	Clínquer	FC	CV	Areia fina	Areia média	Brita 0	Aditivo	H2O
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

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

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 à resistência a compressão. Os resultados da resistência à compressão 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 no teor das mesmas (Figura 02), bem como nenhuma mistura obteve resistência à compressão igual ou superior ao REF.

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

Tabela 08: Resistência à compressão axial com o desvio padrão
Fonte: Autores

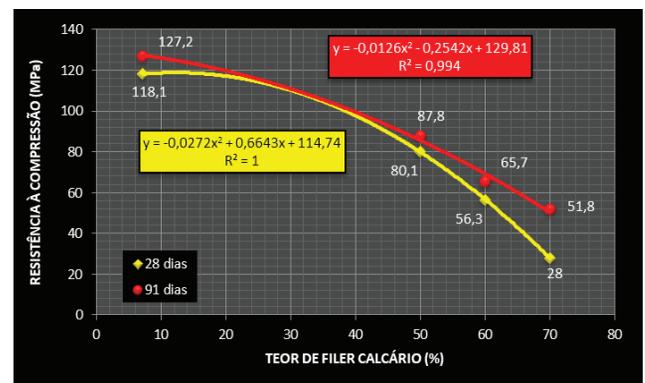


Figura 02: Teor de filer calcário x resistência à compressão
Fonte: Autores

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 à compressão superiores quando comparadas com o traço 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 Ramezani pour (2016), Zhao et al. (2015) e Dhir et al. (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 resulta 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 à compressão. O teor mínimo de substituição do CP 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 de 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, consequentemente, 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 levantadas, uma explicação bastante plausível e simples consiste nas conclusões de Dhir et al. (2007), onde se justifica 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 (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 se observa 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 na 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 da 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 CP no traço em questão (20%) os níveis de resistência à compressão alcançados pelo FC70CV10 ocorreram, além do efeito hidratação do CP, também, pelas ações físicas e pozolânicas, pois, neste caso, o imbricamento entre as partículas de CP com as AM são tão importantes quanto à quantidade de hidratos formados.

Ao analisar a resistência à compressão dos concretos eco amigáveis estudados verifica-se que, aos 91 dias, os valores estão acima dos 50 MPa cuja classificação enquadrar-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 à compressão 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; SCRIVENER et al., 2018; GARTNER e HIRAO, 2015).

Sendo assim com o aumento da resistência à compressão dos concretos eco amigáveis, menores serão as emissões de CO₂ por MPa e consequentemente maior será a sustentabilidade (CAMPOS, 2015; DAMINELI, 2013; DAMINELI et al., 2010). 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 kgCO2.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.

Traço	Emissão total CO2 (kgCO2.m-3)	Emissão unitária de CO2 28 dias (kgCO2.m-3.MPa-1)	Emissão unitária de CO2 91 dias (kgCO2.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

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)
Fonte: Autores

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

o aumento da sustentabilidade global das estruturas de concreto. No presente trabalho o percentual de emissões de CO2 do CP 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 CP nas misturas.

Costa (2012) apresenta um concreto elaborado com CPV-ARI, resistência à compressão de 50 MPa, consumo de CP de 487 kg.m-3 e emissão de 485 kgCO2.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 (87 kg.m-3 de clínquer) e emissão de 77 kgCO2.m-3. Observa-se que, em relação aos dados do autor supracitado, ocorreu uma 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 Damineli (2013), quanto maior a resistência à compressão do concreto menores são as emissões unitárias de CO2 em kgCO2.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. Aos 91 dias, para os traços binários, observa-se que ocorreu uma diminuição no 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

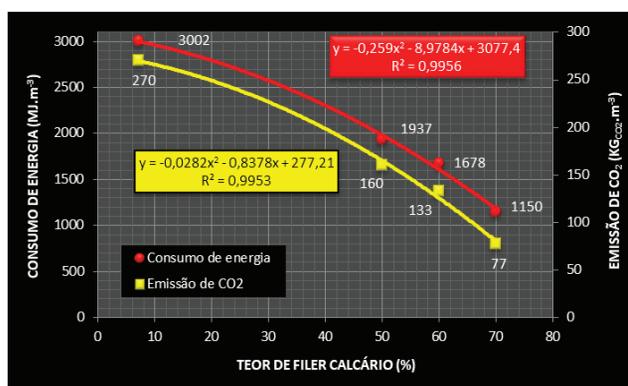


Figura 03: Teor de filer calcário x emissão de CO2 e consumo de energia
Fonte: Autores

Segundo Kjellsen et al. (2005) o CP é responsável por mais de 91% das emissões de CO2 do concreto, logo, ações que diminuam o teor de CP constituem em uma boa opção para a redução da emissão dos GEE's e para

propiciaram aumento da resistência à compressão em 85% de 28 para 91 dias, enquanto a emissão de CO₂ permaneceu a mesma nesse período.

Ainda Daminel (2013) encontrou valores entre 1,5 e 2 kgCO₂.m⁻³.MPa⁻¹ aos 28 dias, os quais se situam 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 kgCO₂.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 kgCO₂.m⁻³.MPa⁻¹ aos 28 dias, sendo que o valor do REF, sem substituição de CP no presente trabalho, nesta idade, é de 2,3 kgCO₂.m⁻³.MPa⁻¹, ou seja, 43% menor que o proposto. Estes dados demonstram o bom desempenho do concreto eco amigável proposto em relação à 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. Constatou-se, ainda, que aumentando a idade de controle para 91 dias, o valor unitário da 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 por 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 do consumo de energia no CP é sua substituição por AM, existe a necessidade de quantificação desta redução através de um índice. Daminel (2013) propôs um índice que representa o consumo de materiais aglomerantes correlacionado com a respectiva resistência à compressão 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 (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 Daminel (2013) observou que o teor mínimo da IL encontrada 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 esse estudo propondo novos parâmetros: concretos com resistência superior a 50 MPa cujo valor mínimo da 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 \geq 5 kg.m⁻³.MPa⁻¹. No presente trabalho, os três traços com resistência à compressão maior que 50 MPa, apresentaram uma IL, média, de 3,0 kg.m⁻³.MPa⁻¹, valor este 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, aos 28 dias, apresentando uma resistência à compressão bastante abaixo da proposição daqueles. Neste caso evidencia-se 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 da 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.

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

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

Também na Tabela 10 observa-se que a IL, aos 91 dias, mostra reduções sensíveis, em todos os traços, quando comparada aos 28 dias. 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, que apresentou redução na IL, de 46,1%. Este comportamento ocorreu devido à evolução da resistência à compressão que cresceu 85%, de 28,0 MPa aos 28 dias para 51,8 MPa aos 91 dias, diminuindo a IL de 3,9 para 2,1 kg.m⁻³.MPa-1 neste período, com um consumo de aglutinante

e água de, apenas, 109 kg.m³.MPa-1 e 104 L.m³, respectivamente, e relação a/ag de 0,25. Este reduzido valor da 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 dos concretos, em especial os traços ternários de CP com pozolanas ou outras AM. Neste caso as reações pozolânicas, devido 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 um 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 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 nas 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 inversamente proporcionais à resistência à compressão. A escolha do traço mais sustentável ocorreu através da maior média geométrica (M.G.) entre as quatro variáveis de estudo.

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

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

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 quesitos 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, devido a 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 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 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 incorporado 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 (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.

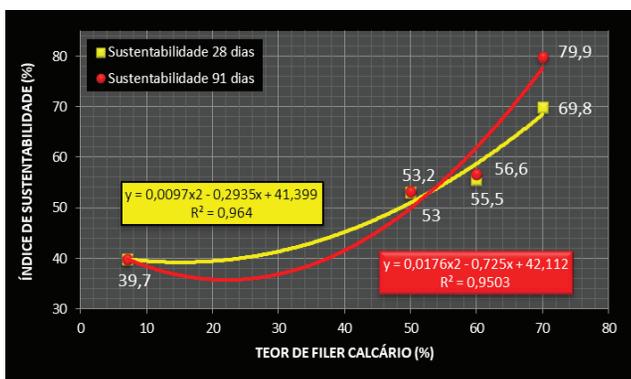


Figura 04: Índice de sustentabilidade x teor de filer calcário
Fonte: Autores

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 reduzem-se drasticamente. Malhotra et al. (2000) mostram que, misturas com 150 kg.m⁻³ de CP, 200 kg.m⁻³ de CV, 102 L.m⁻³ de água, com fator a/ag de 0,29, apresentaram boa durabilidade, especialmente para as variáveis relacionadas com a corrosão da armadura, para estudos in situ de 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 AM e o fator a/ag foram as que mostraram a maior significância estatística. Com respeito às variáveis ligadas com a durabilidade, o melhor desempenho de concretos com AM foi obtido com o teor de 70%, fator a/ag de 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 semelhante quanto ao desempenho à durabilidade são esperados pelas misturas deste trabalho com teores de FC maiores que 50%, 10% de CV, fator a/ag de 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 CO₂ e consumo de energia, através do emprego de teores elevados de FC, baixo fator a/ag , com granulometria controlada por meio do empacotamento de partículas, utilização de aditivo hiperplastificante, com trabalhabilidade de 100 + 20 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 $f_{c28} = 80,1$ MPa e de 192 kg.m⁻³ de CP com $f_{c28} = 56,6$ 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 $f_{c91} = 51,8$ MPa, emissão de 77 kgCO₂.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 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 fck entre 20 e 80 MPa, dependendo da escolha do teor da AM 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 fck de 20 MPa. Os resultados mostraram que uma das vias para o aumento da sustentabilidade dos concretos eco amigáveis ocorre pela utilização de resistências à compressão 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 obterem-se concretos eco amigáveis devido ao baixo consumo de CP (clínquer) e de água da 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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

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.

CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental**. 2015. 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**. 2012. Dissertação (COPPE/UFRJ) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

COURARD, L.; HERFORT, D.; VILLAGRÁN, Y. Limestone powder. In: DE BELIE, N.; SOUTSOS, M.; GRUYART, E. **Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials**. Paris: RILEM State of the art reports, 2018.

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) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 555-562, 2010.

DAMTOFT, J. S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; GARTNER, E.; SORRENTINO, D. Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research** v. 38, p.115-127, 2008.

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, 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, 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: 58º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2016.
- FENNIS, S. A.; WALRAVEN, J. C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. **Heron**, v. 57, p. 73-101, 2012.
- FUNK, J.; DINGER, D. Particle packing, part III: discrete versus continuous particles sizes. **Interceram**, 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, 2015.
- GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). **GNR project reporting CO2**. London: GCCA, 2017. Disponível em: <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. Developments needed in the production and use of cement for large reductions in CO2 emissions by 2050. In: ANNA MARIA WORKSHOP IX SUSTAINABLE CEMENTS: CHALLENGES, OPPORTUNITIES & APPLICATIONS, 2008, Holmes Beach. **Proceedings [...]**. Holmes Beach, 2008.
- IRASSAR, E. F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler - A review. **Cement and Concrete Research**, v. 39, 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, p. 19-30, 2004.
- ISAIA, G. C.; FURQUIM, P.; GASTALDINI, A. L. G. A statistical approach of binary and ternary concrete mixtures with mineral additions. **Construction and 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 and Concrete Composites**, v. 25, p. 69-76, 2003.
- JOHN, V. M.; DAMINELLI, B. L.; QUATTRONE, M. Fillers in cementitious materials: Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65-78, 2018.
- KJELLEN, K. O.; GUIMARAES, M.; NILSSON, A. **The CO2 balance of concrete in a life cycle perspective**. Taastrup: Danish Technological Institute (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, p. 32-40, 2014.
- MADANI, H.; RAMEZANIANPOUR, A. A. The influence of ultrafine filler materials on mechanical and durability characteristics of concrete. **Civil Engineering Infrastructures Journal**, v.49, 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, p. 518-525, 2000.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 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.
- 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, 2016.
- PERLOT, C.; ROUGEAU, P.; DEHAUDT, S. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 44, p. 50-57, 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, p. 2-26, 2018.
- VISEDO, G.; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.
- 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.

AUTORES

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8536-61051>

GUSTAVO DE AGUIAR ISAIA, M.Sc. | Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) | Correspondência: Rua Estácio de Sá 895/204, CEP 91330-430, Porto Alegre – RS, Brasil | e-mail: gustavoaisaia@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3956-6744>

EDUARDO RIZZATTI, Dr. | Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) | Correspondência: Rua Ignácio da Costa, 60; CEP 97020-810, Santa Maria – RS, Brasil | e-mail: edu_rizzatti@yahoo.com.br

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

SILVANE SANTOS DA SILVA, M.Sc. | Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) | Correspondência: Rua Elpídio de Menezes, 195/302; CEP 97105110, Santa Maria – RS, Brasil | e-mail: silvaneengciv@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0653-1227>

GERALDO CEHELLA ISAIA, Dr. | Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) | Correspondência: Rua das Camélias, 175; CEP 97020-120, Santa Maria – RS, Brasil | e-mail: geraldoisai@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5772-9933>

ANDRÉ LÜBECK, Dr. | Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) | Correspondência: Rua Prefeito Evandro Behr, 4279, Casa 08, CEP 97110-800, Santa Maria – RS, Brasil | e-mail: andrelubeck@gmail.com

COMO CITAR ESTE ARTIGO

ISAIA, Gustavo de Aguiar; RIZZATTI, Eduardo; SILVA, Silvane Santos da; ISAIA, Geraldo Cechella; LUBECK, André. Concreto Eco Amigável Para Estruturas Sustentáveis. **MIX Sustentável, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 33-46, dez. 2020.** ISSN 24473073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: dia mês. ano. doi:<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v7.n1.33-46>

DATA DE ENVIO: 20/07/2020

DATA DE ACEITE: 11/08/2020