

Consumption of superplasticizer admixture for different cements and their binder efficiency

Consumo de aditivo superplastificante em diferentes cimentos e a eficiência dos ligantes

R. T. CECIL^a

rafael.cecel@lme.pcc.usp.br
<https://orcid.org/0000-0003-1681-5071>

P. C. R. A. ABRÃO^a

pedro.abrao@lme.pcc.usp.br
<https://orcid.org/0000-0002-3416-3196>

F. A. CARDOSO^a

fabio.cardoso@lme.pcc.usp.br
<https://orcid.org/0000-0003-2642-0428>

V. M. JOHN^a

vanderley.john@lme.pcc.usp.br
<https://orcid.org/0000-0002-0588-8382>

Abstract

The optimum content of ether polycarboxylate-based superplasticizer, determined by rotational rheometry, and its effects on the environmental impacts of concretes were studied for cement and limestone filler. To assess the consistency and water reduction, flow-table tests were performed. Then, cement content reduction and binder and carbon intensity indexes were determined through estimation based on theoretical concretes. The evaluated pure and blended cements present significant variability of the optimum consumption of the admixture. The fillers consumed less superplasticizer per area than the other materials and compositions with fillers allowed for greater reduction of water content. The mixtures with superplasticizer presented lower cement rate and binder and carbon intensity indexes. The usage of this type of admixture in optimal content can reduce environment impacts, according to the parameters analyzed.

Keywords: superplasticizer, ether polycarboxylate, cement, binder efficiency, environment impacts.

Resumo

Foram estudados, em cimentos e fillers calcários, os teores ótimos de superplastificante (base policarboxilato éter), determinados através de reometria rotacional, e estimados seus efeitos nos impactos ambientais de concretos. Ensaios de espalhamento de argamassas em mesa de consistência foram feitos para determinação da redução de água e estimação de redução do cimento e intensidades de ligantes (IL) e CO₂ (IC) em concretos teóricos. Os cimentos estudados apresentaram significativa variação de consumo de superplastificante. Os *fillers* consumiram menos aditivo por unidade de área do que os demais materiais e suas composições apresentaram maior redução de água. O uso de superplastificantes levou à redução do consumo de cimento e das intensidades de ligante e carbono. A otimização do teor de superplastificante se mostrou eficiente para a redução de impactos ambientais.

Palavras-chave: superplastificante, policarboxilato éter, cimento, eficiência, impacto ambiental.

^a Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, SP, Brasil.

1. Introdução

A redução das emissões de gases do efeito estufa é uma das maiores preocupações e desafios da atualidade. Dentre eles, o dióxido de carbono (CO_2) é o gás antropogênico com maior responsabilidade no fenômeno [1]. A indústria cimenteira é a segunda maior responsável pela emissão deste gás [2] e a produção de clínquer corresponde a até 7% das emissões [3,4]. Por este motivo, se tem buscado alternativas para o aumento da eficiência energética, substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares, uso de coprocessamento para geração de energia e o uso mais eficiente do ligante [5]. Outro meio de redução de emissões ocorre através da minimização do volume de cimento nas misturas dos compósitos, possível, inclusive, através do uso de aditivos plastificantes e superplastificantes que possibilitam a redução de água através de melhoria de parâmetros reológicos. Em seu estudo sobre desempenho de aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos, Corrêa [6] demonstrou que o uso destes aditivos pode reduzir em até 10% o consumo de cimento em concretos, mantendo ou melhorando sua fluidez.

Os aditivos são produtos adicionados na mistura do compósito cimentício com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco ou endurecido. Eles são genericamente categorizados como: (i) plastificantes e superplastificantes, ou redutores de água; (ii) incorporadores de ar; (iii) aceleradores e (iv) retardadores de pega; (v) aceleradores de resistência [7]; e (vi) modificadores de viscosidade [8]. Aditivos com duas ou mais funções combinadas são chamados de polifuncionais.

Os plastificantes e superplastificantes são polímeros, com bases mais comuns de naftaleno, melanina, lignossulfonato, policarboxilato, ácidos e ésteres [9]. Eles são adsorvidos na superfície das partículas, exercendo a função de dispersão através de estabilização eletrostática, estérica ou eletroestérica [10], tornando capaz a redução de água. Podem apresentar variação de com-

patibilidade nos cimentos em função das características do ligante e das adições [11,12] e sua eficiência varia em função do peso molecular e comprimento das cadeias principais e laterais das quais é composto, sendo que, quanto maiores estas forem, maior a eficiência [13].

Estes aditivos são produtos de alto custo em argamassas e concretos. Quanto menor o seu consumo, menor o custo do compósito. Porém, devido às variações supracitadas, a dosagem sugerida pelos fabricantes pode ser imprecisa [14], ocasionando prejuízo no comportamento reológico, por insuficiência ou excesso [15], ou aumento do custo, pelo excesso. Assim, estudos para determinação de demanda de aditivo para cada material são uma alternativa de otimização de composição.

O objetivo deste trabalho é avaliar a demanda de aditivo e sua variação para diferentes tipos de cimentos comerciais e cimentos compostos em laboratório com diferentes teores de *filler* calcário e estimar o seu potencial de redução de consumo de cimento e de impactos ambientais em concretos.

2. Metodologia

Este estudo foi composto em três etapas: (i) consumo ótimo de aditivo superplastificante; (ii) potencial de redução de água; e (iii) capacidade estimada de redução de cimento e impactos ambientais. O estudo de consumo de aditivo ocorreu através de reometria rotacional das pastas e avaliação de suas curvas de defloculação. Foram estudados diferentes tipos de cimentos comerciais, obtidos de diferentes regiões do Brasil, e de dois *fillers* calcário. O potencial de redução de água foi analisado através dos dados de consistência das argamassas e, para estimar a capacidade de redução de cimento e a eficiência do ligante e fator de emissão de CO_2 , foi feita inferência para concretos utilizando curva de Abrams teórica. Nesta última etapa, analisando concretos, não foram utilizadas as composições com *filler*.

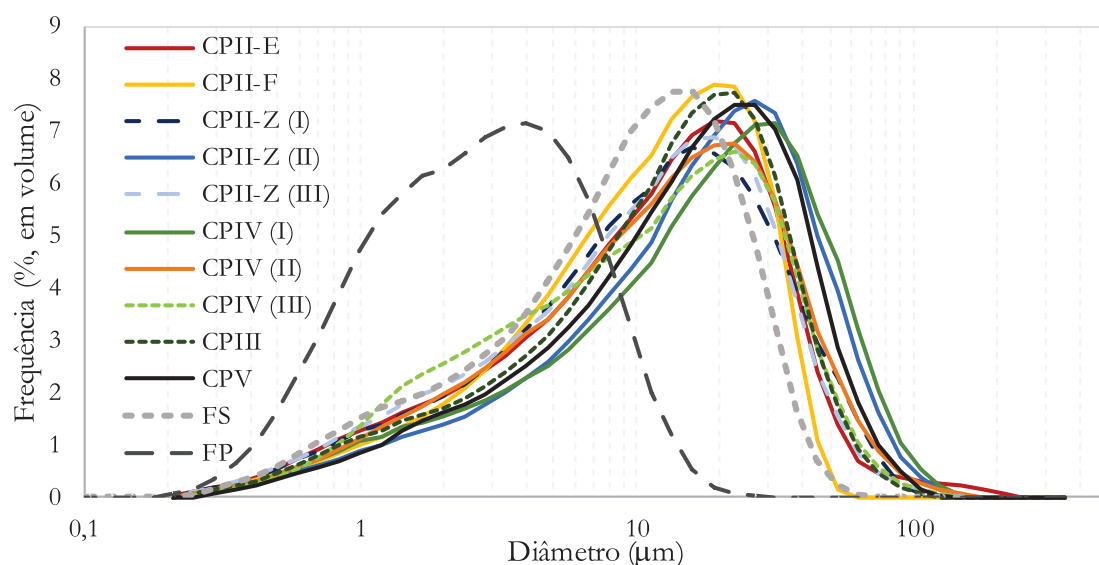


Figura 1
Curvas granulométricas dos cimentos e *fillers* utilizados

2.1 Materiais

Cimentos de diferentes fabricantes foram utilizados no estudo, incluindo: CPII-E, CPII-F; três CPII-Z e CPIV com pozolanas de diferentes naturezas; CPIII e CPV. O *filler* calcário de substituição (FS) e o de performance (FP), apresentam pureza de 94,0 e 98,7%, respectivamente. Para a análise de consistência, feita com argamassa, foi utilizada areia normal brasileira, conforme indicado na NBR 7214 [16]. A água de mistura foi deionizada previamente. O superplastificante utilizado foi um aditivo comercial ADVA CAST 527 (Grace Construction Products), descrito pelo fabricante como “solução aquosa alcalina de polímeros utilizada como redutor de água de altíssima eficiência”. Sua base é policarboxilato éter, que age através de estabilização eletroestérica e apresenta teor de sólidos de 40% e massa específica de 1,075g.cm⁻³ [17].

A granulometria dos cimentos e *fillers* utilizados foi obtida por difração a laser (Helos – Sympatec). Em cada amostra, 0,20g de cada material foram misturados com 50mL de água deionizada em 1000RPM (IKA RW 20) por 1 minuto. Em seguida, a solução foi adicionada ao equipamento, submetida a dispersão por ultrassom por 1 minuto e analisada em água. As curvas são apresentadas na Figura 1. Pode-se observar que todos cimentos apresentam perfis granulométricos próximos, sendo o CPII-F o que apresenta maior finura. O *filler* FS apresenta granulometria levemente mais fina do que o CPV, enquanto FP é o material mais fino analisado, apresentando função de preenchimento.

A massa específica (ME) e área superficial específica (ASS_{BET}) dos materiais foram obtidas por picnometria de gás Hélio (Multipycnometer, Quantachrome MVP 5DC) e por adsorção de Nitrogênio (Método BET, Belsorpmax – Bel Japan), respectivamente. A área superficial volumétrica (ASV) corresponde ao produto de ASS_{BET} e ME. O fator de forma (FF) foi obtido através da relação entre os resultados de SSA_{BET} e área superficial específica estimada obtida por difração a laser (ASS_{DL}), que considera as partículas como esferas perfeitamente lisas [18]. Assim, quanto mais afastado de 1 for este fator, mais irregular e rugosa é a partícula. Os dados são apresentados Tabela 1. Embora as curvas granulométricas dos cimentos sejam semelhantes, há variações significativas na área superficial específica,

principalmente nos cimentos CPII-Z, com exceção do CPII-Z (I), e CPIV. A variação se torna mais clara ao analisarmos o fator de forma, indicando que as partículas destes materiais são mais irregulares e rugosas do que os demais.

2.2 Composições

As misturas feitas contemplam dois tipos de compósitos: pastas de cimento e argamassas. As primeiras foram produzidas para o estudo de consumo de aditivos superplastificantes. As argamassas foram produzidas para avaliação do espalhamento e da capacidade de redução de água.

2.2.1 Pastas

Para estimar o consumo ótimo de superplastificante, foram preparadas pastas misturadas com 100g de pó. A relação água/finos (*a/f*) adotada foi de 0,35. O teor de aditivo superplastificante foi ajustado para cada amostra. A água adicionada na mistura foi corrigida de forma a considerar a água presente no aditivo e manter a relação *a/f* constante.

2.2.2 Argamassas

No estudo de consistência, foram produzidas argamassas de composição 1:3 (finos:areia) em massa, conforme a dosagem indicada na NBR 7215 [19] e a Tabela 2, com relação *a/f* ajustada para cada amostra em função do espalhamento desejado para o estudo de consistência, conforme discutido no 2.4.2. Todas as argamassas apresentaram entre 76,3 e 78,1% de areia no volume de sólidos. No caso das argamassas com *filler*, os finos utilizados são uma combinação entre CPV, FS e FP, abrangendo uma composição com teor médio (CP MF) e uma com teor alto (CP HF) da adição mineral, conforme é indicada nas proporções da Tabela 3. Os teores de aditivo superplastificante utilizados foram os teores ótimos obtidos no estudo de consumo de aditivo em função da massa de cimento e *filler*. Nas composições com *filler*, o aditivo foi ajustado proporcionalmente ao teor de cada tipo de material fino.

Tabela 1

Propriedades físicas dos cimentos utilizados

Material	Classe de resistência (MPa)	ME (g/cm ³)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	ASS_{BET} (m ² /g)	ASS_{DL} (m ² /g)	ASV (m ² /cm ³)	FF
CPII E	40	3,04	1,94	13,38	38,05	1,13	0,41	3,43	2,76
CPII F	40	3,01	2,35	12,66	31,78	1,18	0,38	3,56	3,12
CPII Z (I)	32	3,10	1,98	12,76	40,72	1,3	0,41	4,03	3,17
CPII Z (II)	32	2,96	2,83	18,91	52,06	1,19	0,31	3,52	3,84
CPII Z (III)	32	2,98	1,84	12,52	37,15	2,41	0,44	7,18	5,48
CPIII	40	2,97	2,23	14,71	38,76	0,99	0,37	2,94	2,67
CPIV (I)	32	3,03	2,44	19,41	56,49	1,26	0,33	3,82	3,82
CPIV (II)	32	3,15	2,16	13,92	42,79	1,45	0,36	4,57	4,03
CPIV (III)	32	3,11	1,89	12,46	39,35	4,3	0,39	13,37	11,03
CPV	40	3,08	2,72	17,14	46,26	1,64	0,30	5,05	5,45
FS	–	2,74	1,46	8,83	23,09	1,16	0,50	3,18	2,32
FP	–	2,76	0,73	2,49	7,17	3,73	1,13	10,29	3,30

Tabela 2

Composição das argamassas utilizadas no estudo de consistência e redução de água, em massa e volume

Identificação	Partes (em massa)		Composição (em volume)		
	Finos	Areia	Finos (%)	Areia (%)	finos/areia
CPII E			22,6	77,4	0,29
CPII F			22,7	77,3	0,29
CPII Z (I)			22,2	77,8	0,29
CPII Z (II)			23,0	77,0	0,30
CPII Z (III)			22,9	77,1	0,30
CPIII	1	3	23,0	77,0	0,30
CPIV (I)			22,6	77,4	0,29
CPIV (II)			21,9	78,1	0,28
CPIV (III)			22,2	77,8	0,28
CPV			22,3	77,7	0,29
CP MF			23,1	76,9	0,30
CP HF			23,7	76,3	0,31

Tabela 3

Proporções dos finos compostos por CPV e filler calcário e utilizados nas argamassas CP MF e CP HF

Composição de finos	Composição (em massa)			Composição (em volume)		
	CPV	FS	FP	CPV	FS	FP
CP MF	0,61	0,11	0,28	0,58	0,12	0,30
CP HF	0,32	0,39	0,29	0,29	0,41	0,30

2.3 Procedimentos de mistura

2.3.1 Pastas

A mistura das pastas ocorreu em três etapas: (i) adição da água nos finos em cinco segundos; (ii) mistura manual com colher por 50 segundos; e (iii) dispersão em misturador de alta energia em rotação de 10000rpm (Makita adaptada) por 1,5 minutos. Quando utilizado superplastificante, este foi adicionado junto com a água.

2.3.2 Argamassas

As argamassas foram misturadas conforme os tempos e procedimentos indicados na NBR 7215 [19] e o modelo da Figura 2. A água é adicionada na cuba antes da mistura. O primeiro patamar corresponde ao período de adição do cimento e da areia homogeneizada, respectivamente. O segundo e quarto patamares

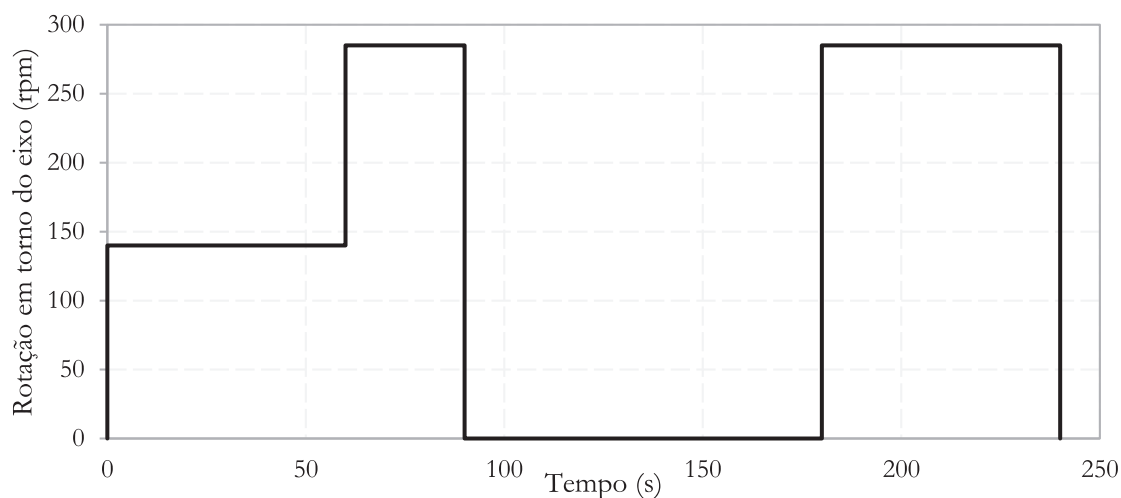
correspondem à mistura em alta velocidade, enquanto o terceiro patamar é referente ao descanso da argamassa, coberta com um tecido úmido. O aditivo, quando utilizado, foi adicionado à água e homogeneizado antes do início da mistura.

2.4 Métodos

O estudo ocorreu em três etapas diferentes para determinação de: (i) consumo ótimo de aditivo para cada matéria prima; (ii) perfil de consistência em função da relação água/finos e avaliação do potencial de redução de água; e (iii) capacidade estimada de redução de cimento, avaliação da eficiência dos ligantes e impacto de CO₂.

2.4.1 Consumo de aditivo

Alguns estudos utilizam ensaios padrões para determinação de consumo de aditivos dispersantes, como o Slump e o cone Marsh

**Figura 2**

Modelo de mistura das argamassas, conforme NBR 7215, para estudo de consistência e redução de água

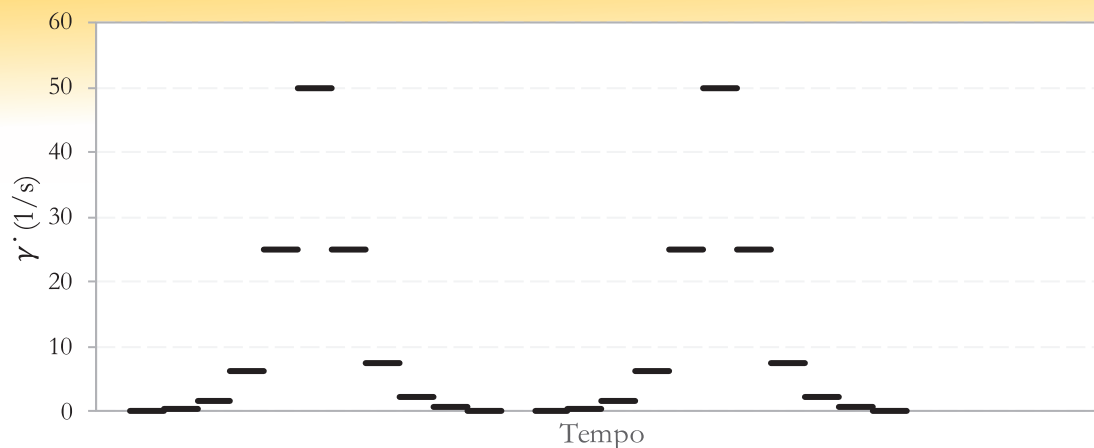


Figura 3

Modelo das etapas do *stepped flow test* para determinação do comportamento reológico de cada variação de pasta. O tempo de permanência em cada patamar foi de 10 segundos

[20–23]. Porém, estes tipos de ensaio avaliam o comportamento apenas para uma condição de cisalhamento, mantendo desconhecido o comportamento da mistura sob diferentes solicitações [24]. Assim, para determinação do teor ótimo de aditivo, é necessário avaliação que contemple diferentes taxas de cisalhamento. Para análise de consumo de aditivo superplastificante, as pastas foram submetidas, imediatamente após o término da mistura, ao ensaio de reometria rotacional (reômetro MARS 60, Haake). O método utilizado foi o *stepped flow test*, placa-placa, em dois ciclos de aceleração e desaceleração, variando a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de 0 a 50s^{-1} , mantendo-se por 10 segundos em cada patamar, conforme modelo apresentado na Figura 3.

O primeiro ciclo foi executado apenas para condicionamento padrão da mistura da pasta, enquanto o segundo ciclo foi feito para coleta dos dados. Nesta etapa, para cada teor de aditivo foram analisadas: (i) tensão de escoamento (τ_0), onde τ corresponde à tensão de cisalhamento em taxa de cisalhamento fixa que tende a zero no perfil de desaceleração; e (ii) viscosidade aparente (η), obtida em taxa de cisalhamento igual a

50s^{-1} [10]. Os ajustes de aditivo ocorreram arbitrariamente após cada ensaio em uma nova amostra até ser encontrado o ponto de saturação, em curva de defloculação, onde os dois parâmetros supracitados pouco variam com o acréscimo de aditivo, caracterizado neste estudo como a estabilização em três pontos consecutivos na curva. O teor ótimo foi definido como sendo o ponto imediatamente posterior à estabilização da tensão de escoamento e da viscosidade [25].

Através da análise do ponto de saturação, foi avaliado o consumo específico de superplastificante, correspondente à relação entre consumo de aditivo e área específica superficial (BET). Este parâmetro permite analisar o consumo específico para o material já considerando parâmetros de superfície.

2.4.2 Consistência da argamassa e redução de água para manter mesmo comportamento

O estudo de consistência das argamassas ocorreu utilizando os cimentos comerciais e as composições com *filler*, com e sem aditivo.

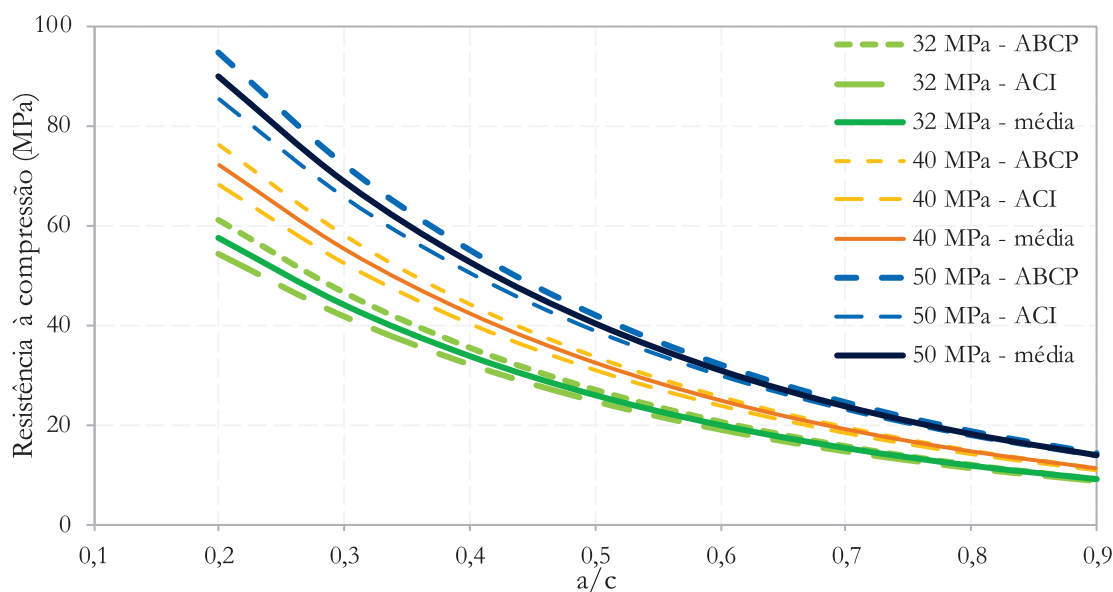


Figura 4

Modelos de curvas de Abrams obtidas pelo método ABCP e ACI e a curva médias para cada classe de cimento

Logo após a mistura, as argamassas foram ensaiadas em mesa de consistência, conforme NBR 13276 [26], registrando os respectivos espalhamentos depois de trinta quedas de mesa em 30 segundos. Foi produzida uma argamassa para cada relação a/f . Os resultados foram registrados em três diâmetros de abertura, que compuseram uma média. Para os casos onde houve segregação, o registro foi feito desprezando a água exsudada nas periferias.

Os ensaios para cada composição foram iniciados a partir da relação a/f igual a 0,48, valor utilizado pela norma brasileira de classificação de resistência de cimentos [19]. Para cada argamassa produzida posteriormente, a relação a/f foi dosada com o objetivo de atingir abertura média arbitrária de (265 ± 10) mm, onde as argamassas apresentavam início de segregação. Para todas as composições foram obtidos perfis com três ou mais pontos, com exceção das amostras de CPIII, com e sem aditivo, CP IV (II) sem aditivo e CPII-F com aditivo, que atingiram a abertura desejada na primeira tentativa.

A redução de água foi definida como uma relação dos índices a/f das argamassas com mesmo espalhamento, sem e com aditivo, conforme equação (1).

$$\text{Redução de água} = 1 - \left(\frac{\left(\frac{a}{f} \right)_{\text{com aditivo}}}{\left(\frac{a}{f} \right)_{\text{sem aditivo}}} \right) \quad (1)$$

Onde (a/f) , representa a relação água/finos da composição, em massa, e o índice i indica se a composição apresenta aditivo superplastificante ou não.

2.4.3 Redução de cimento, eficiência de ligante, emissão de CO_2

Foram utilizados índices simplificados para avaliar o desempenho dos cimentos: (i) redução do consumo de cimento no concreto; (ii) intensidade de ligantes (IL), que relaciona o consumo total de ligantes no concreto pela sua resistência à compressão, conforme equação (2); e (iii) intensidade de CO_2 (IC), indicando o impacto ambiental através da relação entre massa de CO_2 emitido pela resistência à compressão do concreto, conforme equação (3) [5].

$$IL = \frac{C_c}{f_c} \quad (2)$$

$$IC = \frac{E_{\text{CO}_2}}{f_c} \quad (3)$$

Onde: C_c é o consumo de cimento para um metro cúbico de concreto, em Kg.m^{-3} ; f_c é a resistência à compressão do concreto, em MPa; e E_{CO_2} é o total de emissões de CO_2 geradas pela produção e transporte dos materiais, em Kg.m^{-3} .

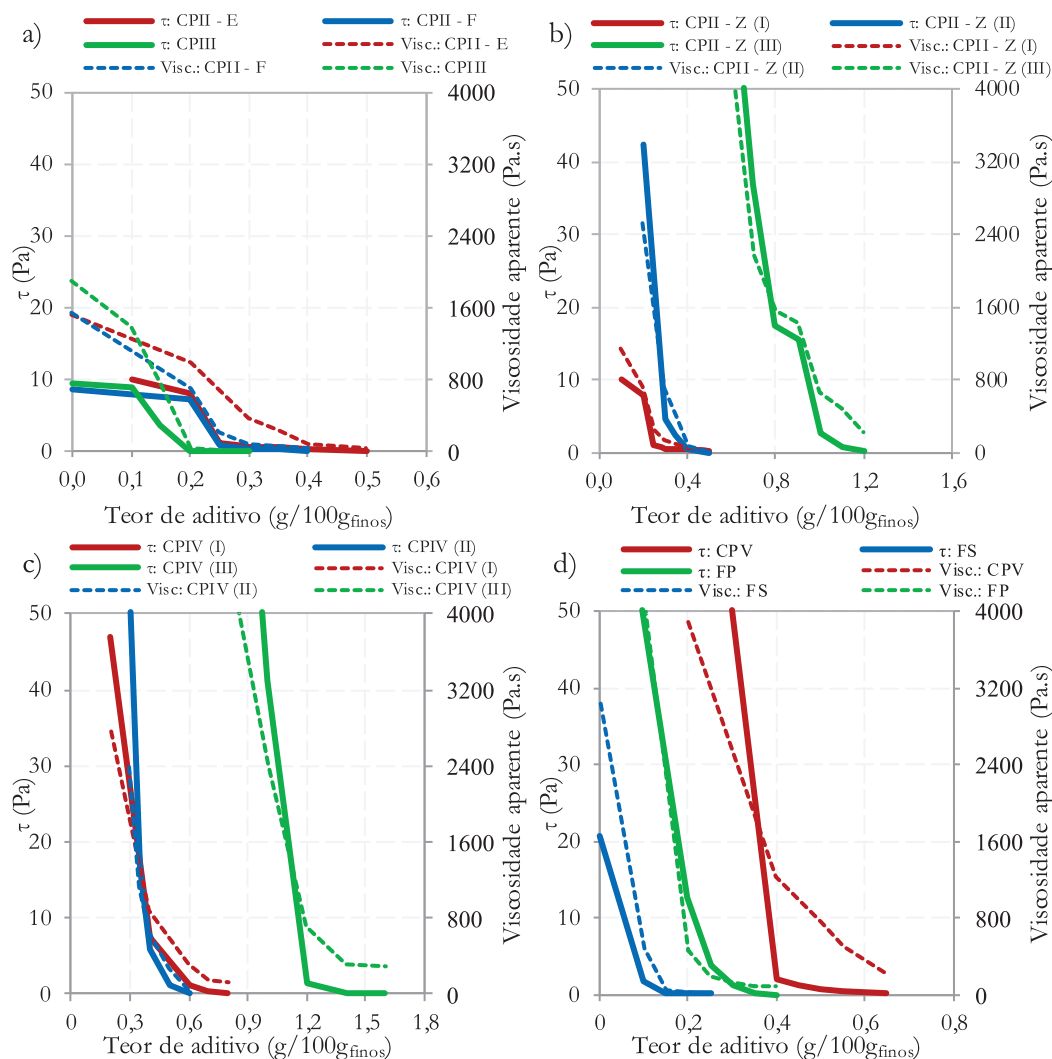


Figura 5

Curvas de defloculação, analisadas em função da tensão de escoamento e da viscosidade aparente, para: (a) cimentos com escória e CPII-F; (b) CPII-Z; (c) CPIV; e (d) CPV, FS e FP

Tabela 4

Teor ótimo e consumo específico de superplastificante por tipo de material

Classe de adição	Material	Teor ótimo (g _{aditivo} /100g _{finos})	Consumo específico volumétrico (g _{aditivo} /cm ³ _{finos})	Consumo específico superficial (mg _{aditivo} /m ² _{finos})
Escória	CPII-E	0,45	0,014	4,0
	CPIII	0,25	0,007	2,5
Pozolana	CPII-Z (I)	0,30	0,009	2,3
	CPII-Z (II)	0,40	0,012	3,4
	CPII-Z (III)	1,10	0,033	4,6
	CPIV (I)	0,70	0,021	5,6
	CPIV (II)	0,50	0,016	3,4
	CPIV (III)	1,40	0,044	3,3
Filler	CPII-F	0,35	0,011	3,0
-	CPV	0,55	0,017	3,4
	FP	0,35	0,010	0,9
	FS	0,20	0,006	1,7

Para todas estas análises, foram inferidas correlações com concretos teóricos compostos com as mesmas argamassas do estudo de consistência e de resistência à compressão estimada fixa de 30MPa, com slump entre 75 e 100mm e diâmetro máximo de agregado igual a 20mm [27], baseados em estudos da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) [28] e *American Concrete Institute* (ACI) [27]. Para simplificação de análise, não foi considerada a correção do teor de aditivo de argamassa para concreto.

A determinação da relação água/cimento (a/c), que corresponde, neste caso, à relação a/f, ocorreu através da correlação com curva de Abrams teórica, obtida pela média das curvas de Abrams da ABCP [28] e de ajustes da curva de Abrams da ACI [27], considerando a classe de cada cimento, conforme modelo apresentado na Figura 4.

O consumo de cimento do compósito sem aditivo foi determinado através da fixação do consumo de água em 200kg.m⁻³ [27]. Como demonstrado no estudo de Assaad [29], foi considerado que há correlação entre a abertura em mesa de consistência de argamassas e o slump de concretos feitos com a mesma argamassa, possibilitando o reajuste de cimento e água através do espalhamento em mesa de consistência.

Nas considerações de concretos com teor ótimo de aditivo, foi utilizada mesma relação a/f da dosagem dos concretos sem aditivo. O volume de água foi reajustado através da capacidade de redução de água obtida no estudo de consistência e, assim, corrigido o consumo de cimento. Foi considerado que mesmo com a redução do volume de pasta, este ainda foi suficiente para preencher todos os vazios entre os grãos e que essa redução foi compensada pela adição de mesmo volume em areia, mantendo o teor de argamassa. As influências causadas pela redução no teor de pasta foram desconsideradas para simplificação de análises.

Para calcular os fatores de emissão de CO₂, foram feitas simplificações. De 88,6 a 92,2% dos impactos ambientais relacionados com a produção de concreto são referentes a produção de cimento [30]. Fatores de emissão de CO₂ para cimento foram obtidos através do estudo de Oliver [31], onde foram desprezados os impactos de moagem, transporte e secagem das adições. Também se adotou que os impactos referentes aos materiais cimentícios suplementares (MCS) são alocados para seus geradores. A partir deste cenário, dos dados de emissão médio nacional [32] e dos teores de clínquer normatizados [31], estimou-se a emissão para diferentes cimentos através do fator de emissão de

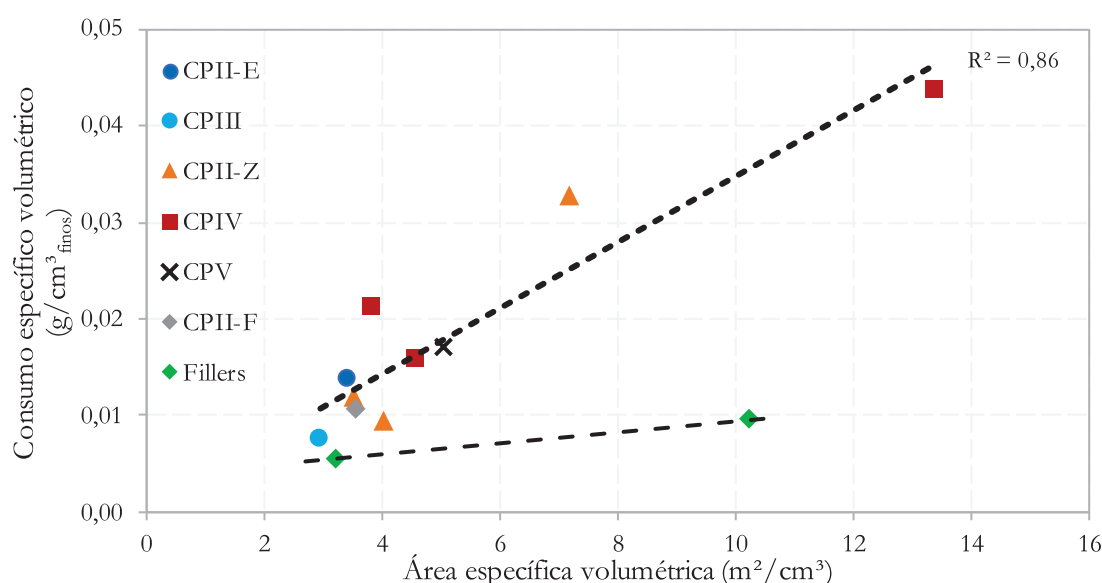


Figura 6

Teor ótimo de aditivo dos materiais em função das respectivas áreas específicas superficiais

$821\text{kg}_{\text{CO}_2}\cdot\text{ton}^{-1}_{\text{cliqueur}}$. Para os impactos ambientais causados pelo processo de produção de aditivo, foi considerado fator de emissão máximo obtido pelas fichas técnicas dos aditivos cotados, equi-

valente a $1,86\text{Kg}_{\text{CO}_2}\cdot\text{Kg}^{-1}\text{aditivo}$. Portanto, E_{CO_2} adotado é a soma dos produtos do consumo e fator de emissão do cimento e aditivo contido nos concretos.

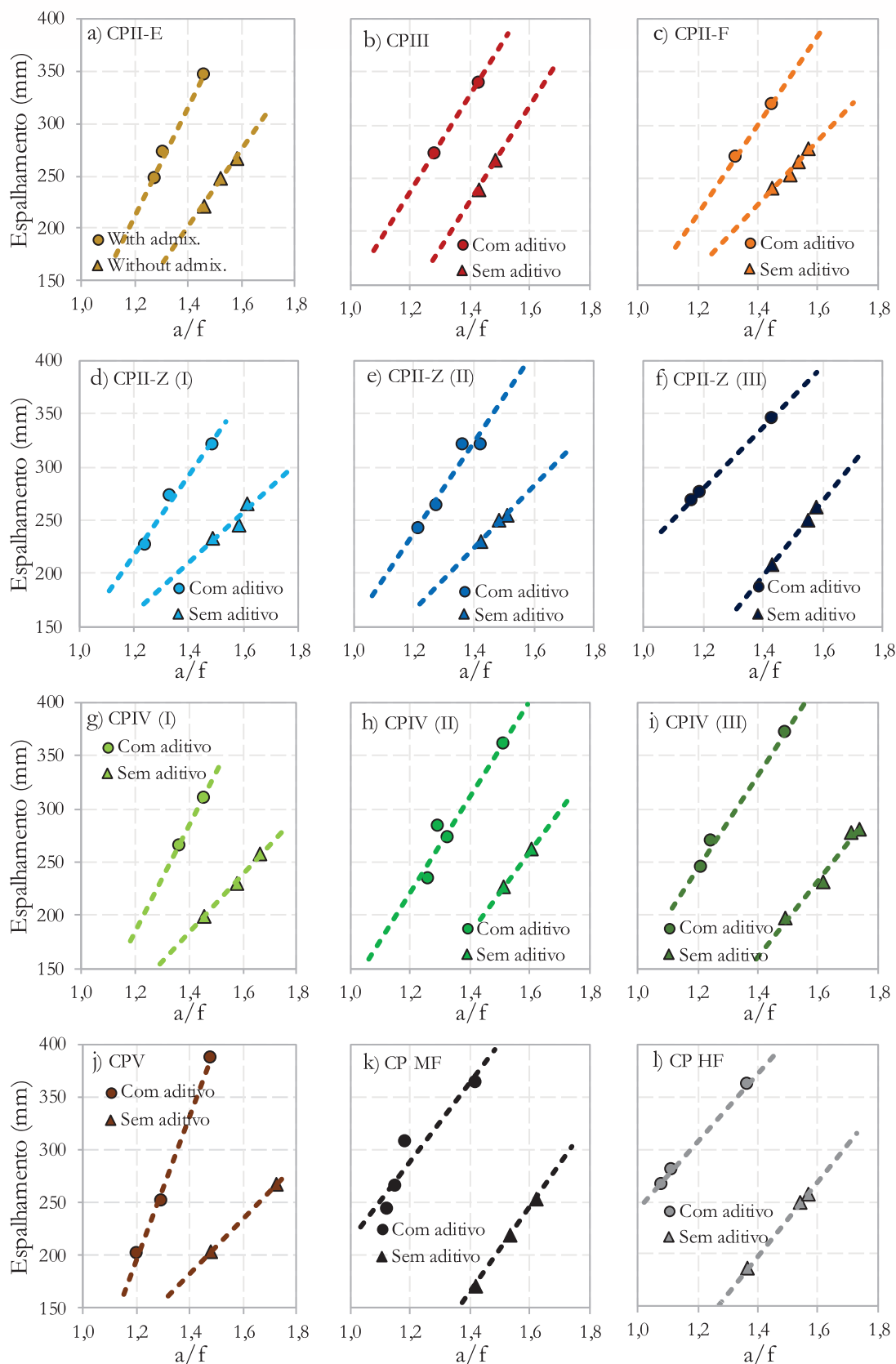


Figure 7

Correlação entre espalhamento das argamassas com e sem aditivo e a relação a/f (em volume), onde correspondem a: (a) e (b) cimentos com escória; (c) CII-F; (d), (e), (f), (g), (h) e (i) cimentos pozolânicos; (j) CPV; e (k) e (l) fillers

3. Resultados e discussões

3.1 Consumo de aditivo

Os perfis das curvas de defloculação, usados para determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante são indicados na Figura 5. A Figura 5-a apresenta as curvas de defloculação dos cimentos CPII-E, CPII-F e CPIII. Nota-se que o CPIII obteve o menor consumo de aditivo dentre os três, com teor ótimo de aditivo de $0,25\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}_{\text{finos}}$, seguido do CPII-F, com $0,35\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}_{\text{finos}}$, e do CPII-E, com $0,45\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}_{\text{finos}}$. As curvas dos cimentos CPII-Z são apresentadas na Figura 5-b. Percebe-se que há maior variação do consumo de aditivo entre eles, sendo o maior deles responsável pelo CPII-Z (III), seguido pelo CPII-Z (II) e pelo CPII-Z (I), com consumos de 0,3, 0,4 e

$1,1\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}_{\text{finos}}$, respectivamente. Para os cimentos CPIV, os resultados são apresentados na Figura 5-c. O CPIV (I) consome mais superplastificante, enquanto o CPIV (II) e o CPIV (III) apresentam consumos significativamente menores. Os teores ótimos obtidos correspondem a 1,4, 0,7 e $0,5\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}_{\text{finos}}$, respectivamente. Os teores ótimos de aditivo do CPV, FS e FP correspondem, respectivamente, a 0,55, 0,2 e $0,35\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}_{\text{finos}}$ e são indicados na Figura 5-d. Todos os dados foram compilados e adicionados aos dados de consumo específico de aditivo na Tabela 4. Observa-se que o CPIV (III) foi o material com maior consumo de aditivo, porém com consumo específico semelhante à maioria. Assim, o consumo foi influenciado pela alta área específica e elevado fator de forma. O CPIV (I), embora consuma metade do aditivo em relação ao CPIV (III), apresenta o maior consumo específico dentre os materiais, demonstrando que o material deste cimento demanda mais aditivo.

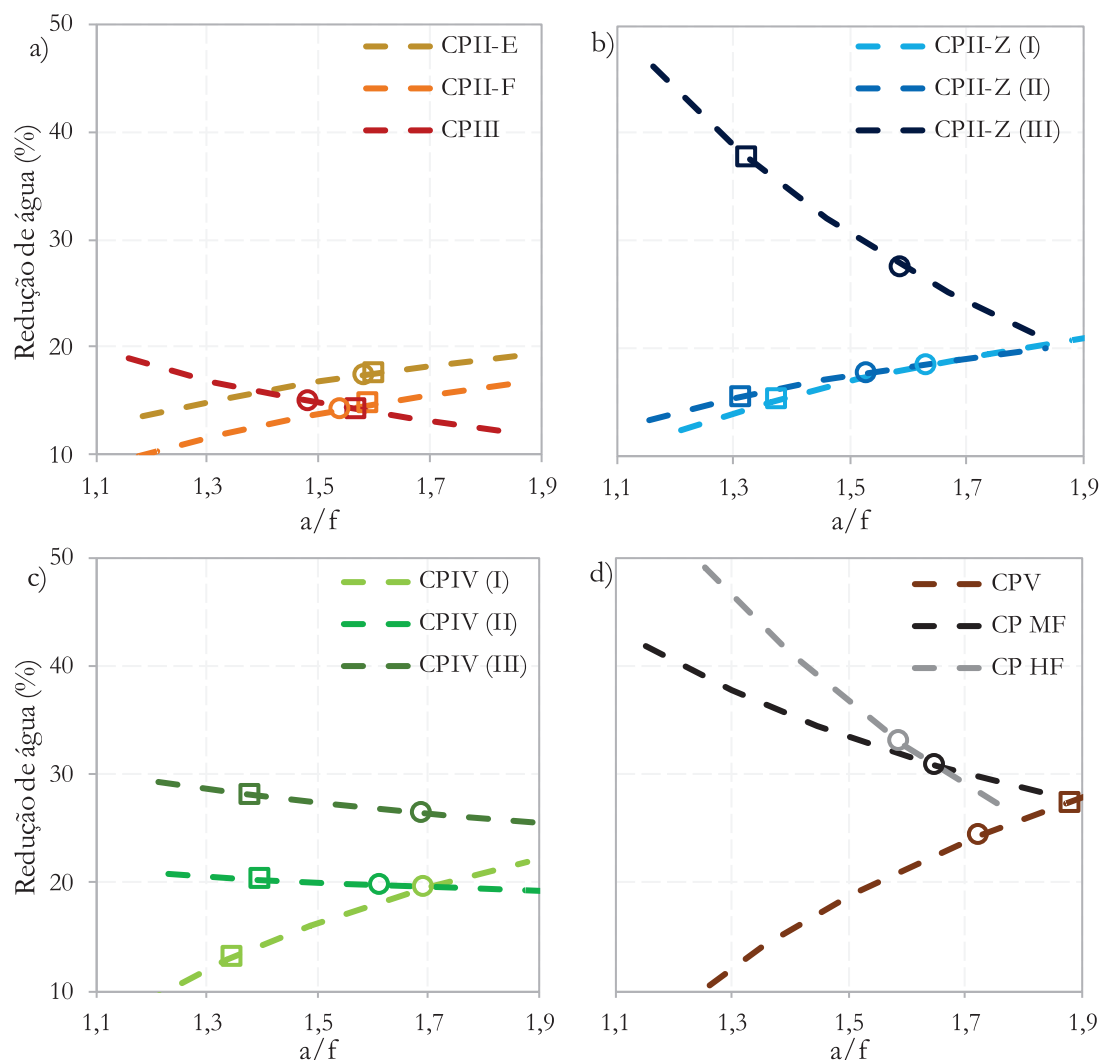


Figura 8

Redução de água em cada composição com teor ótimo de superplastificante em função da relação a/f (em volume) da argamassa sem aditivo para um mesmo espalhamento. Círculos representam a redução para argamassas com espalhamento em mesa de consistência de 265 mm e quadrados redução para concretos com 30 MPa, utilizando curva de Abrams

A variedade de tipos de pozolana, devido a sua distribuição geográfica [33], é um dos fatores que podem influenciar fortemente nes-

te resultado, juntamente com o teor de substituição de clínquer e variações de produção dos materiais. Fenômeno similar pode ser

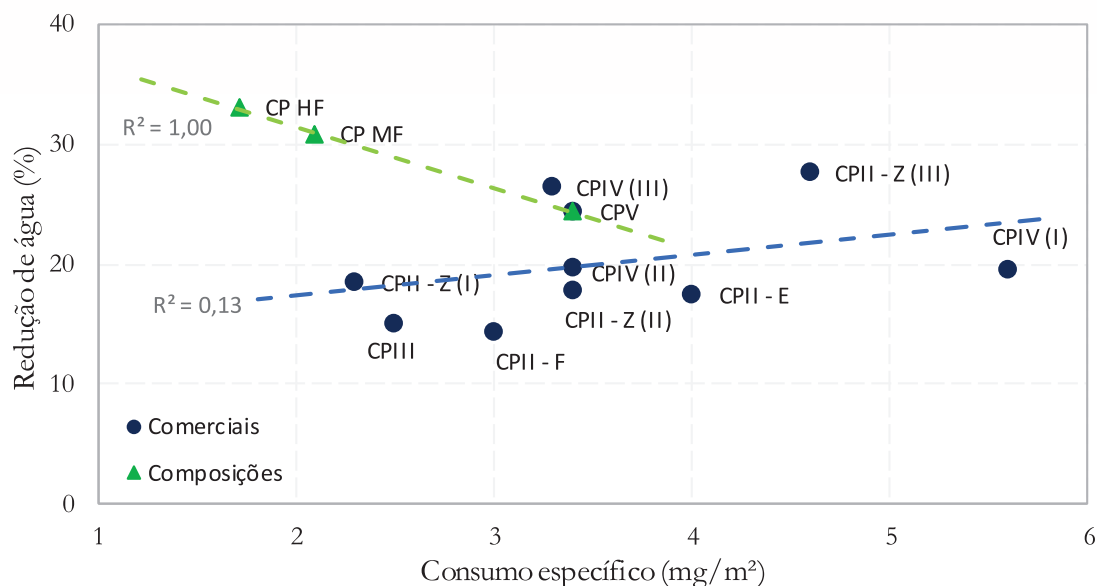


Figura 9

Redução de água em argamassas com espalhamento, em mesa de consistência, de 265 mm em função do consumo específico de aditivo superplastificante

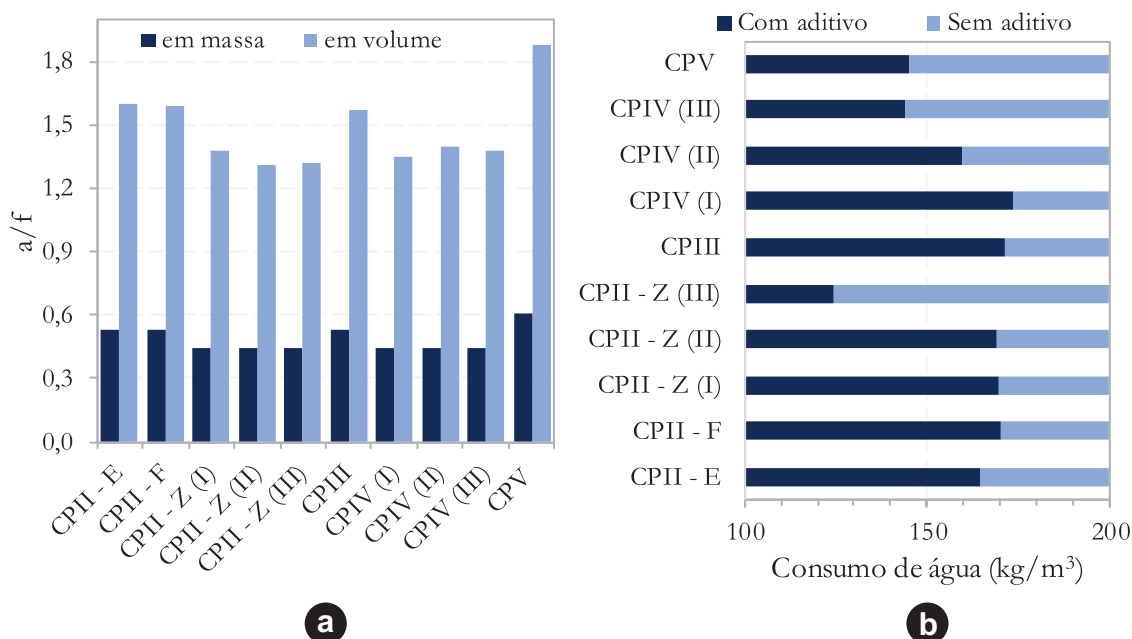


Figura 10

(a) Relação água/finos, em massa e em volume, de cada concreto teórico, sem aditivo, para resistência à compressão estimada de 30 MPa; e (b) consumo de água para os concretos de 30 MPa sem aditivo, 200 kg.m⁻³, e com aditivo

Tabela 5

Consumo de aditivo superplastificante para as composições de finos com filler calcário, obtidas por ponderação das matérias-primas

Composição de finos	Teor ótimo de aditivo (g _{aditivo} /100g _{finos})	Consumo específico volumétrico (g _{aditivo} /cm ³ _{finos})	Consumo específico superficial (mg _{aditivo} /m ² _{finos})
CP MF	0,455	0,013	2,09
CP HF	0,354	0,010	1,72

observado nos cimentos CPII-Z, que possuem variação de 100% entre o CPII-Z (III) e CPII-Z (I).

Em comparação entre todos os cimentos, há uma faixa muito aberta de consumo, entre 7 a $44\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}_{\text{finos}}$, uma variação de até 6,3 vezes. O uso de aditivos dispersantes em excesso podem alterar negativamente o comportamento reológico da composição, afetando a tixotropia e a viscosidade da mistura [15], o que indica a necessidade de controle do seu uso.

O *fillers* apresentaram os menores consumos específicos de aditivo entre todos os materiais estudados devido à diferença de cargas superficiais [12,15]. Entretanto, para FP, devido a sua alta área específica, o consumo de aditivo assemelhou-se ao de outros materiais estudados, enquanto o FS, menos fino, apresentou menor consumo entre todos os materiais. A Figura 6 apresenta uma correlação entre a área específica (BET) dos materiais e o consumo de aditivo, onde foi possível obter uma correspondência com R^2 acima de 0,85 para os cimentos. Em análise considerando os *fillers*, este índice diminui para menos de 0,60 devido às diferenças de natureza da superfície entre os materiais [12,15].

3.2 Consistência das argamassas e redução de água

As argamassas com cimento composto por filler em substituição tiveram o teor de aditivo ótimo ajustado através de ponderação, de acordo com os teores de cada material, e conforme estudo de consumo de aditivo superplastificante. Assim, para as argamassas CP MF e CP HF, foram utilizados teores de 0,46 e $0,35\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}_{\text{finos}}$, respectivamente, conforme Tabela 5. Para as demais composições, foram utilizados os teores de aditivo determinados no estudo de consumo de superplastificante.

A comparação entre os perfis de espalhamento das argamassas sem e com aditivo são apresentadas na Figura 7. Nota-se que a maioria das composições não apresentaram paralelismo entre os

perfis, indicando que a capacidade de redução de água varia em função do teor de água.

A capacidade de redução de água em cada composição, mantendo o espalhamento correspondente à respectiva argamassa sem aditivo, é apresentada na Figura 8. Os cimentos CPIV (II) e CPIV (III), representados na Figura 8-c, pouco variaram em função da relação a/f das argamassas, enquanto, para as demais, as reduções variaram significativamente. As composições CPII-Z (III), CP MF e CP HF, embora com maiores variações, apresentaram as maiores reduções de água.

Ao fixar o espalhamento das argamassas em 265mm (condição reológica determinada como limite para efeitos significativos de segregação visualmente perceptível) foi possível verificar se há relação entre o consumo específico de aditivo superplastificante e a respectiva capacidade de redução de água em argamassas. Conforme indicado na Figura 9, foi possível observar que o aumento do teor de *filler* calcário nas composições produzidas aumentam a capacidade de redução do teor de água (desde que bem dispersos pelo aditivo), enquanto o consumo de aditivo também diminui devido à diluição do clínquer pelo *filler* e consequente redução das cargas superficiais das partículas na suspensão. Entretanto, não há correlação clara entre estes parâmetros para os cimentos comerciais, possivelmente devido às diferenças de natureza dos materiais de sua composição. Analisando os consumos específicos volumétricos, é possível observar que o uso de *filler* calcário como substituinte ao cimento permitiu reduzir o consumo de aditivo por volume de finos utilizados, indicando possível redução de custos para estes tipos de composição.

3.3 Redução do consumo de cimento no concreto e índices de impacto ambiental

Foi determinada a relação a/f correspondente a 30MPa na

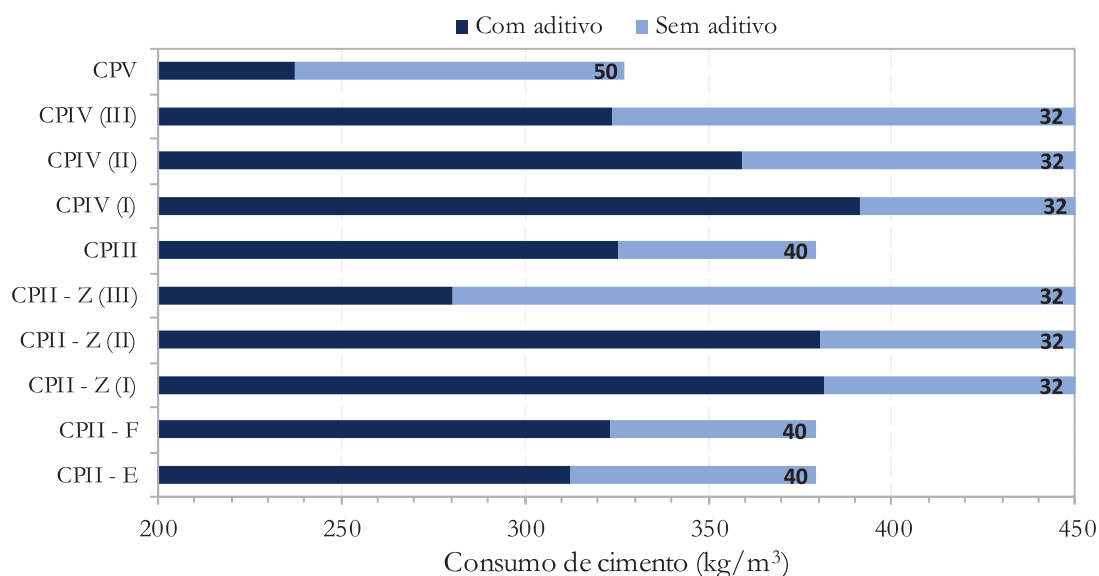
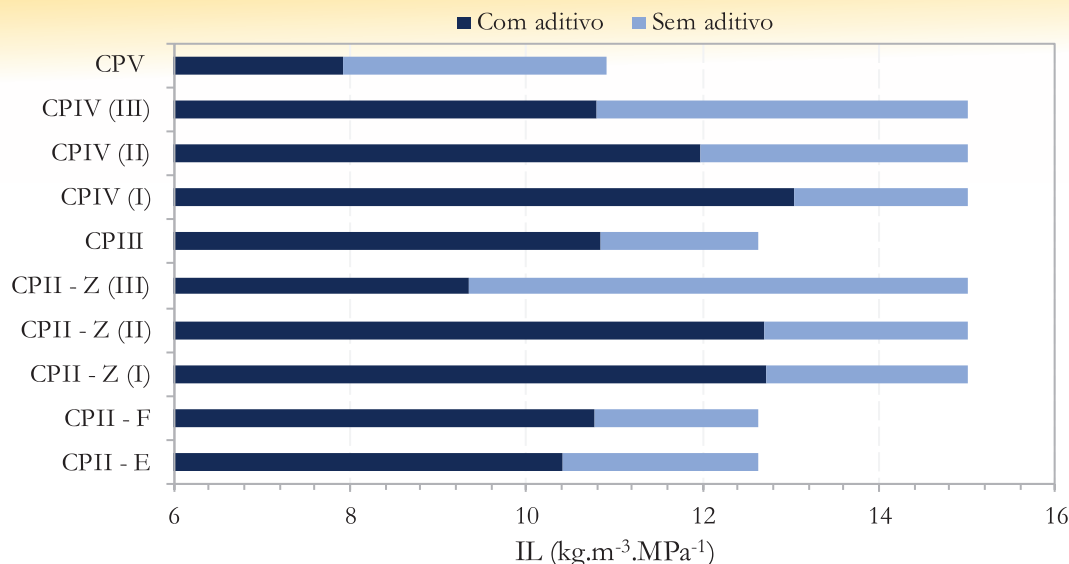


Figura 11

Consumos de cimento para concretos de mesma resistência e redução correspondente para cada de cimento. Os números em cada barra indicam a classe de resistência dos cimentos, em MPa

**Figura 12**

Índice de ligantes e sua redução para os concretos teóricos com diferentes tipos de cimento e resistência à compressão teórica de 30MPa

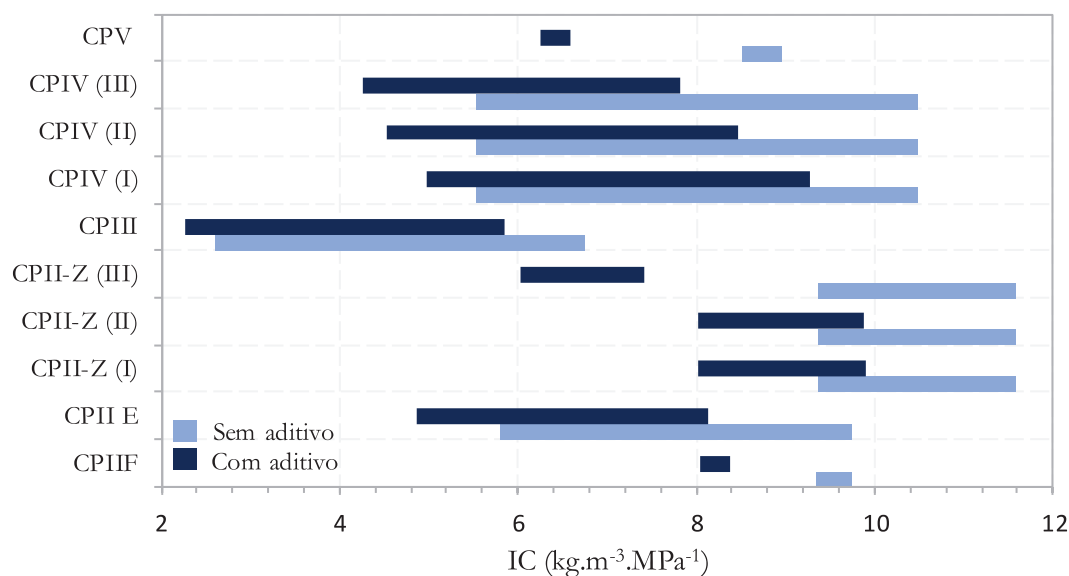
curva de Abrams média. A quantidade de água inicial, equivalente a 200kg.m^{-3} , foi reduzida utilizando as correlações do estudo de redução de água, indicadas nos marcadores da Figura 8. Desta forma, foram estimados os consumos de água para os concretos teóricos, conforme Figura 10, que variaram entre $124,5$ e $173,7\text{kg.m}^{-3}$.

A partir do novo consumo de água, o consumo de cimento pôde ser reajustado, conforme apresentado na Figura 11, considerando a premissa de que há volume mínimo de pasta para preencher os vazios intergranulares. A aplicação do superplastificante na mistura pôde proporcionar aos concretos teóricos analisados redução de consumo de cimento entre $13,1$ e $37,7\%$. Sem aplicação do aditivo, o menor consumo de cimento corresponde a 327kg.m^{-3} , enquanto com a sua utilização foi possível produzir formulações com $240\text{kg}_{\text{cimento}}.\text{m}^{-3}$ utilizando CPV. Deve-se destacar o CPII-Z (III)

que com uso de superplastificante apresentou menor consumo de cimento para 30MPa do que os cimentos de classe 40MPa.

A Figura 12 apresenta os resultados dos cálculos de IL para os concretos teóricos de diferentes cimentos. O uso em teor ótimo de aditivo superplastificante proporcionou redução deste índice, indicando aumento da eficiência do ligante. Quando não houve a sua utilização, o IL variou entre $12,6$ e $15\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$, enquanto com o uso de aditivo o índice variou entre $9,2$ e $13\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$, limites correspondentes aos cimentos CPII-Z (III) e CPIV (I), respectivamente. Estes valores são comumente encontrados na literatura [5]. A redução percentual é equivalente à redução do consumo de cimento.

O impacto do uso do superplastificante foi positivo também quando analisada a intensidade de CO_2 , que foi reduzida para todos concretos, conforme indicado na Figura 13. Para os concretos sem aditivo, os índices variaram entre $2,6$ e $11,6\text{kg}_{\text{CO}_2}.\text{m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$, respectivamente,

**Figura 13**

Intensidade de CO_2 para os concretos teóricos, com resistência à compressão estimada de 30 MPa, em função do tipo de cimento

enquanto, quando utilizado o aditivo, os mesmos índices variaram de 2,3 a $10\text{kg}_{\text{CO}_2} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$, valores comumente encontrados em literatura [5], e proporcionaram redução entre 10,1 e 36,1%. Embora a maior redução ocorreu para a composição com CP11-Z (III), devido à maior redução de cimento, os menores índices estão associados ao CP11, pois apresenta alto percentual de material cimentício suplementar em sua composição.

4. Conclusões

Através do estudo para determinação do teor ótimo de superplastificante, base policarboxilato éter, foi possível observar variação significativa no consumo de aditivo pelos cimentos, atingindo valores entre 7 e $44\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}_{\text{finos}}$, enquanto os consumos específicos variam entre 2,3 até $5,6\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$. Assim, a realização de estudo prévio da demanda de aditivo superplastificante para cada cimento pode possibilitar a redução de custos no concreto. Os *fillers* foram, dentre todos os materiais analisados, os que apresentaram menor consumo específico, indicando serem materiais suplementares com potencial para redução de consumo de aditivos. Também foi observada correlação da demanda de superplastificante com a área específica para os cimentos, porém os *fillers* não obtiveram adesão à regressão, demonstrando que o consumo de aditivo não é função apenas da área específica, mas depende também das cargas superficiais das partículas em suspensão.

Através do estudo de consistência, foi observado que a capacidade de redução de água nas argamassas com teor ótimo de superplastificante varia em função da relação *a/f* utilizada. Os cimentos CPV e CP11-Z (III) e as composições com *filler* utilizados nas argamassas apresentaram maior potencial de redução de água. Ainda, o aumento do teor de *filler* nas composições com CPV apresentou capacidade de redução do consumo de aditivo devido à diluição da concentração de cimento.

Através de inferência, foi possível estimar redução potencial do consumo de cimento em até 37,7% em concretos, variando com a redução de água. Com uso de CPV, pode-se compor concretos, com resistência à compressão estimada de 30MPa, com $240\text{kg}_{\text{cimento}} \cdot \text{m}^{-3}$, desde que o volume de pasta seja mínimo para ocupar os vazios entre os agregados. O CP11-Z (III), classe 32MPa, apresentou maior capacidade de redução de cimento. Essas reduções permitiram minimizar a intensidade de ligantes e de carbono em até 37,7 e 36,1%, respectivamente, demonstrando que a utilização de aditivos superplastificantes em teor otimizado apresenta potencial para melhorar a eficiência dos cimentos e reduzir os impactos ambientais.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de mestrado financiadas, ao laboratório de microestrutura (LME/PCC) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela disponibilização de laboratórios e equipamentos, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Brasil (Processo 485340/2013-5) e aos doutores Roberto C. O. Romano e Rafael G. Pileggi pelos auxílios e discussões durante a produção deste trabalho.

6. Bibliografia

- [1] J.F. Kasting, D. Catling, Evolution of a Habitable Planet, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 41 (2003) 429–463. doi:10.1146/annurev.astro.41.071601.170049.
- [2] T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley, *Climate change 2013: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 2014.
- [3] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP), *Sustainable building and construction: facts and figures*, Ind. Environ. Sustain. Build. Constr. 26 (2003).
- [4] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, A. Bahadori, Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry, *J. Clean. Prod.* 51 (2013) 142–161. doi:10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- [5] B.L. Daminieli, Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas., text, Universidade de São Paulo, 2013. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19092014-103459/> (accessed March 24, 2016).
- [6] C.B.C. Corrêa, Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento portland tipo CP11-40, Dissertação, Universidade Federal Fluminense, 2010.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland, 2011.
- [8] K.H. Khayat, Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — An overview, *Cem. Concr. Compos.* 20 (1998) 171–188. doi:10.1016/S0958-9465(98)80006-1.
- [9] A.M. Neville, *Propriedades do Concreto*, 5ª edição, Bookman Editora, 2015.
- [10] V.C. Pandolfelli, I.R. Oliveira, A.R. Stuart, R.G. Pileggi, *Dispersão e empacotamento de partículas: Princípios e aplicações em processamento cerâmico*, Fazendo Arte Editorial, São Paulo, 2000.
- [11] M.M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas, Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes, *Cem. Concr. Compos.* 35 (2013) 151–162. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.08.020.
- [12] O. Burgos-Montes, M. Palacios, P. Rivilla, F. Puertas, Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions, *Constr. Build. Mater.* 31 (2012) 300–309. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.092.
- [13] E. Janowska-Renkas, The effect of superplasticizers' chemical structure on their efficiency in cement pastes, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 1204–1210. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.032.
- [14] S.K. Agarwal, I. Masood, S.K. Malhotra, Compatibility of superplasticizers with different cements, *Constr. Build. Mater.* 14 (2000) 253–259. doi:10.1016/S0950-0618(00)00025-8.
- [15] R.C.O. Romano, M.S. Rebmann, H.M. Bernardo, J. Raucchi, C. Massucato, R.J. Pileggi, Impact of particle packing on rheological properties of cementitious pastes dispersed with polycarboxylate, in: *Annu. Trans. Nord. Rheology Soc.*, 2017: p. 8.

- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - especificação, 2015.
- [17] Grace Construction Products, Especificação de produto: ADVA CAST 527, (2016).
- [18] M. Hunger, H.J.H. Brouwers, Flow analysis of water–powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 39–59. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.09.010.
- [19] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, 1996.
- [20] F. de Larrard, T. Sedran, Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model, *Cem. Concr. Res.* 24 (1994) 997–1009. doi:10.1016/0008-8846(94)90022-1.
- [21] M.C. Limbachiya, T. Leelawat, R.K. Dhir, Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete, *Mater. Struct.* 33 (2000) 574. doi:10.1007/BF02480538.
- [22] V. Bonavetti, H. Donza, G. Menéndez, O. Cabrera, E.F. Irassar, Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 865–871. doi:10.1016/S0008-8846(02)01087-6.
- [23] G. Rodríguez de Sensale, Strength development of concrete with rice-husk ash, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 158–160. doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.09.005.
- [24] F.A. Cardoso, Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico., text, Universidade de São Paulo, 2009. doi:10.11606/T.3.2009.tde-21122009-125012.
- [25] P.-C. Nkinamubanzi, P.-C. Aïtcin, Cement and Superplasticizer Combinations: Compatibility and Robustness, *Cem. Concr. Aggreg.* 26 (2004) 1–8. doi:10.1520/CCA12329.
- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, 2005.
- [27] M.L. Wilson, S.H. Kosmatka, Design and Control of Concrete Mixtures, 15 edition, Portland Cement Assn, Skokie, Ill, 2011.
- [28] P.P.F. Rodrigues, Parâmetros de dosagem racional do concreto, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 1983.
- [29] J.J. Assaad, J. Harb, E. Chakar, Relationships Between Key ASTM Test Methods Determined on Concrete and Concrete-Equivalent-Mortar Mixtures, *J. ASTM Int.* 6 (2009) 1–13. doi:10.1520/JAI101735.
- [30] J.A.R. de Lima, Avaliação das conseqüências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas., text, Universidade de São Paulo, 2010. doi:10.11606/T.3.2010.tde-23082010-105858.
- [31] RELATÓRIO ANUAL 2013: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, (n.d.). <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf> (accessed June 4, 2017).
- [32] V.C.H.C. Oliveira, B.L. Damineli, V. Agopyan, V.M. John, Strategies for the minimization of CO₂ emissions from concrete, *Ambiente Construído.* 14 (2014) 167–181. doi:10.1590/S1678-86212014000400012.
- [33] World Business Council for Sustainable Development (IEA-WBCSD), Cement Technology Roadmap 2009, 2009.