



**MYLENA MATOSINHOS CUNHA**

**RAFAEL SARTO E SILVA**

**MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES PARA  
COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO: REVISÃO**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**MYLENA MATOSINHOS CUNHA**

**RAFAEL SARTO E SILVA**

**MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES PARA COMPÓSITOS À BASE  
DE CIMENTO: REVISÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.



Prof. Dr. Keoma De Azevedo do Carmo e Silva

Orientador

**LAVRAS - MG**

**2021**

**MYLENA MATOSINHOS CUNHA**

**RAFAEL SARTO E SILVA**

**MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES PARA COMPÓSITOS À BASE  
DE CIMENTO: REVISÃO**

**SUPPLEMENTARY CEMENT MATERIALS FOR CEMENT-BASED  
COMPOSITES: REVIEW**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 15 de junho de 2021.

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa - UFLA

Prof. Ms. Humberto Dias Andrade - UFOP



Prof. Dr. Keoma Deaveri do Carmo e Silva

Orientador

**LAVRAS - MG**

**2021**

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente à Deus por toda a trajetória e à Universidade Federal de Lavras, por nos proporcionar um ensino de qualidade com professores capacitados. Agradecer a cada um dos servidores e colaboradores da instituição por terem contribuído de alguma forma para nosso crescimento profissional.

Um agradecimento especial aos nossos familiares e amigos por serem a base que nos sustenta em todos os aspectos. Aos nossos pais e mães Zilda de São Geraldo Machado da Cunha, José da Machado Cunha Filho (*in memoriam*), Iolanda do Carmo Sarto Silva e Júlio Carlos da Silva Neto e nossos irmãos Mylla Matosinhos Cunha Lobo, Myller Tadeu Matosinhos Santos e Júlio César Sarto e Silva por nos motivar quando mais precisávamos. Aos amigos da República Lobo Mau por terem sido a família e o lar do nosso querido Rafael em Lavras. As famílias, Andrade, Assunção, Matosinhos, Fernandes e ao parceiro de vida e graduação da estimada Mylena, Luiz Augusto Assunção Lana, por todo apoio e companheirismo nesta jornada. A todos vocês o nosso sincero agradecimento e carinho, vocês foram e são inestimáveis para nós!

Ao nosso querido professor orientador Keoma Defáveri do Carmo e Silva pelas aulas, reuniões, pela paciência em todos os ensinamentos e apoio durante toda a construção da nossa vida acadêmica!

Por fim, queremos nos agradecer mutuamente pela parceria de vida e graduação, nossa amizade durante esses anos não poderia ser celebrada e documentada de melhor forma que não essa, juntos em tudo, até o final.

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo” (Albert Einstein).*

## RESUMO

Entre os materiais mais consumidos na indústria da construção civil destaca-se o cimento Portland (CP), sendo o principal aglomerante para a produção de concretos, argamassas e pastas. Diante da preocupação com os impactos ambientais, busca-se cada vez mais alternativas para diminuir a utilização do cimento, que concomitantemente solucionem as questões ambientais e técnico-econômicas. Uma das alternativas para reduzir o impacto causado pelo processo produtivo de CP é a redução no seu consumo através da sua substituição parcial por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS). Os MCS são materiais que oferecem melhorias nas propriedades dos compósitos podendo atuar como materiais de enchimento, ou como aglomerantes do CP. O presente trabalho visa o levantamento e análise dos principais MCS utilizados e ainda em desenvolvimento encontrados na literatura, reunindo informações a respeito de suas influências nas propriedades dos compósitos cimentícios, de modo a tornar as informações a respeito desses materiais mais acessíveis. Foram reunidos diversos estudos e resultados sobre as características e influências dos MCS nas propriedades dos compósitos no estado fresco e endurecido além da influência na cinética de hidratação do CP. Aspectos como a demanda de água, trabalhabilidade, resistência à compressão e durabilidade foram utilizados como direcionamento para apresentação e discussão dos dados levantados. Através das informações e resultados reunidos foi possível observar melhorias nas propriedades proporcionadas pelos MCS e conseqüentemente sua utilização como material substituinte do cimento, levando à diminuição da demanda de cimento e assim à redução dos impactos causados pela sua produção.

**Palavras – chave:** MCS, pozolanas, fileres, aglomerantes hidráulicos.



## ABSTRACT

Among the most consumed materials in the construction industry, Portland cement (CP) stands out, being the main binder for the production of concrete, mortars and pastes. Given the concern with environmental impacts, more and more alternatives are sought to reduce the use of cement, which simultaneously solve environmental and technical-economic issues. One of the alternatives to reduce the impact caused by the CP production process is the reduction in its consumption through its partial replacement by Supplementary Cement Materials (SCM). SCM are materials that offer improvements in the properties of composites and can act as filling materials, or as an agglomerating CP. This work aims to survey and analyze the main MCS used and still under development found in the literature, gathering information about their influence on the properties of cementitious composites, in order to make the information about these materials more accessible. Several studies and results were gathered on the characteristics and influences of SCM on the properties of composites in the fresh and hardened state, in addition to the influence on the CP hydration kinetics. Aspects such as water demand, workability, compressive strength and durability were used as guidance for the presentation and discussion of the data collected. Through the information and results gathered, it was possible to observe improvements in the properties provided by SCM and consequently its use as a substitute material for cement, leading to a reduction in the demand for cement and thus to a reduction in the impacts caused by its production.

**Keywords:** SCM, pozzolans, fillers, hydraulic agglomerating.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Taxa da liberação de calor do cimento Portland com relação a/c igual à 0,4 .....	10
Figura 5.1 - Taxa de liberação de calor em concretos com substituição de EGAF. ....	24
Figura 5.2 - Taxa de liberação de calor em concretos com substituição de CV. ....	25
Figura 5.3 - Taxa de liberação de calor em concretos com substituição de SA. ....	25
Figura 5.4 - Expansão de concretos com substituição de cimento por MCS. ....	27
Figura 5.5 - Influência da substituição de CCA no ganho de resistência de argamassas aos 28 dias a/c=0,52 .....	33
Figura 5.6 - Resistência à compressão de concretos com adição SA para fator a/c = 0,27. ....	34
Figura 5.7 - Resistência à compressão de concretos com incorporação de SA .....	35
Figura 5.8 - Resistência compressão de concretos com adição de CV .....	37
Figura 5.9 - Ganho de resistência de compósitos com adição de CV de baixo teor de cálcio aos 28 dias .....	37
Figura 5.10 - Ganho de resistência percentual em relação ao controle para CV, SA e CCA. .	38
Figura 5.11 - Resistência à compressão de concretos com incorporação de MC, SA e CV. ....	39
Figura 5.12 - Comportamento da porosidade em relação ao percentual de substituição. ....	42
Figura 5.13 - Comparação do comportamento da porosidade de concretos com substituição de CP por MC, SA e CV. ....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais compostos do cimento Portland.....	4
Tabela 2.2 - Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil.....	5
Tabela 4.1 - Requisitos químicos das cinzas volantes .....	14
Tabela 5.1 - Composição química percentual típica dos MCS estudados .....	18
Tabela 5.2 - Resumo das influências de MCS na hidratação dos compósitos de CP. ....	23
Tabela 5.3 - Resumo da influência dos MCS no calor de hidratação .....	24
Tabela 5.4 - Resumo da influência dos MCS na RAA .....	28
Tabela 5.5 - Resumo da influência dos MCS na demanda de água, superplastificante e trabalhabilidade.....	31
Tabela 5.6 - Resumo das principais influências da incorporação dos MCS no ganho de resistências à compressão dos compósitos cimentícios. ....	41
Tabela 5.7 - Resumo das principais influências dos MCS na durabilidade dos compósitos. ...	46
Tabela 5.8 - Resumo das influências dos MCS estudados sobre as características de absorção de água dos compósitos cimentícios.....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPBC	Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação
CBC	Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar
CCA	Cinza da Casca de Arroz
CCB	Cinza da Combustão Biomassa
CLE	Cinza do Lodo de Esgoto
CM	Concha de Molusco
COP	Cinza do Óleo de Palma
CP	Cimento Portland
CPB	Cimento Portland Branco Estrutural
CPI	Cimento Portland Comum
CPII-E	Cimento Portland Composto com Escória
CPII-F	Cimento Portland Composto com Filler
CPIII	Cimento Portland de Alto-Forno
CPII-Z	Cimento Portland Composto com Pozolana
CPI-S	Cimento Portland Comum com adição
CPIV	Cimento Portland Pozolânico
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CV	Cinza Volante
CV-C	Cinza Volante Classe C
CV-F	Cinza Volante Classe F
EGAF	Escória de Alto-Forno
FC	Fíler Calcário
MC	Metacaulim
NBR	Norma Brasileira
PV	Pó de Vidro
RAA	Reação Álcali-Agregado
RS	Cimento Portland Resistente a Sulfatos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_2S$	Silicato dicálcico
$C_3A$	Aluminato tricálcico
$C_3S$	Silicato tricálcico
$C_4AF$	Ferroaluminato tetracálcico
$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
$CaSO_4$	Sulfato de cálcio ou anidrita
$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$	Hemidrato ou bassanita
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Sulfato de cálcio di-hidratado ou gipsita (gesso)
$CO_2$	Dióxido de carbono

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Cimento Portland.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Composição Química.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Tipos de Cimento Portland .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Propriedades do cimento.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Propriedades do Estado Fresco .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Propriedades do Estado Endurecido.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Hidratação do Cimento .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Período de Pega e Cura dos Compósitos Cimentícios .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>Etapas do estudo .....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES.....</b>	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais Pozolânicos .....</b>	<b>12</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Sílica Ativa.....</b>	<b>12</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Cinza Volante .....</b>	<b>13</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Metacaulim .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Cinza da Casca de Arroz.....</b>	<b>14</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Cinza do Bagaço de Cana de Açúcar .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2</b>	<b>Materiais Hidráulicos .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Escórias .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3</b>	<b>Fíleres.....</b>	<b>16</b>
<b>4.4</b>	<b>MCS Alternativos .....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>INFLUÊNCIA DOS MCS NOS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1</b>	<b>Composição Química dos MCS .....</b>	<b>18</b>

<b>5.2</b>	<b>Reatividade dos MCS .....</b>	<b>19</b>
<b>5.3</b>	<b>Influência dos MCS nos Mecanismos de Reação .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Hidratação dos Compósitos .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Calor de Hidratação .....</b>	<b>23</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Reação Álcali-Agregado .....</b>	<b>26</b>
<b>5.4</b>	<b>Influência dos MCS nas Propriedades dos Compósitos no Estado Fresco.....</b>	<b>29</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Demanda de Água e Trabalhabilidade .....</b>	<b>29</b>
<b>5.5</b>	<b>Influência dos MCS nas Propriedades dos Compósitos no Estado Endurecido..</b>	<b>32</b>
<b>5.5.1</b>	<b>Resistência à Compressão .....</b>	<b>32</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Durabilidade.....</b>	<b>42</b>
<b>5.5.3</b>	<b>Absorção de Água .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>6.1</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das práticas mais remotas que se tem conhecimento. Desde os primórdios da humanidade foi concebida artesanalmente, acarretando na produção de grande variedade de subprodutos e sendo responsável pelo consumo excessivo de recursos naturais provenientes de fontes não renováveis (LINTZ et al. 2012). Marinho (2014) destaca que a indústria da construção civil é notoriamente responsável por ocasionar grande impacto ambiental. Entre os materiais mais consumidos na indústria da construção civil destaca-se o cimento Portland (CP), sendo o principal aglomerante para a produção de concretos, argamassas e pastas (CAMILO et al. 2018). Durante a produção do cimento tem-se uma alta liberação de CO<sub>2</sub> para atmosfera, chegando a 1 tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por tonelada de cimento produzido. Além disso, o consumo energético envolvido no processo de clínquerização é alto, e requer cerca de 4 GJ por tonelada de cimento (WORRELL, 2001).

As iniciativas da indústria brasileira e mundial para mitigação dos gases de efeito estufa se concentram em três eixos sendo eles: a eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos ou de fontes renováveis e o uso de cimento com adições. É importante destacar que no Brasil alguns avanços já foram alcançados, pois uma série de características do processo de produção e de medidas, adotadas há muitos anos pelo setor cimenteiro, posicionaram a indústria nacional entre as mais eficazes no controle de suas emissões, resultando em um dos menores níveis de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzida no mundo (BATTAGIN, 2011). Neste contexto, reduzir o consumo de cimento é benéfico e industrialmente atraente do ponto de vista econômico e ambiental. Esta redução por meio da incorporação de subprodutos como as adições minerais, além de reduzir a quantidade de CP consumida, se apresenta como uma opção eficiente de destinação de resíduos (BATTAGIN, 2011).

O que motiva atualmente as pesquisas relacionadas à incorporação de materiais alternativos em matrizes cimentícias não são apenas as reduções de CO<sub>2</sub> ou mesmo a reciclagem de resíduos da mineração e outras indústrias, mas também a possibilidade de melhoria considerável nas propriedades dos compostos cimentícios, tanto no estado fresco, quanto no endurecido, o que torna crescente o valor de mercado e a relevância dos estudos em torno dos chamados Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) (NEVILLE, 2016).

Estudos sobre a aplicação de cimentos com adições em concretos, argamassas e pastas indicam, em ensaios mecânicos e físicos, resultados muitas vezes similares ou superiores aos encontrados para matrizes produzidas apenas com cimento convencional. Análises quanto à

durabilidade de elementos com incorporação de diversos MCS também apresentam resultados favoráveis à sua utilização (THOMAS, 2013).

O objetivo deste trabalho é produzir uma revisão bibliográfica reunindo informações presentes na literatura a respeito da utilização dos MCS nos compósitos à base de cimento e investigar a influência destes materiais nas propriedades das matrizes.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Cimento Portland**

O material conhecido como cimento Portland (CP) é resultante de um processo parcial de fusão de uma mistura homogeneizada de calcário e de uma quantidade apropriada de argila, escória ou xisto. John Smeaton, em meados do século XVIII, encontrou em certos calcários impuros níveis apropriados de sílica e alumina e percebeu que estes tinham características cimentantes, ou seja, podiam interagir com a água e produzir hidratos resistentes e duráveis (OWENS, 2003).

O CP possui como principal constituinte de sua matriz o clínquer, material resultante de um processo de calcinação da mistura entre calcário (75% à 80%) e argila (20% à 25%), além de compostos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, utilizados com o objetivo de manter a estabilidade das reações. O processo de calcinação ocorre após todo o processamento da matéria prima, que consiste na extração, britagem, pré-homogeneização, moagem e homogeneização dos compostos, dando origem à chamada farinha. A farinha passa então por um processo de queima em um forno rotativo a aproximadamente 1450°C, seguido de um resfriamento, em resfriador industrial, dando origem ao clínquer. A correta proporção dos compostos químicos da mistura é fundamental para proporcionar a formação de compostos hidráulicos e conferir a propriedade aglutinante ao CP (BATTAGIN, 2011).

O CP é então obtido através da moagem do clínquer juntamente com algumas formas de sulfato de cálcio, que agem como materiais reguladores do tempo de pega ou do endurecimento inicial do composto final (ZAMPIERI, 1989). As adições minerais vêm sendo cada vez mais utilizadas, não somente no Brasil, mas mundialmente como constituintes dos cimentos, moídas juntamente com o clínquer, ou de forma separada (BATTAGIN, 2011).

#### **2.1.1 Composição Química**

Os principais compostos constituintes do CP, formados no processo de clinquerização, são o silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), cuja composição exata pode sofrer variações. A composição em óxidos e abreviaturas usualmente utilizadas na literatura são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Principais compostos do Cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Fonte: Adaptado de Neville (2016).

O  $\text{C}_3\text{S}$  contribui principalmente para a resistência nas primeiras idades do processo de hidratação. Já o  $\text{C}_2\text{S}$ , outro composto de elevada importância na hidratação do CP, contribui principalmente para a resistência tardia do processo de hidratação (NEVILLE, 2016). Ainda elencando os principais compostos, destaca-se o  $\text{C}_3\text{A}$ , que é o principal composto aluminato constituinte do clínquer Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Ele se apresenta em quantidade relativamente pequena nos cimentos, mas tem importante influência no comportamento do material, visto que a reação entre o  $\text{C}_3\text{A}$  e a água causa enrijecimento inicial. Todavia, este composto contribui muito pouco para a resistência dos compostos, exceto nas primeiras idades. Por último, o  $\text{C}_4\text{AF}$ , que na realidade é uma solução sólida, apresenta pouca contribuição na resistência dos compósitos (NEVILLE, 2016).

Além dos principais compostos constituintes citados, o CP também possui em sua constituição os sulfatos alcalinos, os quais possuem matérias-primas ricas em elementos alcalinos, como potássio e sódio, e sulfatos. De acordo com Battagin (2011), estes componentes alcalinos, mesmo em concentrações baixas, desempenham grande papel no fenômeno da reação álcali-agregado (RAA) e na própria cinética de hidratação do cimento, descritos nos próximos tópicos deste trabalho. Os álcalis também podem originar de outras fontes além do cimento, tais como a água de amassamento, adições e aditivos químicos, como o sulfato de cálcio di-hidratado na forma de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), sulfato mais utilizado na indústria de cimento, também conhecido como gesso. O sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) também pode ser encontrado no CP sob as formas de hemidrato ou bassanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) e anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). O  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , intencionalmente adicionado ao CP, com concentrações entre 2 e 5%, variando em função do teor de reatividade do  $\text{C}_3\text{A}$ , da presença de outros álcalis e da finura do cimento, age como regulador da pega da pasta de cimento durante as reações de hidratação. A utilização do  $\text{CaSO}_4$  se torna relevante em função da velocidade de reação do  $\text{C}_3\text{A}$ , que inicia a pega de maneira instantânea inviabilizando a aplicação do compósito na maioria das suas aplicações (BATTAGIN, 2011).

### 2.1.2 Tipos de Cimento Portland

Os cimentos diferenciam-se em termos de porcentagem de clínquer, sulfato de cálcio e de adições acrescentadas no processo de moagem. O Brasil dispõe de oito tipos básicos de CP, baseados no modelo europeu. Considerando os subtipos e classes de resistência podem chegar a cerca de duas dezenas disponíveis ao mercado para as mais variadas aplicações (BATTAGIN, 2011).

O CP comum (CP I), embora praticamente ausente no mercado, principalmente por questões ambientais e de racionalização de energia, continua como referência, por suas características e propriedades, a todos os tipos básicos de CP disponíveis no mercado brasileiro, pois foi o tipo de cimento pioneiramente produzido a partir de 1926 e constituiu o tipo predominante até o final da década de 1980 (BATTAGIN, 2011). A Tabela 2.2 apresenta os tipos de cimento, nomenclaturas, classes e proporção dos compostos constituintes.

Tabela 2.2 - Tipos de Cimento Portland normalizados no Brasil

Nome técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer+gesso	Escória	Pozolana	Fíler Calcário
Comum	CPI	25, 32, 40	100	-		
Comum com adição	CPI-S	25, 32, 40	99-95	1-5		
Composto com Escória	CPII-E	25, 32, 40	94-56	6-34	-	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	94-76	-	6-14	0-10
Composto com Filler	CPII-F	25, 32, 40	94-90	-	-	6-10
Alto-Forno	CPIII	25, 32, 40	65-25	35-70	-	0-5
Pozolânico	CPIV	25, 32	85-45	-	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100-95	-	-	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40	(*)			
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

(\*) A composição depende do tipo original do qual é derivado.

Fonte: Adaptado de Battagin (2011).

## 2.2 Propriedades do cimento

De modo a compreender a influência da substituição parcial do cimento pelos MCS, serão abordadas propriedades e mecanismos, divididos em estado fresco e endurecido, que direcionarão a análise dos diferentes tipos de materiais.

### **2.2.1 Propriedades do Estado Fresco**

O estado fresco pode ser definido como o período até o início da pega do aglomerante. Está relacionado à atributos importantes, tais como a quantidade de água de amassamento e a trabalhabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SCHWAAB, 2015). A seguir serão apresentadas em mais detalhes estas características.

A água de amassamento é necessária para produzir uma mistura que ofereça uma trabalhabilidade adequada e que deve ser suficiente para atender o processo de hidratação do cimento. De acordo com Neville (2016) além de influenciar na trabalhabilidade e no processo de hidratação, a água também exerce influência em aspectos como a pega, resistência, exsudação, fluência, corrosão de armaduras, carbonatação, reação álcali-agregado, propriedades térmicas e muitos outros. O autor também destaca a água presente nos agregados na forma de umidade superficial, que pode representar uma parcela substancial no volume total de amassamento. O estudo adequado da relação água/cimento (a/c) é relevante uma vez que tanto a falta quanto o excesso de água podem afetar de forma negativa as características das argamassas e dos concretos.

A relação a/c está diretamente relacionada à trabalhabilidade, que pode ser compreendida como a quantidade de trabalho, ou o esforço necessário para se alcançar o adensamento total, e mensurada pelo índice de consistência (IC). A trabalhabilidade é condicionada pela função da peça a ser executada e pelos meios que se dispõe para execução, dentre outros aspectos. Desta forma, não existe uma trabalhabilidade ideal, ela será tanto quanto possível influenciada pelas necessidades impostas (NEVILLE, 2016; BATTAGIN, 2011).

### **2.2.2 Propriedades do Estado Endurecido**

O estado endurecido pode ser entendido como a combinação final dos componentes, quando o processo de pega do aglomerante se encerra. A resistência do concreto tipicamente é considerada uma propriedade importante a ser avaliada no estado endurecido, entretanto, em diversas situações práticas, características como a permeabilidade e durabilidade, passam a ser mais relevantes (NEVILLE, 2016). Logo serão tratadas em mais detalhes essas características intrínsecas aos compósitos, sendo elas resistência mecânica, porosidade, permeabilidade e durabilidade.

Do ponto de vista das propriedades mecânicas, a relação a/c é o fator mais relevante, uma vez que, independente de outros fatores, afeta a porosidade e a permeabilidade da matriz do compósito cimentício e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado

(MEHTA; MONTEIRO, 2008). A permeabilidade do concreto descreve os fluxos através de meios porosos. O movimento dos diversos fluidos através do concreto não ocorre apenas pelo escoamento por meio de um sistema de poros, mas também por sorção e difusão, sendo que a relevância consiste em estimar a permeabilidade do concreto. Por isso, o termo tipicamente aceito, "permeabilidade", é utilizado para a movimentação geral de fluidos para o interior e através do concreto, exceto quando distinções são necessárias. Devido à existência de diferentes tipos de poros, com alguns contribuindo para a permeabilidade e outros não, é importante a distinção entre porosidade e permeabilidade. Porosidade é a medida da proporção do volume total ocupado por poros e normalmente é expressa em porcentagem e a permeabilidade se refere ao fluxo sob um diferencial de pressão. Caso a porosidade seja elevada e os poros se intercomuniem, eles contribuem para o transporte de fluidos através do concreto, de modo que sua permeabilidade também é elevada. Por outro lado, caso os poros sejam descontínuos ou, de alguma maneira, ineficazes para o transporte, o compósito tem baixa permeabilidade, mesmo que sua porosidade seja elevada (NEVILLE, 2016).

A água normalmente está presente em todo tipo de deterioração, e a facilidade com que penetra nos sólidos porosos determina a taxa de deterioração. A durabilidade inadequada se manifesta pela deterioração, que pode decorrer tanto de fatores externos quanto de causas internas ao concreto. As ações podem ser químicas, físicas e mecânicas. Os efeitos químicos que influenciam negativamente a durabilidade do concreto incluem a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas, reação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente no ar levando ao processo de carbonatação e reações expansivas envolvendo ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão das armaduras no concreto. Os efeitos físicos incluem desgaste da superfície, fissuração devida à cristalização de sais nos poros e exposição a temperaturas extremas. Os danos mecânicos são causados por impacto, abrasão, erosão ou cavitação (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

### **2.3 Mecanismos de Reação do Cimento**

As propriedades do CP são consideradas sob três aspectos: propriedades do cimento puro (pó), propriedades da mistura do cimento com água (pasta) e propriedades da mistura da pasta de cimento com agregado padronizado (argamassa). Estas propriedades são estudadas por meio dos mecanismos de reação, sendo eles, o processo de hidratação do cimento e o período de cura e pega dos compósitos. Estes mecanismos sofrem influência direta da finura do cimento, sendo usualmente definida de duas maneiras distintas, pelo tamanho máximo do

grão ou pelo valor da superfície específica. A finura é o fator que governa a velocidade das reações de hidratação do cimento e tem também sua influência comprovada em muitas qualidades da pasta, das argamassas e dos concretos.

### 2.3.1 Hidratação do Cimento

Quando misturados em água os compostos constituintes do cimento dão início a formação de produtos hidratados, processo conhecido como hidratação do cimento, que ao longo do tempo resulta no endurecimento da massa (NEVILLE, 2016). De forma geral, durante o processo de hidratação ocorre a formação dos principais compostos hidratados de fase sólida, divididos em silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis pela maioria das propriedades físicas e mecânicas das argamassas e concretos em estado endurecido, hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), também chamado de cal hidratada e sulfoaluminatos de cálcio (C-A-S-H), podendo também existir grãos de clínquer não hidratados na mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Inicialmente o  $\text{CaSO}_4$  e os compostos formados durante o processo de fabricação do clínquer começam a entrar em solução, dando origem à fase líquida da mistura saturada de íons. O resultado desta interação entre compostos e íons hidroxilas é a formação dos primeiros cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), também chamado de etringita. Em seguida, grandes cristais prismáticos de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e pequenos cristais fibrosos de C-S-H são formados, preenchendo os vazios ocupados pela água e partículas de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008). De acordo com Taylor (1967), o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  apresenta grande contribuição na alcalinidade da matriz, porém contribui pouco para o ganho de resistência, além de elevar a permeabilidade dos compósitos uma vez que é solúvel em água.

O processo de hidratação de cada componente afeta de maneira diferente na formação da pasta de cimento. O  $\text{C}_3\text{A}$ , por exemplo, é o primeiro composto a se hidratar, dando início ao enrijecimento da pasta, interferindo diretamente no processo de pega e na perda de trabalhabilidade. Já os silicatos,  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$ , formadores de 75% do CP, atuam no desenvolvimento da resistência, que se inicia logo após o processo de pega (MEHTA et al. 1994).

De acordo com Neville (2016), a quantidade de  $\text{C}_3\text{A}$  presente na maioria dos cimentos é relativamente pequena, porém seu comportamento e relacionamento estrutural com as outras fases no cimento o tornam relevante. A reação do  $\text{C}_3\text{A}$  com a água ocorre de maneira instantânea resultando no enrijecimento da pasta podendo impossibilitar seu lançamento e

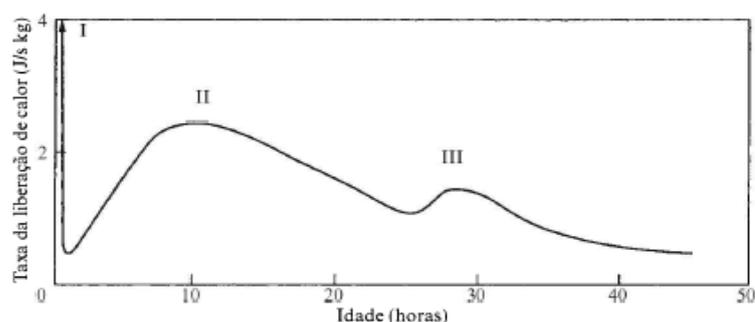
adensamento, fenômeno conhecido como pega instantânea, causando grande liberação de calor. Com o objetivo de impedir que esse fenômeno ocorra de forma tão violenta, é adicionado gesso ao clínquer.

A fase C-S-H corresponde de 50 a 60% do volume dos sólidos em uma pasta de cimento hidratada, tornando-se a fase mais importante da reação, uma vez que determina as propriedades do compósito final (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O C-S-H é obtido a partir do processo de hidratação do  $C_3S$  e  $C_2S$ , que quando em estado puro, apresentam velocidades de hidratação variáveis (NEVILLE, 2016).

De acordo com MEHTA et al. (1994), durante a hidratação, os compostos adquirem estabilidade ao reagirem com a água, ocorrendo uma liberação de energia na forma de calor, chamada de calor de hidratação. A dissipação dessa energia é influenciada pela estrutura dos elementos, onde os elementos de configuração delgada favorecem a dissipação do calor ao ambiente em virtude da menor distância a ser percorrida até a superfície.

Por se tratar de uma reação exotérmica, a taxa de liberação de calor é um indicativo da velocidade de hidratação. A Figura 2.1 é apresentada por Bye (1983) e mostra a variação da taxa de liberação de calor com o tempo. Em análise ao gráfico apresentado, o processo de hidratação apresenta três picos de liberação de calor. O primeiro pico gera grande liberação de calor e corresponde à hidratação inicial das partículas do cimento, envolvendo principalmente o  $C_3A$ . Essa liberação de calor inicial é curta, inibida pela ação do  $CaSO_4$ , seguida de um período em que a velocidade é bastante baixa, conhecido como período de indução ou período de dormência, com duração entre uma e duas horas, período este onde a pasta de cimento possui características de trabalhabilidade. Em seguida, a camada externa de C-S-H formada inicialmente se rompe, retomando lentamente o aumento da velocidade de hidratação e conseqüentemente a liberação de calor, iniciando a pega, através da união dos produtos de hidratação dos grãos individuais. Um segundo pico de liberação de calor é alcançado, geralmente dentro de 10 horas, podendo haver casos onde esse intervalo é reduzido a somente 4 horas (NEVILLE, 2016). De acordo com Brunauer, et al. (1973), após o segundo pico a velocidade de hidratação volta a diminuir por um longo período, onde a reação passa a ser controlada pela difusão através dos poros dos produtos hidratados. Após o esgotamento do  $CaSO_4$  a velocidade de hidratação é retomada a partir da reação do  $C_3A$ , resultando em um terceiro pico, entre 18 e 30 horas.

Figura 2.1 - Taxa da liberação de calor do Cimento Portland com relação a/c igual à 0,4



Fonte: Adaptado de Bye 1983.

### 2.3.2 Período de Pega e Cura dos Compósitos Cimentícios

Neville (2016) define a pega como sendo o processo em que ocorre a mudança do estado fluido para o estado rígido, causado principalmente pela hidratação do  $C_3A$  e  $C_3S$ , acompanhado pelo aumento da temperatura na pasta de cimento. Durante este processo as partículas de cimento sofrem um efeito de floculação dando origem a estruturas sólidas que se tornam responsáveis pela estabilidade da estrutura geral. A pega e o endurecimento são duas etapas de um mesmo processo, onde primeiramente ocorre a pega, seguida então do endurecimento da pasta.

Após o fim da etapa de pega inicia-se o período de cura, procedimento fundamental realizado para que o processo de hidratação ocorra de forma adequada. Segundo Bauer (2000), o processo de cura é entendido como um conjunto de medidas que tem como objetivo evitar a perda de água utilizada no processo de mistura dos compósitos, a qual reage com o cimento durante o processo de hidratação. Este processo tem grande influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade e pode ser realizado de diferentes formas, sendo a mais comum a cura submersa em água. O autor ainda complementa que quanto mais perfeito e demorado for o processo de cura, melhores serão as características dos compósitos.

### 3 METODOLOGIA

A revisão de literatura é parte essencial da pesquisa científica, pois contextualiza o cenário atual, aponta inconsistências conceituais e incita a realização de novos estudos, partindo do resumo e da síntese de trabalhos já existentes. Desta maneira, este trabalho é estruturado como uma revisão de literatura que segue os preceitos do estudo exploratório, por meio de uma pesquisa bibliográfica, desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído de livros e artigos científicos (GIL, 2008).

#### 3.1 Etapas do estudo

A seguir estão descritas as etapas que forneceram os dados e informações que compuseram este estudo. Como fontes de pesquisa foram utilizados 10 livros, divididos em livros especificamente sobre concreto, livros sobre propriedades dos materiais e outros livros técnicos que abordaram a temática, em idioma português, disponíveis na biblioteca virtual da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), publicados no período de 1990 a 2016. Além disso, foram utilizados mais de 90 artigos científicos sobre a temática acessados em diferentes bases de dados, publicados nos últimos 59 anos (1962 a 2021). Dentre estes foram utilizados artigos nacionais e internacional, disponíveis online em texto completo. As seguintes palavras-chaves foram aplicadas materiais cimentícios suplementares, cimento, hidratação do cimento, calor de hidratação, cinzas volantes, sílica ativa. Em inglês supplementary cementitious materials, cement, cement hydration, hydration heat, fly ash, silica fume.

A coleta de dados seguiu a premissa de realizar primeiro uma leitura exploratória de todo o material selecionado, consistindo de uma leitura rápida que objetiva verificar se a obra consultada é de interesse para o trabalho. Em seguida, definidas as obras de interesse passou-se a realização de uma leitura seletiva, mais aprofundada das partes que realmente interessam ao estudo para então realizar o registro das informações extraídas das fontes em instrumento específico, contendo autores, ano, método, resultados e conclusões. Finalizada a etapa de coleta de dados, iniciou-se a análise e interpretação dos resultados, através de uma leitura analítica, com o propósito de ordenar e resumir as informações contidas nas fontes, de forma que estas possibilitassem a obtenção de material para embasar as discussões.

Em posse dos produtos gerados na fase de coleta dos dados, foram realizadas análises e discussões a partir do referencial teórico relativo à temática do estudo.

## 4 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

Os MCS são materiais de granulometria fina, compostos predominantemente por sílica, alumina e cálcio, usados como substituição parcial de CP em compósitos cimentícios. Podem ser classificados como pozolânicos, que sozinhos não possuem propriedades cimentícias, porém, ao reagirem com o  $\text{CaOH}_2$  resultante do processo de hidratação do cimento, produzem C-S-H melhorando as propriedades dos compósitos. Podem também ser classificados como materiais de caráter hidráulico, sofrendo hidratação em contato com a água e contribuindo para a resistência, e materiais que não apresentam reações químicas, praticamente inertes, denominados fíler, que atuam como catalisadores na hidratação de outros materiais, favorecendo a nucleação e a densificação da massa ou exercendo um efeito físico nas propriedades do estado fresco (MALHOTRA; MEHTA, 1996; NEVILLE, 2016). Diante de novos estudos uma nova classificação para os MCS também é sugerida por Suraneni (2019) onde os materiais são divididos em: materiais inertes, pozolânicos de baixa reatividade, pozolânicos de alta reatividade, de hidráulidade latente de baixa reatividade e de hidráulidade latente de alta reatividade. A definição de materiais pozolânicos e de hidráulidade latente, nesse caso, leva em consideração a taxa de liberação de calor e o consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

A seguir, serão apresentados alguns MCS consolidados e alguns novos MCS que tem se mostrado relevantes e promissores.

### 4.1 Materiais Pozolânicos

Segundo Dal Molin (2011), as pozolanas se dividem em dois grupos quanto a sua origem, sendo naturais ou artificiais. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as pozolanas naturais tem origem sedimentar ou vulcânica, exceto a terra diatomácea. O processamento para utilização como adição geralmente envolve britagem, moagem, seleção por tamanho e ativação térmica, quando necessário. Já as pozolanas artificiais são subprodutos industriais ou resultantes de tratamento térmico que exigem ou não algum processamento antes de ser utilizado como adição assim como secagem e pulverização. A seguir serão apresentados alguns MCS pozolânicos, sua forma de obtenção e características principais.

#### 4.1.1 Sílica Ativa

A sílica ativa (SA) é um material proveniente do processo de produção estável do silício metálico ou liga de ferro silício. As ligas metálicas, quando aquecidas em fornos acima de

2.000°C, liberam SiO em estado gasoso, que ao oxidar-se forma partículas de SiO<sub>2</sub>, coletadas por filtros. Esse material é um tipo de pozolana fundamentalmente formada por partículas esféricas, extremamente finas, com partículas inferiores a 1 µm e com área superficial específica entre 15.000 e 30.000 m<sup>2</sup>/kg, apresentando elevada superfície específica. (ABNT NBR 13956-1, 2012).

#### **4.1.2 Cinza Volante**

De acordo com a NBR 12653 (2014) cinzas volantes (CV) são resíduos finamente divididos resultantes da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado que apresenta atividade pozolânica. É obtida pelo processo de precipitação electrostática, ou captação mecânica em filtros de saco ou dispositivos semelhantes, da poeira presente no fumo produzido pela queima de combustível nas centrais termoelétricas a carvão (SILVA, 1999). As cinzas volantes possuem como principal componente a sílica, responsável por conferir propriedades ao composto cimentício, além de pequenas quantidades de carbono e a presença de alumina em sua composição, sendo classificadas em função da quantidade desses materiais (RECENA, 2011; CEZAR, 2011).

Em se tratando de normatização, tanto a ASTM C618 (2005) quanto a NBR 12653 (2014), classificam as CV de acordo com requisitos químicos, sendo as seguintes classificações para ASTM:

- Classe N: cruas ou calcinadas, oriundas de terras diatomáceas, quartzo de opalina e xistos; turfos vulcânicos e argilas.

- Classe F: Cinza volante produzida pela incineração de carvão betuminoso ou antracito, tendo atividade pozolânica.

- Classe E: Cinza oriunda de carvão betuminoso ou lignina, apresentando propriedades pozolânicas e cimentantes.

E para ABNT:

- Classe N: Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas.

- Classe C: Pozolana gerada através da combustão de carvão mineral oriundo de usinas termoelétricas.

- Classe E: Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores.

Estes requisitos se assemelham nas duas normas, que se diferem na nomenclatura e descrição das classes de CV, sendo que a ASTM C618 (2005) classifica o material em classe N, F e C, enquanto a NBR 12653 (2014) classifica em classe N, C e E, como mostrado na Tabela 4.1, que relaciona os requisitos com as classes de CV.

Tabela 4.1 - Requisitos químicos das cinzas volantes

Propriedades e percentuais	Classe das cinzas volantes		
	Classe N/N	Classe F/C	Classe C/E
Dióxido de sílica (SiO <sub>2</sub> ) + Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), min %	70	70	50
Óxido sulfúrico (SO <sub>3</sub> ), máx. %	4	5	5
Conteúdo da mistura, máx. %	3	3	3
Perda na ignição, máx. %	10	6	6

Fonte: Adaptado de ASTM C 618 (2005) e NBR 12653 (2014).

#### 4.1.3 Metacaulim

Oriundo da calcinação de argilas cauliníticas, ou também do resíduo da indústria de papel, o metacaulim (MC), constituído principalmente por silicato de alumínio hidratado (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) é um material pozolânico predominantemente amorfo proveniente de processos industriais, moagem de argilas e caulins. As argilas cauliníticas têm temperatura de queima em torno de 700°C, possuem baixo teor de carbono em sua composição e inicialmente não possuem caráter pozolânico, porém seus compostos passam a possuir uma estrutura amorfa quando submetida à certa temperatura de queima, devido a retirada dos íons hidroxila (DAL MOLIN, 2011).

#### 4.1.4 Cinza da Casca de Arroz

O processo de beneficiamento do arroz produz como resíduo a casca de arroz (CA), que devido ao seu alto poder calorífico (aproximadamente 16720 kJ/kg) e baixo custo, se apresenta como um excelente substituto da madeira utilizada na geração de calor e de vapor, necessários aos processos de parboilização e secagem dos grãos. Na indústria da construção civil, parte desta casca é utilizada na fabricação de blocos e painéis, em substituição a fibra de madeira tipicamente empregada (CHAKRAVERTY, et. al, 1985). Diante da queima da CA em fornos com temperatura controlada ou em fornalhas a céu aberto, é obtida a cinza de casca de arroz (CCA), designada residual quando alcançada sem controle de tempo de exposição e temperatura. A CCA empregada como material de construção civil deve apresentar elevada

qualidade e reatividade química, reduzido teor de carbono, elevado grau de pureza e estrutura amorfa (MOHANTY, 1974).

#### **4.1.5 Cinza do Bagaço de Cana de Açúcar**

O Brasil é considerado o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus derivados açúcar e etanol. Durante a extração do caldo da cana-de-açúcar é gerada significativa quantidade de bagaço (aproximadamente 30% da cana moída), biomassa utilizada como fonte energética. Cerca de 95% de todo o bagaço produzido no Brasil é queimado em caldeira para produção de vapor gerando, como resíduo, a cinza de bagaço. Constituída, basicamente, de sílica,  $\text{SiO}_2$ , a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) tem potencial para ser utilizada como adição mineral em argamassas e concretos (CORDEIRO et al. 2008). Estimativas mostram que, para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, são produzidos aproximadamente 6kg de CBC (SALES e LIMA, 2010). Dessa forma, a indústria da construção civil apresenta um elevado potencial para incorporação de resíduos desta natureza como matéria prima, colaborando para o desenvolvimento tecnológico, ambiental e econômico regional (ROCHA; CHERIAF, 2003).

## **4.2 Materiais Hidráulicos**

Os materiais hidráulicos são materiais que apresentam hidraulicidade latente, reagindo de forma semelhante ao CP quando em contato com a água. Esses produtos, quando ativados via pH, ativadores, processos de moagem ou temperatura, possuem a capacidade de produzirem compostos hidratados, como o C-S-H, conferindo melhorias nas propriedades dos compósitos (DAL MOLIN, 2011). Dentre os materiais hidráulicos, as escórias granuladas de alto-forno são os materiais que mais se destacam como substituição ao CP.

### **4.2.1 Escórias**

Durante o processo de extração de minérios, metais como ferro, cobre, alumínio e muitos outros, são encontrados em sua forma primitiva, possuindo impurezas. Estes materiais passam então pelo processo de fundição em fornos onde são expostos a altas temperaturas, processo este que separa as impurezas do metal fundido. O composto removido através de separação é chamado de escória. São produzidos de 200 a 300 kg de escória por tonelada de ferro gusa produzido. A escória fundida é uma massa que, por sua insolubilidade e menor densidade, sobrenada no ferro gusa e é conduzida por canais até o local de resfriamento. O seu

modo de resfriamento determinará se a escória será bruta, obtida após resfriamento lento, não possuindo poder de aglomerante hidráulico ou granulada, resfriada bruscamente, com grande potencial hidráulico, dando origem à chamada escória granulada de alto forno (EGAF) (PIATAK et al., 2015).

### 4.3 Fíleres

O fíler é um material de granulometria fina, semelhante à finura das partículas de CP, que promove através da ação física, benefícios às propriedades dos compostos cimentícios, como trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, capilaridade, exsudação e tendência à fissuração. Em matrizes a base de cimento promove efeitos fíler, de nucleação, de diluição e químico. O efeito fíler é descrito como aumento da compacidade da mistura seca e, geralmente ocorre quando as partículas do material utilizado como fíler são menores que as partículas de cimento e assim preenchem os vazios aumentando a compacidade da mistura. Como resultado desse efeito, a resistência geralmente é aumentada. Quando as partículas do material são maiores ou similares a do cimento, a compacidade pode ser reduzida (BERODIER e SCRIVENER, 2014),

Os fíleres podem ser de origem natural, como o Fíler Calcário (FC) e o Fíler Basáltico (FB), ou obtidos a partir do processamento de minerais orgânicos e não devem aumentar a demanda de água na mistura, a não ser quando intencional, nem afetar a resistência do composto final ao intemperismo ou a proteção dada às armaduras no caso do concreto armado, devendo apresentar compatibilidade física com o cimento ao qual será misturado.

O FC é obtido através da moagem fina do calcário, rocha sedimentar que contém minerais com quantidades acima de 30% de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Seu uso resulta em uma distribuição de tamanho de partícula ideal ao cimento. Já há algumas décadas, o calcário é um constituinte eficaz de cimentos e concretos, e as análises comparativas devem sempre ser feitas considerando-o como um MCS quando incluído por moagem integrada com clínquer de cimento ou como enchimento quando adicionado separadamente ao concreto. Com a adição de pó de calcário, obtém-se misturas mais estáveis e robustas, com vantagens, como: aumento da produtividade do cimento, redução dos custos de produção e redução das emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{NO}_2$  por tonelada de cimento produzido (GUDISSA e DINKU, 2010).

Um ponto importante a ser destacado é que devido à elevada superfície específica, alguns materiais pozolânicos e hidráulicos também podem atuar como fíleres, através da influência física, preenchendo os vazios da mistura e densificando a massa (NEVILLE, 2016).

#### 4.4 MCS Alternativos

Neste tópico, serão tratados resumidamente, materiais de diversas fontes, como por exemplo o pó de vidro (PV), a cinza de combustão de biomassa (CBM), a cinza do óleo de palma (COP), o resíduo de conchas de moluscos (CM) e a cinza de lodo de esgoto (CLE).

O PV atraiu a atenção dos estudiosos pelo alto teor de sílica e pelas características físicas semelhantes ao concreto. Entretanto, um dos principais desafios do uso deste material nos concretos são as reações expansivas que podem ocasionar fissuração a depender da granulometria em que o resíduo se encontra (HIRSCH, 1962; SHI E ZHENG, 2007).

A CBM, é produzida praticamente da mesma forma que as CV, CBC e a CCA, no entanto, as fontes são geralmente resíduos compostos por podas de quintal, resíduos florestais, detritos de tempestades e resíduos de processamento de madeira. A cinza produzida é gerada e coletada de forma semelhante à CV e tem sido usado de forma semelhante (RAMOS et al., 2013; SIDDIQUE, 2012).

A COP é um subproduto da indústria do biodiesel, gerada a partir da incineração de combustíveis, como cacho de frutas, fibra de palma e cascas de óleo de palma. Esses combustíveis são normalmente queimados em temperaturas variando de 800° a 1000° C. Este material é predominantemente gerado em países asiáticos como Malásia e Tailândia, onde a COP é produzida a uma taxa de mais de 100.000 ton/ano (RANJBAR et al., 2014).

O uso da CM como substituição cimentícia é investigado em todo o mundo devido à variedade de resíduos desta origem disponíveis em regiões costeiras. A exemplo das ostras a produção de cascas somente na China foi estimada em 3 milhões de ton/ano. Quando este resíduo é utilizado como adição ao cimento, a composição química da concha de ostra queimada é um fator interveniente. Este resíduo contém semelhanças com a cal, sendo composto por carbonato e  $\text{Ca(OH)}_2$ , embora em proporções diferentes (LI et al., 2015).

A CLE é o material resultante do tratamento de águas residuais. A utilização como fertilizante é o uso benéfico mais comum da CLE, os usos secundários apontados na literatura são como fonte de combustível ou como um material cimentício suplementar. Embora o resíduo seja utilizado principalmente como fertilizante, ele pode ser processado um pouco mais para permitir a sua utilização como substituição do CP (EUROPA, 2010).

## 5 INFLUÊNCIA DOS MCS NOS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO

Nesse tópico serão apresentadas as principais influências dos MCS nos compósitos cimentícios, avaliando a composição química e a reatividade desses materiais e como eles atuam nos mecanismos de reação entre os MCS e a matriz cimentícia e nas propriedades do estado fresco e endurecido.

### 5.1 Composição Química dos MCS

A Tabela 5.1 apresenta um resumo da composição química dos MCS cinza volante classe C (CV-C), cinza volante classe F (CV-F), EGAF, SA, CCA, CBC, MC e FC. É possível observar que a maioria dos materiais descritos são predominantemente compostos por sílica, alumina e cálcio, com os teores variáveis em decorrência da variabilidade da obtenção e do processamento.

Tabela 5.1 - Composição química percentual típica dos MCS estudados

Composto	CV-C (%) [Zhang, et al (1996); Navarrete et al (2020); Paris, et al (2016) e Papadakis, S. Tsimas (2002)]	EGAF (%) [Silva Pinto et al (2009); Magalhães (2007) e Paris et al (2016)]	CV-F (%) [Zhang, et al (1996); Navarrete et al (2020) e Poon, et al (2000)]	SA (%) [Siddique e Khan (2011); Hoffmann (2006); Holland (2005)]
SiO <sub>2</sub>	23,1 - 50,5	33,04 - 40,63	40,7 - 56,8	85 - 97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,3 - 21,3	11,05 - 14,12	17,7 - 28,2	0,09 - 0,9
CaO	11,6 - 29	33,34 - 41,83	0 - 3	0,3 - 0,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,26 - 22,5	3,13 - 5,43	5,3 - 29,9	0,1 - 2
TiO <sub>2</sub>	0 - 1,7	0,39 - 0,55	0 - 0,9	0 - 1,0
MgO	1,5 - 7,5	1,47 - 0,55	1,1 - 5,2	-
K <sub>2</sub> O	0,4 - 1,9	0,38 - 1,52	1,47 - 1,6	0,5
Na <sub>2</sub> O	1,0 - 2,1	0,10 - 0,17	0,14 - 0,7	0,1 - 0,4
SO <sub>3</sub>	0 - 3	2,65 - 3,10	0,46 - 1,3	0,0 - 0,4
Composto	CCA (%) [Paris et al (2016); Della et al (2006) e Aprianti (2015)]	CBC (%) [(Hernandez (1998); Ganesan (2007) e Akram et al. (2009)]	MC (%) [Souza (2003); Rocha (2005); Santos et al (2020)]	FC (%) [Feltrin e Isaia (2018); Almeida et al (2019); Scolaro (2020)]
SiO <sub>2</sub>	80,7 - 97,87	62,44 - 72,74	40 - 60	3,21 - 14,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3 - 0,82	5,26 - 26,7	25 - 45	1,1 - 1,54
CaO	0,5 - 1,5	0,8 - 7,99	< 1,0	28,89 - 62,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13 - 2,86	3,92 - 5,8	2,06 - 8,0	0,53 - 0,87
TiO <sub>2</sub>	0 - 0,01	0 - 0,32	0 - 1,82	0,12 - 0,16
MgO	0,30 - 0,82	0,6 - 2,97	0 - 0,23	5,5 - 18,28
K <sub>2</sub> O	0,77 - 3,7	2,6 - 6,87	0,03 - 3,0	0,20 - 0,39
Na <sub>2</sub> O	0,1 - 1,15	0,2 - 3,15	0 - 1,5	0,18 - 0,23
SO <sub>3</sub>	0 - 0,3	0,72 - 2,4	< 0,1	-

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2021).

De acordo com a NBR 12653 (2014), quando a somatória dos teores de sílica, alumina e ferro superam 70% o material pode ser classificado como pozolânico. Com exceção da EGAF e do FC, todos os demais são identificados como materiais pozolânicos uma vez que apresentam percentuais que atendem aos valores mínimos prescritos pela norma. Os materiais pozolânicos possuem o  $\text{SiO}_2$  como composto químico predominante, seguido do  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , compostos esses responsáveis pela reação com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para formação de C-S-H. Dentre os materiais pozolânicos destaca-se a SA, por seu alto percentual de  $\text{SiO}_2$ , podendo chegar a até 97%, e baixo teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Já os materiais hidráulicos, como a EGAF, apresentam maiores porcentagens de  $\text{CaO}$  quando comparados aos materiais pozolânicos. Como reportado pelos autores, as EGAF apresentam como principais compostos a  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  em estado amorfo, atingindo valores de até 95% (PARIS, 2016).

É perceptível pela discrepância no intervalo percentual dos elementos químicos constituintes dos MCS que existe uma alta variabilidade entre estes valores. Bezzera (2011), por exemplo, aponta que a composição química das CCA pode apresentar variações em função do solo em que o arroz é plantado, dos tipos e teores de fertilizantes utilizados, assim como do tipo de arroz. Diante disso, a variabilidade dos MCS pode estar associada aos materiais de origem e aos processos de obtenção e beneficiamento destes materiais, evidenciando a importância da caracterização destes materiais antes de sua utilização.

## 5.2 Reatividade dos MCS

Estudos têm sido realizados a fim de entender melhor os mecanismos, parâmetros e propriedades que controlam a cinética de reação das misturas cimentícias. Os MCS geralmente apresentam os mesmos elementos químicos presentes no clínquer de CP, se diferenciando apenas em proporção e constituição das fases sólidas, que afetam significativamente o progresso da reação destes materiais, como no caso dos materiais de hidráulidade latente, como as EGAF, que em alguns casos utilizam o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  apenas como ativadores, e por isso, atingem maior grau de hidratação antes da depleção do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (VOLLPRACHT et. al, 2016; ADU-AMANKWAH et al. 2017). Além disso, de acordo com Suraneni (2019), MCS com maiores teores de  $\text{CaO}$  apresentam menor consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , enquanto MCS com maiores teores de  $\text{SiO}_2$  apresentam maior consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Dai et al. (2014) aponta que geralmente, para substituições de clínquer entre 30 e 50%, os MCS apresentam reação mais lenta quando comparados à fase  $\text{C}_3\text{S}$ , o que resulta em uma diminuição no desenvolvimento da resistência mecânica nas primeiras idades à medida que a

substituição por MCS aumenta. É evidente que nem todos os MCS apresentam este comportamento no decorrer do tempo, como no caso do MC, conhecido por ser muito mais reativo que as CV, porém seu grau de hidratação é limitado à disponibilidade de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Embora a maioria dos MCS apresente reação lenta, ela ocorre de maneira prolongada, se tornando a principal causa do desenvolvimento da resistência nas idades mais avançadas (SKIBSTED; SNELLINGS, 2019).

Khan et al. (1985), estudando a CCA observou variações no que se refere ao início das reações pozolânicas, verificando que 52% da sílica encontrava-se consumida ao vigésimo oitavo dia de idade. Nesta pozolana de alta reatividade, as variações têm origem nas condições de formação da cinza, como tempo e temperatura de queima, e nas suas características físicas, como por exemplo a finura, atingida após o processo de moagem (MALHOTRA e MEHTA, 1996). Apesar destes fatores provocarem alterações em sua reatividade, o uso da cinza de CCA geralmente resulta numa reação rápida. Tashima et. al. (2012) ainda compara a reatividade da CCA com a SA, material mais reativo presente no mercado atual, e conclui que este material pode ser utilizado como uma fonte alternativa da SA para produção de argamassas e concretos, visto que a CCA pode apresentar maior viabilidade econômica diante da SA.

Mudanças nas propriedades dos MCS, como na área superficial através de moagem, são instrumentos utilizados para aumentar a reatividade destes materiais. Com o aumento da superfície específica dos MCS, o número de pontos de nucleação para precipitação e crescimento dos hidratos aumenta, o que pode acelerar o processo de hidratação dos MCS e das fases do clínquer nas primeiras idades, como no caso da utilização da SA, que devido às partículas de granulometria fina e elevado teor de  $\text{SiO}_2$ , promovem um aumento da reação pozolânica, aumentando assim a reatividade do CP (HOLLAND, 2005). Outra abordagem comum é a ativação dos MCS através da alteração das condições externas de temperatura ou da composição da solução, como a mudança no pH por ativação alcalina. Uma técnica mais recente é a ativação por adição de contra-ânions, como os sulfatos e carbonatos, de modo a formar hidratos de baixa solubilidade, com o objetivo de aumentar a força de reação e reduzir a atividade de inibidores como aluminatos (SNELLINGS, 2016; ADU-AMANKWAH et al., 2017).

### 5.3 Influência dos MCS nos Mecanismos de Reação

A reação dos MCS nos compósitos de CP é geralmente promovida por álcalis e pela presença de  $\text{Ca(OH)}_2$  formado pela hidratação do cimento. Basicamente os MCS atuam de três formas nos compósitos cimentícios, sendo elas: promovendo o refinamento dos poros e densificando a matriz cimentícia, reagindo com o  $\text{Ca(OH)}_2$  e água para formação de C-S-H e refinando a interface entre o agregado e a pasta de cimento. O refinamento dos poros e a densificação da matriz são proporcionados pelo preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento. O  $\text{Ca(OH)}_2$  é fundamental para a reação pozolânica dos MCS e quase todos os métodos de avaliação de atividade pozolânica envolvem a reação química do material com o  $\text{Ca(OH)}_2$ . O refinamento da interface ocorre a partir da melhor distribuição granulométrica e homogeneização da região de transição entre agregado e pasta de cimento (SCRIVENER et al, 2015). Dessa forma, serão discutidos a seguir como a ação dos MCS influenciam nos mecanismos de reação.

#### 5.3.1 Hidratação dos Compósitos

Berodier e Scrivener (2014) estudando a respeito do impacto dos MCS nas primeiras idades da hidratação do cimento, concluíram que a relação fíler/cimento tem um pequeno efeito na cinética de hidratação. Os parâmetros de influência na cinética nas primeiras idades são o grau de subsaturação de  $\text{C}_3\text{S}$ , que é afetado pelo tipo de MCS utilizado e a distância entre partículas, que depende da finura e da relação a/c. Os autores propuseram que o efeito da aceleração da hidratação, ocasionado pelas adições de MCS, é superior devido ao efeito mecânico compartilhado entre as partículas durante o processo de mistura quando comparado ao efeito proporcionado pelo aumento da superfície disponível para nucleação de C-S-H. Este efeito aumenta à medida que a distância entre partículas diminui, afetando a camada de C-S-H que envolve os grãos de cimento e previne o acúmulo de íons na interface entre as superfícies.

A Tabela 5.2 apresenta um resumo das principais influências dos MCS estudados no processo de hidratação dos compósitos cimentícios, relacionando aspectos físicos, químicos e percentuais de substituição. Em geral o comportamento de todos os MCS pozolânicos é semelhante e consistem na reação do material com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , formando C-S-H adicional e ainda, em alguns casos, agindo como fíler, acelerando o processo de hidratação (CUNHA et al. 2010). Se tratando do MC e da SA, estudados por Lapeyre e Kumar (2018), constata-se que, em baixos teores de substituição, a sílica acelera a hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  devido a pontos adicionais de nucleação do C-S-H, efeito este que pode diminuir à medida que a substituição aumenta em

função da aglomeração das partículas. Além disso, as partículas de MC apresentam maior granulometria, o que leva este material a ser menos suscetível à aglomeração. No entanto, com o aumento da substituição, foi constatado que íons aluminatos, liberados pela dissolução do MC, inibem a dissolução do  $C_3S$  e prejudicam o desenvolvimento de C-S-H, levando à um retardamento do período de indução da hidratação. Os níveis de dissolução da SA e do MC são menores que os do  $C_3S$ , o que leva a estes materiais apresentarem pouca influência na cinética de hidratação do  $C_3S$ .

El-Diadamony (2018), também avaliando a influência da incorporação de MC em compósitos, observou que para substituições de até 20% o período de início e fim do processo de pega é prolongado, assim como à formação de etringita e diluição do cimento, devido ao efeito de revestimento das partículas de cimento pelo MC. À medida que a taxa de substituição aumenta, o tempo de início e fim da pega sofre uma aceleração, devido à uma pequena diminuição na quantidade de água de amassamento e ao efeito de preenchimento proporcionado pelo MC.

Já de acordo com Taylor (1997), a EGAF, material caracterizado pela hidraulicidade latente, quando misturada à água, apresenta baixa velocidade de hidratação quando comparada à hidratação do cimento, fato este devido a uma camada insolúvel de sílica amorfa e alumina que revestem as partículas do material. Porém, quando combinadas ao CP, utiliza-se do  $Ca(OH)_2$  proveniente do processo de hidratação do cimento como ativador, acelerando assim seu processo de hidratação.

Almeida et al. (2019) ao avaliar a influência da incorporação de FC em compósitos cimentícios também pode observar modificações na cinética de hidratação da matriz cimentícia. Durante o estudo foi possível observar um aumento de cerca de 75% na taxa de reação de hidratação para a amostra com 35% de substituição de CP, o que proporcionou uma redução de 30% no período de hidratação da pasta analisada. Além da aceleração da reação de hidratação também foi observado melhorias no grau de hidratação das partículas, efeito estes que se tornaram mais expressivos com o aumento das taxas de substituição. Este comportamento pode ser atribuído ao efeito de nucleação e de diluição proporcionado pelo FC.

Tabela 5.2 - Resumo das influências de MCS na hidratação dos compósitos de CP.

MCS	Relação	Influência Verificada	Referência
CV	Reação pozolânica	Produz hidratados semelhantes aos obtidos na hidratação do clínquer de CP	Cunha et al. (2010)
MC	Aumento da superfície específica	Colabora na retenção de água, no aumento da coesão, na redução da exsudação e segregação, favorecendo o acabamento final	Cunha et al. (2010)
	Aumento % substituição	Aumento da substituição inibe a dissolução do $C_3S$ , prejudicando o desenvolvimento de C-S-H	Lapeyre e Kumar (2018)
	Substituição < 20%	Prolonga o tempo de início e fim de pega, formação de etringita e diluição do cimento	El-Diadamony (2018)
	Aumento % substituição	Acelera o início e o fim da pega	
SA	% Substituição e reação pozolânica	Baixos teores de substituição aceleram a hidratação do $C_3S$ devido a pontos adicionais de nucleação do C-S-H	Lapeyre e Kumar (2018)
EGAF	Hidraulicidade latente	Reduz a velocidade de hidratação quando comparada à hidratação do cimento	Taylor (1997)
	Hidraulicidade latente + $Ca(OH)_2$ como ativador	Acelera o processo de hidratação	
FC	Substituição < 35%	Aumenta velocidade de hidratação do cimento e grau de hidratação	Almeida et al. (2019)

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2021).

### 5.3.2 Calor de Hidratação

Muitos dos MCS disponíveis utilizados como substituição ao CP promovem uma redução no calor de hidratação liberado durante a hidratação do  $C_3S$ , em decorrência da diminuição da quantidade de cimento do compósito. Mesmo que a reação entre os MCS pozolânicos e os subprodutos liberados na hidratação do cimento seja caracterizada por uma reação exotérmica, o calor liberado é relativamente baixo quando comparado ao liberado pela hidratação do  $C_3S$  contido no cimento, além de ocorrer posteriormente à hidratação inicial do  $C_3S$  à medida que as reações exotérmicas diminuem gradativamente (PARIS et al., 2016).

A Tabela 5.3 apresenta como os percentuais de substituição dos MCS afetam a dinâmica do calor de hidratação.

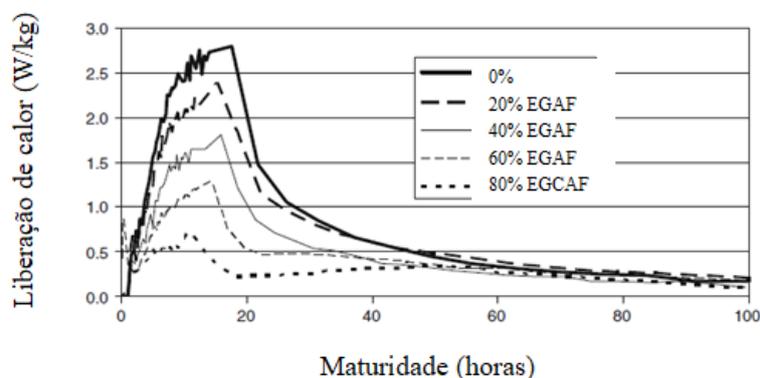
Tabela 5.3 - Resumo da influência dos MCS no calor de hidratação

MCS	Relação	Influência verificada		Referência
EGAF	Aumento % substituição	Reduz	Liberação de calor	Ballim e Graham (2009)
CV	Aumento % substituição	Reduz		
SA	Substituição 15%	Aumenta		
CCA	Substituição 30%	Reduz		Mehta e Pirtz (1978)
FC	Substituição < 35%	Aumenta		Almeida et al. (2019)

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2021).

Ballim e Graham (2009) avaliaram a influência da EGAF, CV e SA no calor de hidratação de concretos e os resultados obtidos durante o estudo, para incorporação da EGAF são apresentados na Figura 5.1. Para as substituições de EAGF foram observadas reduções nos picos de liberação de calor à medida que a taxa de substituição aumenta.

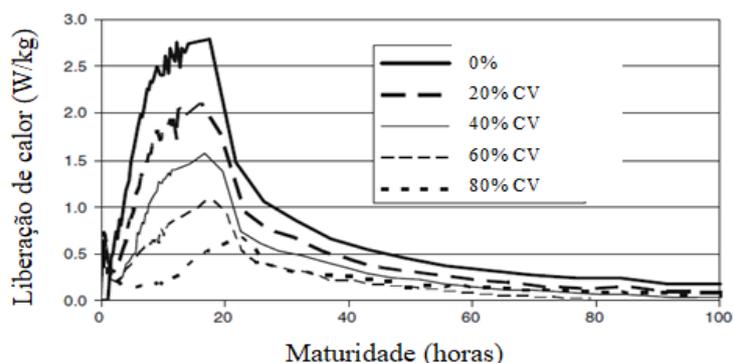
Figura 5.1 - Taxa de liberação de calor em concretos com substituição de EGAF.



Fonte: Adaptado de Ballim e Graham (2009).

Para incorporação de CV, os resultados são verificados na Figura 5.2, que assim como observado no comportamento da EGAF, a substituição por CV também promove reduções nos picos de liberação de calor, medida que a taxa de substituição aumenta.

Figura 5.2 - Taxa de liberação de calor em concretos com substituição de CV.

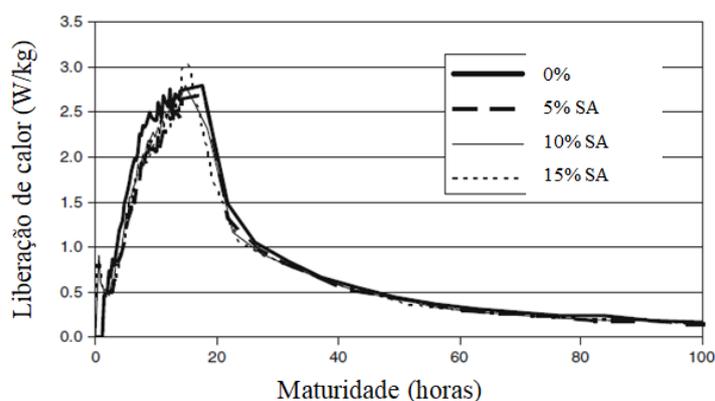


Fonte: Adaptado de Ballim e Graham (2009).

Essa redução é mais acentuada para substituições de CV, quando comparada a EGAF. A diminuição da liberação de calor observada nas amostras pode ser relacionada à diminuição da quantidade de cimento hidratado, levando a diminuição da liberação de calor à medida que a porcentagem de substituição aumenta.

Já os valores obtidos para as amostras com substituição por SA, são apresentados na Figura 5.3. As amostras não apresentaram grandes variações, chegando a um breve aumento no pico de liberação de calor para amostras com 15% de substituição após 15h de hidratação. O comportamento observado nas amostras com substituição por SA pode estar relacionado à aceleração da hidratação causada pela elevada superfície específica da SA, onde mesmo com a diminuição da quantidade de cimento, ocorre a formação de pontos de nucleação na superfície das partículas de SA estimulando o processo de hidratação do cimento.

Figura 5.3 - Taxa de liberação de calor em concretos com substituição de SA.



Fonte: Adaptado de Ballim e Graham (2009).

Mehta e Pirtz (1978), após observarem o melhor desempenho em relação à diminuição do calor de hidratação, proporcionado pela CCA, quando comparada por exemplo a substituições por SA, propuseram a substituição do CP por CCA, em teores mínimos de 30%, ao buscar-se a produção de concreto massa. Contudo, segundo Silveira (2007), o uso de altos teores atualmente é contestado por diversas pesquisas, visto que teores de CCA superiores a 15% passam a ter influência no aparecimento da reação álcali-sílica, provocando a expansão do concreto. Souza (2003) e Cordeiro (2008) destacam que o decréscimo do calor liberado depende ainda da situação utilizada e da variabilidade do MCS.

Almeida et al. (2019) verificou um aumento na taxa de liberação de calor para amostras com substituição de CP por FC. Durante o estudo foi observado um aumento no pico de liberação de calor à medida que a taxa de substituição também foi aumentada. Esse aumento chegou a 26% para substituição de 35% de CP. Bentz et al. (2017) atribui este comportamento a maior disponibilidade de superfície para precipitação de produtos iniciais, além de uma menor cobertura das fases aluminatos com produtos de hidratação do cimento que permite a renovação da hidratação.

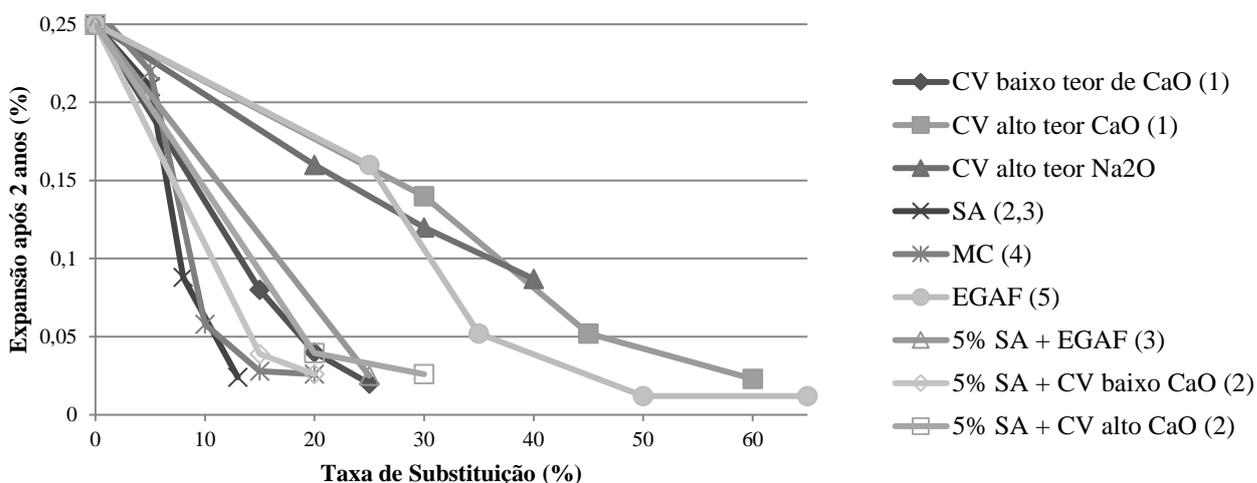
### 5.3.3 Reação Álcali-Agregado

De acordo com Hasparyk (2005), a RAA que ocorre lentamente na matriz cimentícia embora tenha sido descoberta há mais de 70 anos, ainda não possui uma solução eficiente de controle das expansões quando iniciadas, existindo apenas medidas preventivas, ou mitigadoras, que devem ser tomadas com a finalidade de evitar ou reduzir os efeitos da reação química. Dentre as medidas preventivas destaca-se o controle do teor de álcalis, que consiste em evitar o uso de cimentos com alto teor de Na e K ao empregar agregados reativos (ASTM C 150, 2020). No entanto, apenas controlar ou limitar o teor de álcalis não garante a mitigação ou o desencadeamento da RAA. O uso de adições minerais é uma possibilidade de mitigar a RAA, cujo principal benefício se dá pelo desenvolvimento de reações pozolânicas. Mesmo havendo a reação pozolânica, existem pozolanas que não inibem a RAA, levando a crer que seus benefícios possam estar associados a outros fatores, como as suas características químicas e físicas, além dos teores de substituição de cada material (SILVEIRA, 2007; ZERBINO et al. 2015).

Autores estudando o comportamento de concretos com incorporações de MCS diante da reação álcali-sílica, levantaram informações relacionadas à expansão dos compósitos após 2 anos de idade, que são apresentadas na Figura 5.4. A redução na expansão dos compósitos é

claramente influenciada pelo aumento na taxa de substituição, como no caso da CV de alto teor de  $\text{Na}_2\text{O}$ , EGAF e CV de alto teor de  $\text{CaO}$ . As amostras apresentaram redução da expansão, para taxas de substituição mais elevadas, comportamento este que pode estar relacionado aos teores de álcalis presentes nos materiais se comparadas às características mineralógicas dos materiais de melhor comportamento. Já as amostras com SA, MC, CV com baixo teor de  $\text{CaO}$ , 5% SA + EGAF, 5% SA + CV com baixo teor de  $\text{CaO}$  e 5% SA + CV com alto teor de  $\text{CaO}$  apresentaram as maiores reduções para menores taxas de substituição quando comparadas à referência, indicativo este que as reações pozolânicas podem ter tido maior influência sobre RAA.

Figura 5.4 - Expansão de concretos com substituição de cimento por MCS.



Fonte: Adaptado de (1) Shehata et al. (1999), (2) Shehata e Thomas (2002), (3) Bleszynski (2002), (4) Ramlochan et al. (2000), (5) Thomas e Innis (1998).

Duchesne e Berube (2001) avaliando o comportamento frente à RAA em amostras de 9 anos de idade observou que amostras contendo substituição de 40% de CV e 50% de EGAF apresentaram menores valores de expansão mesmo quando comparadas a cimentos com baixo teor de álcalis. Chappex e Scrivener (2012) verificaram que os materiais pozolânicos ricos em aluminossilicatos, como o MC e CV, apresentam potencial mitigador e bom desempenho frente às reações expansivas da RAA, se comparados aos materiais compostos basicamente por sílica, como a SA. Rozière (2009), estudando CV e EGAF, levanta a hipótese que a causa da expansão pode estar relacionada à entrada de íons sulfato provenientes da lixiviação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , onde a redução do  $\text{C}_3\text{S}$  presente no cimento através de substituição por MCS pode levar a diminuição

da formação de etringita e gesso, conseqüentemente resultando na diminuição da expansão dos compósitos.

O teor de álcalis presentes nas amostras e o volume de MCS utilizados são fatores que governam o comportamento da expansão dos compósitos contendo MCS, onde a redução da expansão está ligada a diminuição da disponibilidade de álcalis livres na água presente nos poros da pasta de cimento, que se mostrou menor nas amostras com substituição por MCS quando comparadas ao controle. Khan e Siddique (2011), destacam ainda que a utilização de combinações entre dois MCS também vem sendo estudada e tem se mostrado muito eficiente na prevenção da deterioração devido à RAA.

A Tabela 5.4 apresenta um resumo das principais influências verificadas no estudo realizado, sobre como a expansão se comportam de acordo com os MCS.

Tabela 5.4 - Resumo da influência dos MCS na RAA

MCS	Relação	Influência Verificada	Referência
SA	Teor de álcalis e Reação pozolânica	Reduz a expansão em menores taxas de substituição	Shebata e Thomas (2002)
5% SA + EGAF			Bleszynski (2002)
5% SA + CV com baixo teor de CaO			Shebata e Thomas (2002)
5% SA + CV com alto teor de CaO			Shebata e Thomas (2002)
CV com baixo teor de CaO			Shebata et al (1999)
CV com alto teor de CaO		Reduz a expansão em maiores taxas de substituição	Shehata et al. (1999)
CV com alto teor de Na <sub>2</sub> O			
CV	Substituição 40%	Reduz a expansão	Duchesne e Berube (2001)
	Diminuição da alcalinidade na solução dos poros	Aumenta o potencial mitigador	Chappex e Scrivener (2012)
EGAF	Teor de álcalis	Reduz a expansão em maiores taxas de substituição	Shehata et al. (1999)
	Substituição 50%	Reduz a expansão	Duchesne e Berube (2001)
MC	Diminuição da alcalinidade na solução dos poros	Aumenta o potencial mitigador	Chappex e Scrivener (2012)
	Teor de álcalis e reação pozolânica	Reduz a expansão	Ramlochan et al. (2000)

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2021).

## **5.4 Influência dos MCS nas Propriedades dos Compósitos no Estado Fresco**

Diversos estudos presentes na literatura apontam para a granulometria como uma das principais características dos MCS na influência sob a demanda de água, uso de superplastificantes, trabalhabilidade e densidade dos compósitos cimentícios. Porém é importante ressaltar que outros fatores relacionados à composição dos materiais devem ser considerados. Diante do exposto, serão apresentados, comparados e discutidos resultados encontrados na literatura sobre como a granulometria e os demais aspectos influenciam nestas propriedades.

### **5.4.1 Demanda de Água e Trabalhabilidade**

Segundo Mehta e Monteiro (2008), embora a incorporação de MCS nas matrizes cimentícias tenda a melhorar a coesão e a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, muitos não possuem a capacidade redutora de água. Para se atingir uma determinada consistência dos compósitos, o uso de materiais com elevada superfície específica, como as pozolanas de alta reatividade, por exemplo, resulta no aumento da demanda de água e de aditivos superplastificantes. A Tabela 5.5 apresenta a influência dos MCS estudados na demanda de água, no uso de aditivos superplastificantes e na trabalhabilidade dos compósitos cimentícios.

Bezerra et. al (2011) e Habeeb e Mahmud (2010), observaram que, com o aumento da taxa de substituição e da finura do material, há a necessidade do aumento no uso de superplastificante e da quantidade de água. Os comportamentos observados pelos autores podem ser atribuídos à elevada superfície específica das partículas da CCA, que passa a absorver maior quantidade de água à medida que a área superficial das partículas aumenta. Segundo Moyad e Hana (1984), embora o aumento da porcentagem de CCA eleve a demanda de água, ainda é possível reduzir a quantidade de água necessária para se atingir a trabalhabilidade desejada através da diminuição da granulometria, se comparada a um mesmo volume de substituição. Este comportamento também é evidenciado por Mehta (2004), onde o efeito de preenchimento dos vazios, pelas partículas de CCA também é responsável por reduzir a demanda de água necessária para a plastificação do sistema. Isso ocorre devido à absorção das partículas de CCA pela superfície opostamente carregada das partículas de cimento, prevenindo a floculação das partículas, possibilitando atingir uma redução no acréscimo necessário de água em valores acima de 20%, onde as partículas de cimento se dispersam e absorvem mais facilmente a água.

Souza (2003) verificou que, para relações a/c com adição de MC abaixo de 0,25, os valores empregados de aditivos encontraram-se dentro do recomendado pelos fabricantes. Para relações acima de 0,25 foi observado um aumento significativo no teor de aditivo à medida que a porcentagem de substituição por MC aumenta. Para relação a/c de 0,35 e teores de substituição de 10 e 20% por MC, o autor observou um aumento no teor de aditivo de 85% e de 164% respectivamente, quando comparado ao traço de referência. Ainda se tratando do MC, Caldarone et al. (1994) observou que as adições de MC apresentam menor consumo de superplastificantes em relação aos concretos com adições de SA, chegando a reduções entre 25% e 35% no consumo do aditivo. El-Diadamony (2018), também avaliando o efeito da incorporação de MC, pôde observar um aumento na demanda da água de amassamento para substituições de 10% e uma diminuição para taxas de 20% de substituição do CP por MC.

Khayat e Aitcin (1993) e Mazloom et al. (2004) reportaram que adições de 10% de SA em concretos magros reduzem a demanda de água, porém para estruturas normais de concreto, mesmo adições de 5% aumentam a demanda de água para valores de trabalhabilidade constantes. Já para concretos de alto desempenho, com até 10% de SA, é necessário a utilização de superplastificantes para se atingir a trabalhabilidade desejada, uma vez que a elevada superfície das partículas de SA absorve parte do superplastificante utilizado.

Scolaro e Rocha (2021), avaliando o efeito da natureza de fíleres no desempenho mecânico, verificaram a possibilidade de incorporação de até 20% de FC e FB sem comprometimento da trabalhabilidade em comparação com o controle. Magalhães (2007), também verificou que os concretos com adição de escórias apresentaram IC similares ou maiores aos dos concretos de referência, para uma mesma relação a/c, indicando que a incorporação da EGAF não acarretou redução da trabalhabilidade. Já Krishna e Sandeep (2016), estudando a substituição de CP pela CCA observou um aumento na trabalhabilidade em 90% para substituições de até 20% em relação à referência. À medida que as partículas diminuem, o contato entre si aumenta, diminuindo a fluidez da pasta. O aumento acentuado na viscosidade plástica encontrado pelos autores destaca a grande influência da finura e forma das partículas da CAA nas matrizes cimentícias. Além disso, Nedhi et al. (1998) aponta que à medida que as partículas apresentam formas menos esféricas, ocorre o aumento na viscosidade plástica para um mesmo volume de substituição.

Alves e Martins (2017), observaram uma melhora na trabalhabilidade do concreto à medida que a CBC é acrescentada, chegando à um aumento de até 75% na trabalhabilidade para uma taxa de substituição de 50%. Este comportamento pode ser justificado pelo elevado

potencial de absorção da CBC devido ao teor de carbono presente no material, de extrema finura, que torna o concreto mais seco. Silva (2009) esclarece que materiais com altos níveis de carbono necessitam de uma maior quantidade de água para alcançar a mesma consistência do concreto convencional. O trabalho de Blatt (2018) sugere que quando há uso de cinzas no concreto deve-se também fazer uso de aditivos químicos com a finalidade de obter o abatimento desejado do concreto, garantindo que sua resistência seja elevada.

Tabela 5.5 - Resumo da influência dos MCS na demanda de água, superplastificante e trabalhabilidade.

<b>MCS</b>	<b>Relação</b>	<b>Influência Verificada</b>	<b>Referência</b>
CCA	Aumento da superfície específica	Aumenta a relação a/c	Bezerra et. al (2011)
	Aumento % substituição e superfície específica	Aumenta a demanda de superplastificante para a/c constante	Habeeb e Mahmud (2010)
	Redução de granulometria	Reduz o acréscimo de água	Moyad e Hana (1984)
	Efeito fíler	Reduz a demanda de água	Mehta (2004)
	Substituição < 20% + superfície específica	Aumento de até 90% na trabalhabilidade	Krishna e Sandeep (2016)
MC	Relação $a/(c + \text{adição de MC}) > 0,25$	Aumenta o teor de aditivo superplastificante	Souza (2003)
	Aumento da superfície específica	Aumenta a demanda de água	Caldarone, Gruber e Burg (1994)
	Substituição < 10%		El-Diadamony (2018)
	Substituição < 20%	Reduz a demanda de água	
	Aumento da superfície específica	Altera a reologia dos compósitos no estado fresco e confere propriedades especiais relacionadas à durabilidade e desempenho mecânico no estado endurecido	Cunha et al (2010)
	Melhora os aspectos reológicos e a distribuição granulométrica		
SA	Substituição 10%	Reduz a demanda de água para concreto magro	Khayat e Aitcin (1993); Mazloom et al. (2004)
	Substituição 5%	Aumenta a demanda de água para concreto normal	
	Aumento da superfície específica	Aumenta a demanda de água	Caldarone, Gruber e Burg (1994)
FC/FB	Substituição < 20%	IC igual ou maior que o controle	Scolaro e Rocha (2021)
EGAF	IC	IC igual ou maior que o controle	Magalhães (2007)
CBC	Substituição 50%	Aumento de até 75% na trabalhabilidade	Alves e Martins (2017)

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2021).

Através dos resultados observados pelos autores é perceptível que o aumento na demanda de aditivo superplastificante, assim como o aumento da demanda de água, está diretamente atrelado à alta reatividade, elevada superfície do material e sua estrutura amorfa. Como exemplo, os autores ao comparar materiais com superfícies específicas diferentes, como o MC e SA, verificaram que a demanda de aditivo foi maior para a SA, que apresenta maior superfície específica quando comparada ao MC. Já para a diminuição na demanda de água, verificada por El-Diadamony (2018), o efeito pode estar relacionado a diluição do CP. Já o ganho de trabalhabilidade observado pelos autores, pode ser atribuído à granulometria do material, que atua no preenchimento dos espaços gerados pelas partículas de cimento, diminuindo a força de atrito, lubrificando as partículas, melhorando o efeito de preenchimento e assim diminuindo o limite elástico do concreto. É válido ressaltar que o aumento da trabalhabilidade não remete à características ideais de utilização dos compósitos cimentícios, uma vez que a trabalhabilidade é governada pelas condições impostas pela utilização

## **5.5 Influência dos MCS nas Propriedades dos Compósitos no Estado Endurecido**

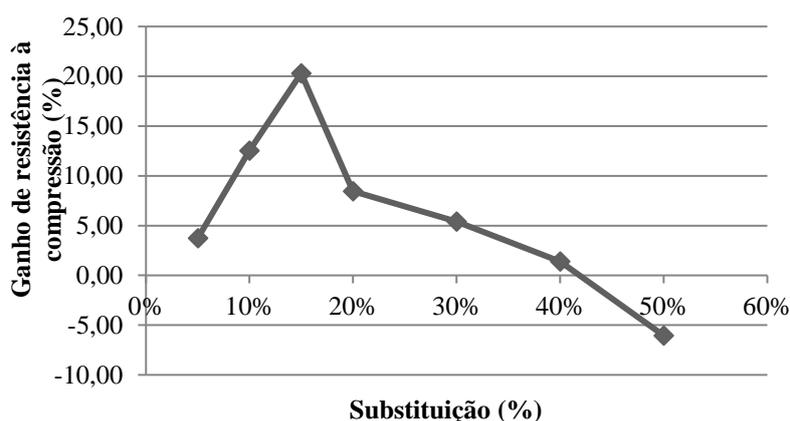
Os principais mecanismos de análise, responsáveis pelo desenvolvimento das propriedades mecânicas dos compósitos proporcionado pela incorporação dos MCS, podem ser caracterizados pela reação pozolânica e pela reação dos materiais de hidraulicidade latente. Mesmo que toda a parcela de substituição do material não apresente reação devido a indisponibilidade do  $\text{Ca(OH)}_2$  na mistura, as partículas inertes dos MCS ainda podem contribuir na resistência através do efeito fíler. Outro aspecto importante a ser levado em consideração na avaliação dos compósitos no estado endurecido é a durabilidade, esta governada por características como porosidade e permeabilidade. Logo serão apresentados resultados que apontam como os MCS influenciam nesses aspectos.

### **5.5.1 Resistência à Compressão**

O ensaio de resistência à compressão é amplamente utilizado em pesquisas que buscam analisar a influência dos MCS nas propriedades mecânicas, além de ser a principal propriedade conferida pelos compósitos cimentícios às estruturas. A seguir serão apresentadas as principais influências observadas por diversas pesquisas presentes na literatura, se tratando da resistência à compressão, após incorporação de MCS nas matrizes cimentícias em taxas e condições variáveis.

Habeeb e Mahmud (2010), estudando o efeito do CCA em substituição ao CP em taxas de 5%, 10%, 15% e 20% observaram que para as primeiras idades as resistências foram muito semelhantes à amostra de controle. Aos 28 dias as amostras com 10% de substituição apresentaram um acréscimo significativo na resistência à compressão, chegando a superar em até 30% a resistência do controle. Outros autores como Krishna et al. (2016) e Bezerra (2011) também obtiveram aumento no desempenho mecânico para compósitos com adição do material, onde nas primeiras idades o ganho de resistência foi semelhante ao das amostras de controle, enquanto que, para idades mais avançadas, o ganho de resistência se mostrou superior na maioria dos estudos. Chao-Lung et al. (2011), ainda indicam ser vantajosa a substituição parcial do cimento por CCA em até 20% sem afetar de forma negativa a resistência e propriedades de durabilidade do concreto. Martins (2018), avaliando o ganho de resistência em argamassas, observou um acréscimo de resistência para substituições até 15% de CP por CCA, aos 28 dias, conforme apresentado na Figura 5.5. A partir de 15% de substituição verifica-se um declínio no ganho de resistência, mantendo-se superior ao controle até o percentual de 40% de substituição.

Figura 5.5 - Influência da substituição de CCA no ganho de resistência de argamassas aos 28 dias a/c=0,52



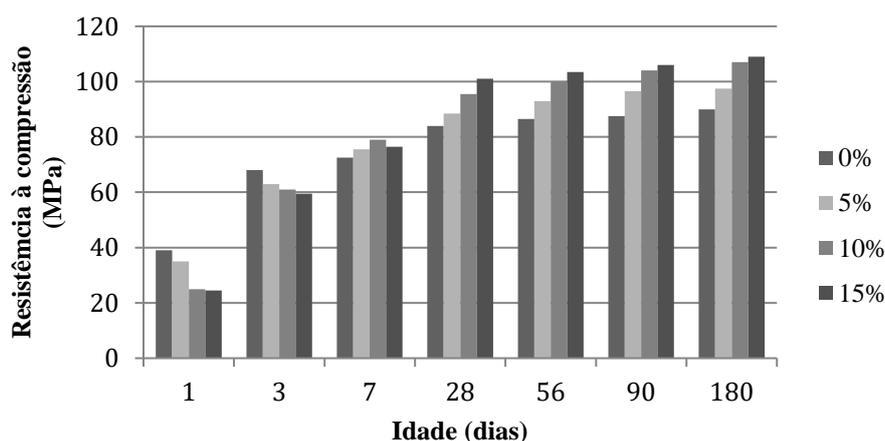
Fonte: Adaptado de Martins (2018).

O incremento ou manutenção da resistência observado pelos autores pode ser relacionado à reação pozolânica da sílica presente na CCA, do teor disponível de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e também ao efeito microfíler, quando utilizadas cinzas com granulometria mais fina. Já a influência negativa na resistência à compressão para substituições acima de 20% de CP por CCA pode ser atribuída ao aumento da demanda de água e consequentemente ao aumento da

necessidade do uso de plastificantes, podendo acarretar efeitos adversos no concreto por atuar como retardador. Além disso, a diminuição da quantidade de cimento leva a uma queda na disponibilidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido durante a reação de hidratação, não sendo suficiente para reagir com a sílica disponível pela adição de CCA e com isso fazendo com que a sílica atue como material inerte, não contribuindo para o ganho de resistência.

Bentur et al. (1987) ao relacionar a resistência à compressão de argamassas e concretos contendo SA, aos 28 dias, com teor de água de 0,33 teve um aumento aproximado de 37,9% na resistência à compressão. Wong e Razak (2005) estudando a resistência a compressão de concreto contendo SA, com teores de substituição de 5%, 10% e 15%, obteve os resultados apresentados na Figura 5.6. O autor verificou que as adições não promovem um ganho de resistência imediato, apresentando melhorias, em relação às amostras de controle, somente a partir de 7 dias de cura. Já após 90 dias as amostras com substituição de 10% alcançaram um aumento médio na resistência de 17%. A influência do tempo de cura no desenvolvimento da resistência é claramente observada no período entre 3 e 28 dias de idade, onde o ganho de resistência é evidenciado nas amostras com maior teor de substituição.

Figura 5.6 - Resistência à compressão de concretos com adição SA para fator  $a/c = 0,27$ .



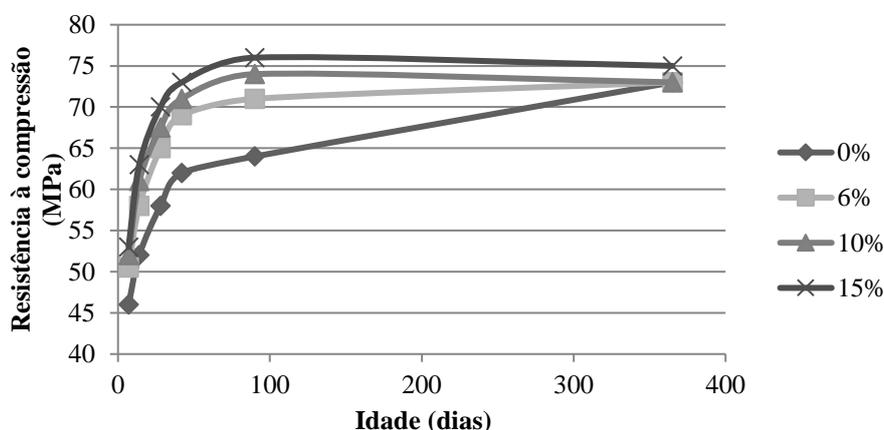
Fonte: Adaptado de Wong e Razak (2005).

Behnood e Ziari (2008) ao avaliar a resistência de compósitos com adição de SA, em teores de 6% e 10%, obtiveram um aumento de 19% a 25% na resistência e ainda complementam que as amostras ao serem submetidas a elevadas temperaturas apresentam grandes perdas de resistência. Esse comprometimento da resistência pode estar aliado à dilatação e a retração dos materiais quando expostos a elevadas temperaturas, uma vez que

enquanto o concreto contrai os agregados se expandem, levando ao enfraquecimento da interface de transição e da ligação entre os agregados e a pasta cimentícia. Os autores destacam ainda que, quando submetidas a elevadas temperaturas, as partículas ultrafinas da SA atuando como fíler formam uma zona de transição muito densa, interferindo nas ligações entre os agregados e a pasta.

Mazloom et al. (2004) também avaliou o comportamento de concretos com substituição de cimento por SA e obteve os resultados de resistência à compressão apresentados na Figura 5.7. Pode-se verificar que para os percentuais de substituição de CP por SA a resistência dos concretos nas primeiras idades foi superior em relação ao controle. Dentre as substituições, a amostra com percentual de 15% de substituição mostrou-se a mais promissora.

Figura 5.7 - Resistência à compressão de concretos com incorporação de SA



Fonte: Adaptado de Mazloom et al. (2004).

Destaca-se pelos resultados obtidos o comportamento das amostras com substituição, quando comparadas ao controle, onde a taxa de ganho de resistência até os 90 dias se mostrou significativamente maior, enquanto as amostras de controle só atingiram valores de resistência relativamente próximos ao das amostras com substituição após 300 dias de idade.

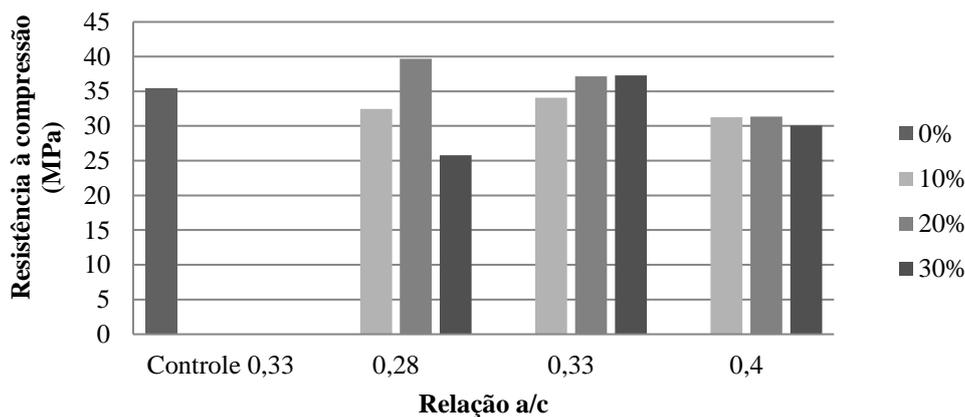
Paula (2009) estudando o potencial da CBC como material de substituição parcial de CP em teores de substituição de 10%, 20% e 30% identificou que do ponto de vista da resistência à compressão, substituições de até 20% do cimento pela CBC não apresentaram prejuízo à resistência. Já Nunes (2009) avaliando as características físicas e químicas da CBC em compósitos, observou que os maiores acréscimos de resistência ocorreram após três dias de cura, para substituições de 5% e 15%, porém para substituições acima de 15% foi observado um decréscimo na resistência, quando comparado ao controle, indicativo de que para as

primeiras idades esse acréscimo somente ocorreu em decorrência do efeito fíler. Os resultados encontrados pelos autores indicam uma faixa mais adequada para substituições de CBC, entre 10% e 15%, sem prejuízo para resistência dos compósitos, uma vez que para substituições acima desse percentual a manutenção da resistência não é garantida. Paula (2009) ainda salienta que a obtenção de cinzas com maiores teores de sílica reativa, principalmente por meio de procedimentos de queima melhor ajustados, pode permitir maiores teores de substituição ou melhorias mais significativas nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

Lacerda e Helene (2005), estudando a influência da substituição de CP por MC, em teores de 8% e relação a/c de 0,5, observaram valores de resistência à compressão 21% maiores que a amostra de referência. Caldarone et al. (1994) verificou, em concretos com substituição de 5% e 10% de cimento por MC, e relação a/c de 0,38 e 0,36, resistências à compressão da ordem de 42,5% e 53,7%, respectivamente, acima dos valores obtidos para o concreto de referência, aos 28 dias. O aumento verificado pelos autores possivelmente está associado ao efeito isolado da relação a/c com MC, uma vez que os valores de ganho de resistência à compressão vão diminuindo conforme aumenta-se os valores da relação a/c. Essa redução é justificada pela maior relação a/c utilizada a qual proporciona o aumento da porosidade das amostras.

Couto (2010), avaliando a influência da substituição de 35% de CP por EGAF nas propriedades de argamassa e concretos verificou uma redução de 31,7% na resistência à compressão para argamassas e uma redução de 26,6% na resistência para concretos quando comparados às amostras de referência. Witzke et al. (2019), estudando compósitos de CP com adição de CV com diferentes percentuais de substituição e relações a/c, obteve resultados para resistência à compressão que são apresentados na Figura 5.8. O autor verificou que as amostras contendo taxa de substituição de 20% e relação a/c iguais a 0,28 e 0,33, obtiveram os melhores resultados, apresentando valores de resistência à compressão superiores ao controle. Já para relação a/c de 0,4, todas as substituições apresentaram resistências inferiores ao controle. Em relação às amostras com 10%, todas apresentaram resistências inferiores ao controle para todas as relações a/c.

Figura 5.8 - Resistência compressão de concretos com adição de CV

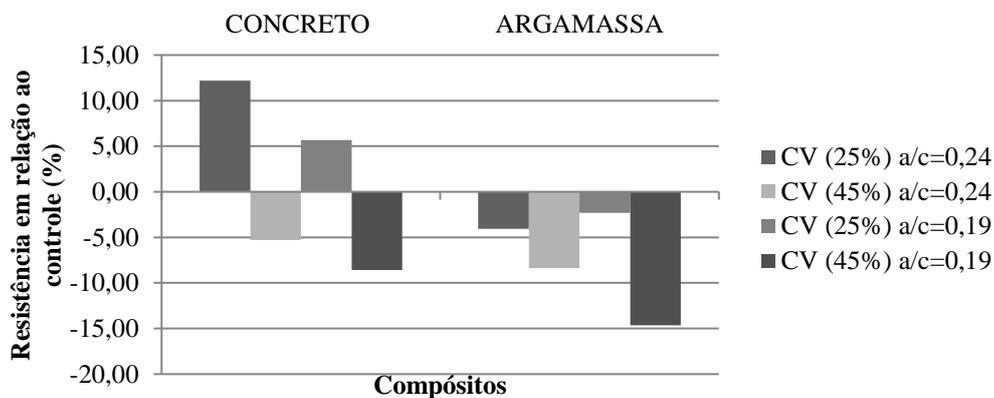


Fonte: Adaptado de Witzke (2018).

Observa-se que as amostras com 20% de substituição sofreram uma queda na resistência ao se elevar a relação a/c, enquanto que as amostras com 30% de substituição apresentaram um aumento, indicando a influência da relação a/c no desenvolvimento da resistência, o que leva à necessidade de realizar ajustes por meio de testes de modo a analisar qual combinação proporciona melhor desempenho.

Poon et. al (2000) também estudando compósitos com adição de CV, verificou que no caso das argamassas a CV não apresenta percentual de ganho em relação ao controle, para nenhuma das combinações entre teor de substituição e relação a/c. Já em relação ao concreto, para substituição de 25% e relações a/c de 0,24 e 0,19, o ganho de resistência percentual foi de aproximadamente 12% e 6% em relação as amostras de controle, conforme Figura 5.9.

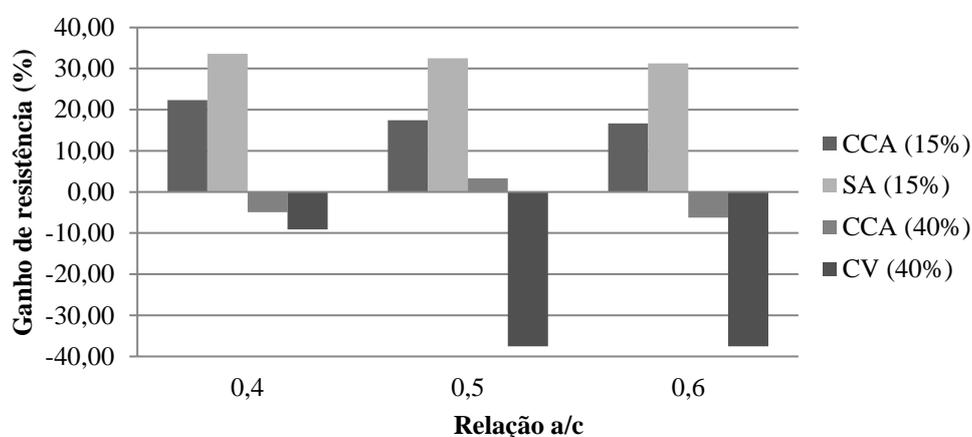
Figura 5.9 - Ganho de resistência de compósitos com adição de CV de baixo teor de cálcio aos 28 dias



Fonte: Adaptado de Poon et. al (2000).

Santos (1997) estudando CV, SA e CCA verificou ganho de resistência para CCA e SA com substituição de 15% para todos os teores de a/c estudados. Para substituições de 40%, a CCA e CV apresentaram perda de resistência em todos os teores de a/c, com exceção da amostra de CCA com teor a/c de 0,5, como pode ser verificado na Figura 5.10.

Figura 5.10 - Ganho de resistência percentual em relação ao controle para CV, SA e CCA.



Fonte: Adaptado de Santos (1997).

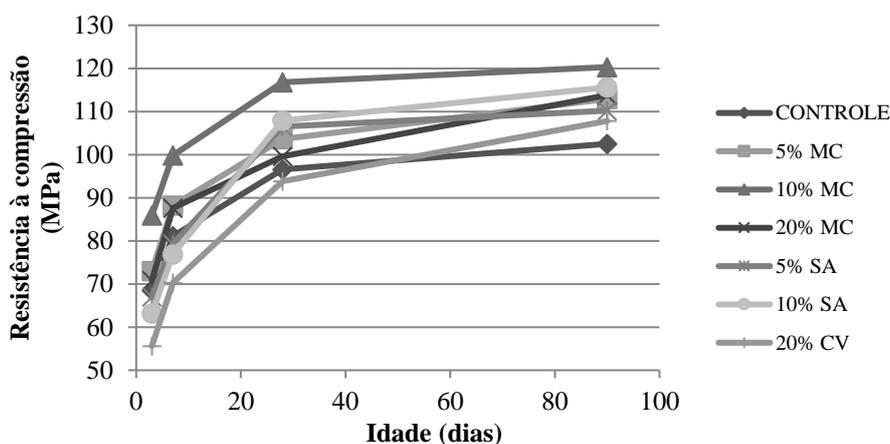
Independente da relação a/c, taxas de substituição de 40% por CV proporcionaram menores resistências à compressão quando comparadas ao controle, fato este que pode estar atrelado à baixa quantidade de cimento na mistura. As amostras com 40% de substituição por CCA apresentaram queda na resistência, porém um ganho foi observado para relação a/c de 0,5, o que pode estar ligado a uma melhor taxa de absorção de água das partículas de CCA favorecendo a hidratação das partículas de cimento mesmo em menores quantidades. Este comportamento evidencia como o teor de a/c e de substituição são fatores intervenientes e de grande importância no estudo da resistência de compósitos com substituições de MCS, sejam eles quais forem. Já as substituições de CP em taxas de 15% por CCA e SA não sofreram mudanças significativas no ganho de resistência.

El-Diadamony (2018), estudando pastas com substituição de cimento por MC, observou maiores valores para resistência à compressão em amostras com 5% quando comparados às amostras de referência e outras amostras de cimento pozolânico. Porém, para substituições entre 10% e 20% não foram observadas diferenças significativas no ganho de resistência entre as amostras. À medida que as taxas de substituição ultrapassam os 20%, a resistência à compressão passa a sofrer uma queda. O ganho observado pelo autor para

substituições de 5% pode estar relacionado à formação de pontos de nucleação proporcionados pelo MC, acelerando a hidratação do CP. Já a queda observada para substituições acima de 20% pode estar relacionada ao efeito de diluição do CP.

Poon et al. (2002) realizou estudos comparativos entre as influências promovidas pela incorporação de MC, SA e CV em compósitos cimentícios. Os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão são apresentados na Figura 5.11.

Figura 5.11 - Resistência à compressão de concretos com incorporação de MC, SA e CV.



Fonte: Adaptado de Poon et al. (2002).

Apenas as amostras com substituição por MC apresentaram resistência superior ao controle nas primeiras idades. Porém, entre o período de cura entre 7 e 28 dias, apenas as amostras com substituição por CV não apresentaram desenvolvimento da resistência superior ao controle. O ganho de resistência das amostras com CV só passou a ser superior ao controle após 50 dias de idade, fato este que evidencia o ganho de resistência nas idades mais avançadas. Se comparadas às amostras de mesma taxa de substituição, o MC se mostrou ser mais reativo, obtendo maior desenvolvimento de resistência. As amostras com substituição de 10% por MC apresentaram os maiores valores de resistência à compressão, porém as amostras com a mesma taxa de substituição por SA apresentaram a maior taxa de crescimento o que evidencia a grande reatividade destes materiais.

Já se tratando do FC, Almeida et al. (2019) avaliando o comportamento de argamassas com substituição de CP por FC, observou que substituições de 10% e 15% apresentaram maior desenvolvimento de resistência nas primeiras idades, atingindo valores de resistência à compressão aos 7 e 28 dias semelhantes aos das argamassas de referência. Já para teores de substituição de 25% e 35% de FC foi observado uma diminuição na resistência à compressão

em relação à todas as outras argamassas do estudo após 7 dias de cura, chegando a uma redução de 15% para as amostras com 25% de substituição e 30% para amostras com 35% de substituição. O aumento na resistência observado pelo autor nas primeiras idades pode ser atribuído à aceleração das reações de hidratação promovidas pelo FC, enquanto que a redução da resistência para maiores taxas de substituição pode estar relacionado à redução na quantidade de cimento presente na matriz.

Alguns pesquisadores ainda estudam novos materiais que geralmente são resíduos para avaliar como a incorporação influencia os aspectos de resistência da matriz cimentícia. É o caso do PV, CBM, COP e da CM. De acordo com os estudos, o PV em todos os percentuais de substituição afeta negativamente os aspectos de resistência. Em relação a incorporação de COP em teores de substituição menores que 50% e CM em teores de 5 e 20%, a resistência a compressão é mantida. Já a CBM, em substituições entre 10 e 20% apresenta acréscimo nos valores de resistência a compressão. A Tabela 5.6 a seguir apresenta um resumo das principais influências da incorporação dos MCS no ganho de resistências dos compósitos cimentícios analisadas neste trabalho.

Tabela 5.6 - Resumo das principais influências da incorporação dos MCS no ganho de resistências à compressão dos compósitos cimentícios.

MCS	Relação	Influência Verificada	Referência
CCA	Substituição 10% a 15%	Aumento da resistência à compressão	Habeeb e Mahmud (2010); Martins (2018); Santos (1997)
	Substituição < 20%	Vantajoso no ganho de resistência	Chao-Lung et al. (2011)
	Substituição 15% a 40%	Redução na taxa de ganho de resistência em relação ao controle	Martins (2018)
	Substituição > 20%	Pode acarretar problemas de durabilidade	Chao-Lung et al. (2011)
	Substituição > 40%	Redução da resistência à compressão	Santos (1997)
CBC	Substituição 5% a 15%	Ganho de resistência devido ao efeito fíler	Nunes (2009)
	Substituição < 20%	Ganho de resistência sem apresentar riscos	Paula (2009)
SA	Substituição 5% a 15%	Aumento da resistência à compressão	Bentur et al. (1987); Wong e Razak (2005); Behnood e Ziari (2008); Mazloom et al. (2004); Poon et al. (2002); Santos (1997)
MC	Substituição 5% a 20%	Aumento de resistência à compressão	Lacerda e Helene (2005); Caldarone et al. (1994)
		Ganho de resistência à compressão inicial	Poon et al. (2002)
CV	Substituição 20%	Aumento da resistência à compressão	Witzke (2018); Poon et al. (2002)
	Substituição 30% a/c = 0,4	Redução da resistência à compressão	Witzke (2018)
	Substituição 40%		Santos (1997)
	Substituição 45%		Poon et al. (2000)
EGAF	Substituição 35%	Redução da resistência à compressão de argamassas	Couto (2010)
		Redução da resistência à compressão de concretos	Couto (2010)
FC	Substituição 10% e 15%	Aumento da resistência à compressão	Almeida et al. (2019)
	Substituição 25% e 35%	Redução da resistência à compressão	
PV	Resistência mecânica	Redução da resistência à compressão, flexão e tração	Shayan e Xu (2006); Taha e Nounu (2008)
CBM	Substituição 10% a 20%	Aumento da resistência à compressão	Cheah e Ramli (2011); Rajamma et al. (2009)
COP	Substituição < 50%	Manutenção da resistência à compressão, flexão e tração	Altwair et al. (2012); Ranjbar et al (2014)
CM	Substituição 5% e 20%	Manutenção da resistência à compressão	Lertwattanakarn et al. (2012)

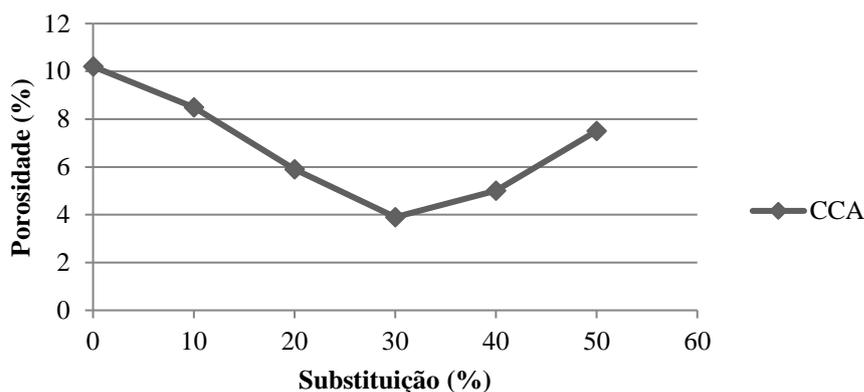
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2021).

### 5.5.2 Durabilidade

A durabilidade dos compostos cimentícios está sujeita à influência de diversos fatores como o fenômeno da carbonatação, ataques de sulfatos, permeabilidade a íons cloreto, todos estes diretamente relacionados à permeabilidade, além de danos sofridos pelo processo de corrosão em compósitos armados. Além disso, a taxa de absorção da água em contato com a superfície dos compósitos também apresenta grande importância para os aspectos relacionados à durabilidade. Desta forma, serão apresentados e discutidos dados da literatura sobre estes aspectos.

De acordo com Ramasamy (2019), a presença de CCA nas matrizes de concreto causa uma redução considerável no volume de poros para todas as idades de cura. El-Dakroury e Gasser (2008) avaliaram o comportamento da estrutura de poros de compósitos com substituição de CCA e obtiveram os resultados apresentados na Figura 5.12. A redução da porosidade é observada para taxas de até 30% de substituição, onde a partir deste valor a porosidade passa a aumentar novamente, porém ainda inferior às amostras de controle, o que evidencia a capacidade de redução da estrutura de poros proporcionada pela CCA.

Figura 5.12 - Comportamento da porosidade em relação ao percentual de substituição

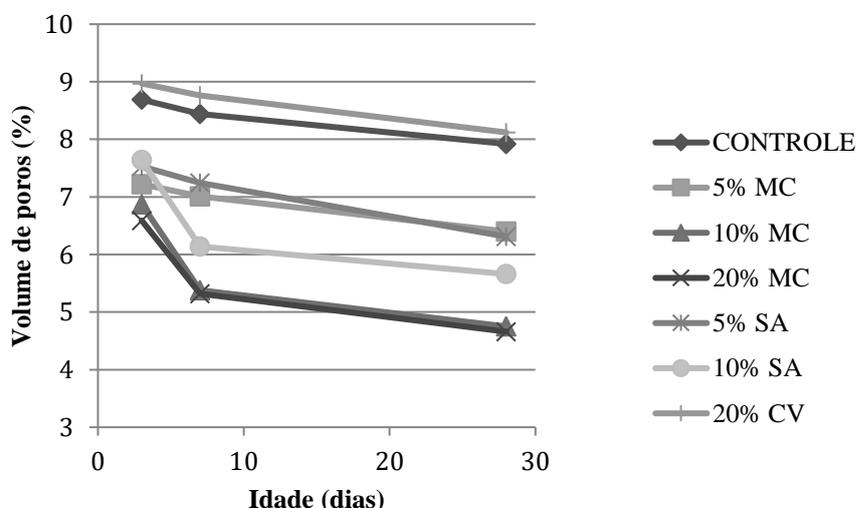


Fonte: Adaptado de El-Dakroury e Gasser (2008).

A redução da porosidade observada para taxas de substituição até 30% pode ser explicada devido ao efeito de preenchimento dos vazios e do refinamento da estrutura de poros proporcionado pela reação pozolânica. Já o aumento da porosidade para substituições à partir deste valor pode ser atribuída ao aumento na demanda de água necessária para proporcionar a hidratação e lubrificação necessária das partículas, comportamento já visto anteriormente, ocupando espaços que posteriormente se tornam vazios na estrutura.

Poon et al. (2002), estudando a utilização do MC como MCS, também realizou estudos comparando a porosidade de concretos com substituição de CP por MC, SA e CV, em taxas de 5%, 10% e 20% de MC, 5% e 10% de SA e 20% de CV. O MC utilizado no experimento apresentou área específica de 12 680 m<sup>2</sup>/kg e teor de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> igual a 97,1%. Para análise foi utilizado método de ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, e os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.13. O melhor resultado observado aos 28 dias foi da amostra de concreto com 20% de MC, porém, com exceção a CV, todas as amostras já apresentaram reduções no volume de poros aos 3 dias de idade. Os resultados de porosidade total, aos 28 dias, foram de 7,9% para o concreto de referência, 5,7% para o concreto com 10% de sílica ativa, 4,8% para o concreto com 10% de MC e 4,7% para o concreto com 20% de MC.

Figura 5.13 - Comparação do comportamento da porosidade de concretos com substituição de CP por MC, SA e CV.



Fonte: Adaptado de Poon et al. (2002).

Os resultados mostraram uma significativa redução na porosidade total nos concretos com adição mineral, exceto para a CV, comportamento este que pode ser atribuído ao preenchimento de vazios e refinamento da estrutura de poros proporcionado pelos materiais. Ao comparar os resultados das amostras de MC e SA, com 5% de substituição observa-se uma taxa de redução da porosidade constante para ambos os materiais. Já comparando as amostras com 10% de substituição, observa-se uma redução da porosidade nas primeiras idades. É possível observar também o melhor comportamento do MC, que pode ser explicado devido a sua superfície específica e alta reatividade, a qual podem favorecer a reação pozolânica e consequentemente proporcionar um maior refinamento dos poros. Se tratando do aumento da

porosidade para as amostras de CV, observa-se que com o aumento da substituição pode ocorrer um efeito reverso proporcionado pelo aumento na demanda de água no sistema, que promove a formação de vazios previamente ocupados pela água.

Se tratando do processo de carbonatação, sabe-se que as condições do ambiente em que os compósitos estão inseridos e o percentual de substituição de CP pelos MCS são os principais fatores a serem levados em consideração (OSBORNE, 1999). Sabe-se ainda que, quanto maior o teor de poros contínuos de um concreto, maior será sua frente de carbonatação, essa continuidade pode facilitar a percolação de  $\text{CO}_2$  na matriz e, por consequência, desencadear a reação com seus componentes (ATIS, 2004). Lima et al. (2009) avaliou traços de concreto com CBC em substituição ao agregado miúdo e concluíram que para um teor de 30% de CBC se obtém uma redução na profundidade de carbonatação do concreto, quando comparado ao seu respectivo traço de referência.

Sobre a influência da utilização de SA na profundidade de carbonatação, estudos realizados por Skjolsvold (1986) e Grimaldi et al. (1989) revelam que a utilização de SA promove um aumento na profundidade média de carbonatação, onde para dadas resistências à compressão e períodos de exposição à atmosfera, concretos com substituição apresentaram maiores profundidades quando comparados às amostras de referência. Grimaldi et al. (1989) complementa ainda que embora ocorra a diminuição da capilaridade entre os poros, contribuindo para a diminuição deste fenômeno, o aumento da carbonatação é atribuído a redução do pH causada pelas reações pozolânicas, que levam a redução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Já se tratando da resistência à sulfatos, autores como Brown et al. (2004) e Perraton et al. (1988) atribuem o aumento da resistência à diminuição da permeabilidade da matriz cimentícia com a substituição de MCS. Além disso, estudos realizados por Osborne (1999), envolvendo a substituição da EGAF na matriz de CP, mostram que a resistência também pode depender de critérios como o regime de cura, disponibilidade de  $\text{C}_3\text{A}$  no cimento, teor de alumina e o método de cura utilizado. As primeiras idades de cura dos concretos apresentam maior influência na resistência à sulfatos, da mesma forma que também influenciam outras propriedades dos compósitos cimentícios (OSBORNE, 1999).

Em relação a permeabilidade à íons cloreto, Anjos e Martinelli (2008) e Ganesan et al. (2007) verificaram em seus estudos que a incorporação de CBC aperfeiçoou as propriedades do concreto estudado, proporcionando redução na penetração de íons cloreto para até 20% de substituição. Perraton et al. (1988), ao avaliar os efeitos causados pela substituição de SA, em porcentagens de até 20% em massa de cimento, na permeabilidade à íons cloreto, pode

constatar uma significativa diminuição na difusão de íons com o aumento da substituição. Magalhães (2019) constatou que a utilização da EGAF em substituição ao CP permitiu que concretos com baixa e moderada resistência à penetração de cloretos, aos 28 dias, passassem a uma condição de alta resistência à penetração de cloretos, para os teores de adição de 30% e 60%. Güneyisi e Gesoğlu (2008) também indicam que, para substituições a partir de 50% de EGAF, os resultados mostram uma nítida redução nas cargas de teste para todas as condições de cura e idades. Para substituições de 70 e 80%, por exemplo, concretos ensaiados aos 90 dias sob cura submersa apresentaram excelente resistência à penetração de íons cloreto. Este comportamento observado pelos autores está diretamente relacionado à porosidade dos compósitos, onde, à medida que a taxa de substituição aumenta, preenchendo os vazios, a porosidade tende a reduzir, diminuindo assim a entrada de íons na matriz cimentícia (PLANTE; BILDEAU, 1989).

A influência da incorporação de MCS no desenvolvimento da corrosão em estruturas de concreto armado também vem sendo analisada por diversos autores. Güneyisi e Gesoğlu (2008), avaliando o comportamento à corrosão de barras de aço embutidas em compósitos com substituição de EGAF, submetidas a diferentes condições de cura, puderam constatar que, para dadas idades de cura, o tempo de fissuração das amostras devido à corrosão foi relativamente maior, quando comparado ao das amostras de controle, implicando em uma melhora na proteção da armadura. Com o aumento da substituição em até 80%, foi constatado um aumento no tempo de fissuração de até 52%, especialmente para amostras submetidas à cura úmida, o que reforça a importância da cura apropriada para concretos contendo elevados níveis de substituição por EGAF.

Khayat e Aitcin (1993) também realizaram estudos referentes ao comportamento de barras de aço sujeitas à corrosão em concretos com substituição de SA. Foi constatado que a camada passivadora do aço se torna instável quando o pH do compósito decai para valores próximos de 10 a 11 ou quando a camada entra em contato direto com íons cloreto. Embora a substituição de cimento por SA acarrete a diminuição do pH, através da diminuição do teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  devido às reações pozolânicas, foi constatado que a substituição causou pequenos efeitos na desestabilização da camada passivadora do aço, uma vez que o pH se manteve acima de 12 mesmo para substituições de 30% de SA. O coeficiente de difusão de cloretos, assim como o teor de cloreto nos compósitos, reduz significativamente na presença de SA. Além disso, a utilização da SA apontou para resultados que revelam um aumento significativo na resistividade elétrica de concretos, promovendo uma redução na taxa de corrosão. Ainda se

tratando do aumento da proteção de barras de aço diante da corrosão através do aumento da resistividade elétrica em compósitos com substituição de SA, Dotto et al. (2004) constatou acréscimos na resistividade de 2.5 vezes para substituições de 6% e de 5 vezes para substituições de 12% de SA, sugerindo a grande eficácia do uso de SA na proteção de armaduras contra corrosão.

Saraswathy et al. 2003 avaliou a durabilidade e resistência à corrosão para incorporações de CV ativadas e não ativadas. As CV ativadas tiveram um desempenho muito melhor do que as CV não ativadas, para adições de até 50%. Concretos contendo adições de até mesmo 10% de CV não ativadas, apresentaram maior resistência à corrosão quando comparadas ao controle. Este comportamento pode ser atribuído principalmente às pequenas partículas preenchendo os vazios interconectados e os vazios capilares, reduzindo a permeabilidade da pasta de cimento endurecido e retardando a entrada de soluções corrosivas. A Tabela 5.7 apresenta um resumo das principais influências dos MCS nos aspectos relacionados à durabilidade dos compósitos.

Tabela 5.7 - Resumo das principais influências dos MCS na durabilidade dos compósitos.

<b>MCS</b>	<b>Relação</b>	<b>Influência Verificada</b>	<b>Referência</b>
CCA	Diminuição da porosidade	Aumento da resistência à penetração de íons cloreto	Ramasamy (2019),
	Substituição < 30%	Refinamento da estrutura de poros	El-Dakroury e Gasser (2008)
CBC	Substituição < 20%	Aumento da resistência à penetração de íons cloreto	Anjos e Martinelli (2008) e Ganesan et al. (2007)
	Substituição 30%	Redução da profundidade de carbonatação	Lima et al. (2009)
SA	Substituição de CP	Aumento da profundidade de carbonatação	Skjolsvold (1986); Grimaldi et al. (1989)
	Substituição < 20%	Aumento de resistência à penetração de íons cloreto	Perraton et al. (1988)
	Substituição < 30%	Redução da taxa de corrosão Aumento da resistividade elétrica	Khayat e Aitcin (1993); Dotto et al. (2004)
EGAF	Substituição 30% e 60%	Aumento da resistência à penetração de íons cloreto	Magalhães (2019)
	Substituição > 50%		Güneyisi e Gesoğlu (2008)
MC	Substituição 0% a 20%	Aumento da porosidade	Poon et al. (2002)

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2021).

### 5.5.3 Absorção de Água

Bezerra (2011), avaliando a absorção de água verificou melhores comportamentos para substituições por CCA em até 15%, em relação à referência. Em contrapartida, Krishna e Sandeep (2016), obtiveram resultados que expressam o aumento da absorção à medida que a porcentagem de substituição por CCA também aumenta.

Se tratando das características de absorção de água em compósitos com substituição por EGAF, estudos realizados por Güneyisi e Gesoğlu, (2008), apontam a redução na absorção, quando comparados às amostras de referência, à medida que o teor de substituição e tempo de cura aumentam. Foi observado pelos autores que concretos contendo substituições de escória entre 50 e 80% apresentaram menores características de absorção, reduzindo a penetração de água por imersão total e ação de capilaridade, principalmente sob condições de cura úmida. Magalhães (2019), também avaliando a substituição parcial de CP por EGAF verificou reduções na absorção de água por capilaridade e pela redução da relação a/c em comparação com os concretos de referência.

Rezende et al. (2012), avaliando a absorção de água em blocos vazados de concreto com adição de MC, pode concluir que para percentuais variando de 10 a 20% da massa de cimento houve redução na absorção de água por imersão, com exceção aos ensaios que apresentaram redução na resistência a compressão, onde houve o aumento na absorção de água. Para todos os traços, pode-se concluir que o uso de MC em percentuais variando entre 10% e 20% da massa do cimento poderá promover redução na absorção de água por imersão.

Feltrin e Isaia (2018), estudando as propriedades de concretos com incorporação de FC, observaram que para amostras com substituição de 10% de CP por FC, e relações a/c de 0,50 e 0,65, os resultados não indicaram influências positivas sobre a absorção de água. Já a amostra com 10% de FC e relação a/c de 0,35 apresentou resultado semelhante às amostras com 15% substituição, teor este que apresentou os menores volumes de absorção para todas as relações a/c. O efeito de redução na absorção de água observado pelos autores pode ser associado ao efeito físico de preenchimento dos poros proporcionado pelo FC.

A Tabela 5.8 apresenta um resumo das influências dos MCS estudados sobre as características de absorção de água dos compósitos cimentícios.

Tabela 5.8 - Resumo das influências dos MCS estudados sobre as características de absorção de água dos compósitos cimentícios.

MCS	Relação	Influência Verificada	Referência
CCA	Substituição < 15%	Redução da absorção de água	Bezerra (2011)
	Aumento da substituição	Aumento da absorção de água	Krishna e Sandeep (2016)
EGAF	Aumento da Substituição e tempo de cura	Redução da absorção de água	Güneyisi e Gesoğlu, (2008)
	Substituição 50% a 80%	Absorção de água, penetração de água por imersão e ação de capilaridade sob cura úmida	
	Redução a/c	Redução da absorção por capilaridade	Magalhães (2019)
MC	Substituição 10% a 20%	Redução da absorção por imersão	Rezende (2011)
FC	Substituição 10% a 15% a/c = 0,35	Redução da absorção de água	Feltrin e Isaia (2018)

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2021).

O comportamento de redução na absorção de água verificado na maioria dos estudos pode ser justificado devido à redução do diâmetro dos poros, pelo efeito de empacotamento ocorrido no decorrer do tempo de cura, onde ocorre uma maior acomodação das partículas, diminuindo a porosidade e conseqüentemente a absorção de água. Já o aumento na absorção de água, verificado por Krishna e Sandeep (2016), pode ser atribuído a morfologia da CCA utilizada, que pode apresentar maior porosidade se comparada as amostras utilizadas nos outros estudos.

## 6 CONCLUSÃO

Após análise do estado da arte apresentado sobre a influência dos MCS conclui-se que:

- Os  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  são os principais compostos a serem considerados nos materiais utilizados como MCS, sendo os materiais pozolânicos caracterizados pela maior quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , enquanto os materiais hidráulicos apresentam maior quantidade de  $\text{CaO}$ .
- A reatividade dos MCS é diretamente influenciada pela porcentagem de substituição nos compósitos, pelas propriedades físicas e composição química dos MCS e pela utilização de ativadores.
- Sobre a influência no processo de hidratação dos compósitos, verifica-se que os parâmetros a serem considerados estão mais relacionados à granulometria e ao distanciamento das partículas proporcionado pela incorporação dos materiais. Em vista disso a atenção se volta para a estrutura da interface entre as partículas e não apenas à finura do material. Embora lento, o processo de hidratação dos MCS ocorre de maneira prolongada promovendo desenvolvimento da resistência em idades mais avançadas.
- Em relação à influência no calor de hidratação, muitos MCS promovem uma redução no calor liberado. De modo geral esta diminuição é promovida devido à diminuição da quantidade de cimento na matriz. Já o aumento na liberação de calor observado para pode estar relacionado a formação de pontos de nucleação devido à elevada superfície específica.
- O refinamento das partículas exerce grande influência na trabalhabilidade dos compósitos, atuando diretamente na estrutura e interação entre agregado e aglomerante, aumentando a trabalhabilidade à medida que a porcentagem de substituição aumenta e o tamanho das partículas diminui.
- A diminuição da permeabilidade, promovida pelo refinamento dos poros, contribui significativamente no ganho de resistência à carbonatação, ataques de sulfatos, penetração de íons cloreto e corrosão.
- A viabilidade dos MCS não é definida apenas pelas melhorias proporcionadas aos compósitos, mas também pela composição química, influenciada diretamente pela origem e pelo processo de tratamento a qual o material é submetido. Em alguns casos a necessidade de caracterização constante, de pré-tratamento adequado e de transporte até

o local de utilização pode dificultar ou até mesmo inviabilizar a utilização do material como MCS.

- Por fim, os MCS se mostraram eficientes como substitutos ao CP, uma vez que apresentaram impacto favorável no desempenho mecânico e nas características de durabilidade. Além disso, a substituição do CP por MCS promove a destinação mais adequada a resíduos e a diminuição no consumo de cimento, alcançando os objetivos de mitigação aos impactos gerados ao meio ambiente.

### **6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestões à trabalhos futuros indica-se a realização de estudos e revisões que apresentem informações a cerca da combinação entre os MCS e também sobre modelagens que possam prever o comportamento de cada MCS em função da composição química obtida pela caracterização do material, com a finalidade de diminuir os problemas de variabilidade.

## REFERÊNCIAS

ADU-AMANKWAH, S. et al. **Influence of limestone on the hydration of ternary slag cements**. Cement and Concrete Research, v. 100, 2017.

AHREN, A. H.; STERNBERG, L. S. L.. **Humidity estimate for the middle Eocene Arctic rain forest**. Geology, v. 31, n. 5, 2003

AKRAM, T.; MEMON, S. A.; OBAID, H. **Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash**. Construction and Building Materials, 2008.

ALMEIDA, E. D. S. de et al. **Resíduos cerâmicos da indústria do polo cerâmico de Iranduba e Manacapuru como material pozolânico e mitigador de reação álcalis-agregado**. 2020.

ALMEIDA, R. D., BRITO, B. L. F., ROCHA, .C. A. A., FILHO, R. D. T. **Efeito da substituição do cimento por fíler calcário na hidratação e propriedades mecânicas de matrizes a base de cimento**. IBRACON. 2019.

ALTWAIR, N.M., MEGAT JOHARI, M.A., SAIYID HASHIM, S.F. **Flexural performance of green engineered cementitious composites containing high volume of palm oil fuel ash**. Constr. Build. Mater. Non Destr. Tech. Assess. Concr, 2012.

ALVES, L.S; MARTINS FILHO, S. T. **Concreto com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar com granulometria específica**. Syn. scy. UTFPR, Pato Branco, v. 12, n. 1, 2017.

ANJOS, M. A. S.; MARTINELLI, A. E. **Caracterização do resíduo da Biomassa da cana-de-açúcar para aplicação em pastas cimentícias**. In: CEBECiMat–Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências do Matérias–Porto de Galinhas–PE. 2008.

APRIANTI, E. S. **Effect of rice husk ash as additives in lime mortar**. In: Proceedings of Ninth The IIER International Conference, Bangkok, Thailand. 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13956-1: **Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.

ASTM C 618-00: **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete**, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, USA.

ASTM C150. **Standard Specification for Portland Cement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020

ATIS, C. D., **Carbonation-porosity-strength model for fly ash concrete**, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Technical Note, Jan./Feb. 2004.

BALLIM, Y.; GRAHAM, P. C. **The effects of supplementary cementing materials in modifying the heat of hydration of concrete**. *Materials and Structures*, v. 42, n. 6, 2009.

BATTAGIN, A. F. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), v. 1, 2011.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. v.1, 2000.

BEHNOOD, A.; ZIARI, H. **Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures**. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 2, 2008.

BENTUR, A.; GOLDMAN, A. COHEN, M. D. **The contribution of the transition zone to the strength of high-quality silica fume concretes**. *MRS Online Proceedings Library Archive*, v. 114, 1987.

BENTZ, D.P.; FERRARIS, C.F.; JONES, S.Z.; LOOTENS, D.; ZUNINO, F.; **Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance**. *Cement and Concrete Composites*, 2017.

BERODIER E.; SCRIVENER K. **Understanding the filler effect on nucleation and growth of C-S-H**, *J. Am. Ceram. Soc.* 97, 2014.

BEZERRA, I. M. T. et al. **Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 6, 2011.

BLATT, G. **Análise da influência da cinza de casca de arroz nas propriedades do concreto**. 2018.

BLESZYNSKI, R. F. **The performance and durability of concrete with ternary blends of silica fume and blast-furnace slag**, PhD Thesis, University of Toronto, 2002.

BROWN, P; BOTHE JR, J. **The system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O at 23±2 C and the mechanisms of chloride binding in concrete**. Cement and Concrete Research, v. 34, 2004.

BRUNAUER, S. et al. **Hardened portland cement pastes of low porosity: VII. Further remarks about early hydration**. Composition and surface area of tobermorite gel. Summary. Cement and Concrete Research, v. 3, n. 3, 1973.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **Sulphate and acid resistance of concrete in the ground**. BRE Digest 363. Garston: Building Research Establishment, 1991.

BYE, G. C.; **CEMENT, Portland. Composition, Production and Properties**. 1983.

CALDARONE, M. A.; GRUBER, K. A.; BURG, R. G. **High reactivity metakaolin (HRM): a new generation mineral admixture for high performance concrete**. Concrete International, v. 16, n. 11, 1994.

CAMILO, M. G.; MEDEIROS, R. **Estudo do uso de cinza de casca de arroz como material cimentício suplementar para produção de concreto**. In: RIUNI, Repositório Institucional, 2018.

CEZAR, D. S. et al. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011.

CHAKRAVERTY A.; MISHRA, P.; BANERJEE H, D. **Investigation of Thermal Decomposition of Rice Husk**. *Thermochimica Acta*. v.94, 1985.

CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. **Effect of Rice Husk Ash on the Strength and Durability Characteristics of Concrete**. Construction and Building Materials, v. 25, n. 9, 2011.

CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K. **Alkali fixation of C-S-H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction**. Cement and Concrete Research, v. 42, n. 8, 2012.

CHEAH, C.B., RAMLI, M. **The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: an overview**. Resour. Cons. Recycl. 55 (7), 2011.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. R. M. **Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars**. Cement and Concrete Composites, n. 30, 2008.

COUTO, C. et al. **Influência da pozolanidade da escória de alto-forno nas propriedades de argamassas e concretos duráveis.** *Construindo*, v. 2, n. 01, 2010.

CUNHA M. F.; FORTI B.A.; SILVA B.I. **Tendências da normalização de metacaulim para uso em concretos.** In: Reunião Anual do IBRACON 52 - Novas Tecnologias do Concreto para o Crescimento Sustentável, Ceará. Anais: IBRACON, 2010.

DAI, Z.; TRAN, T. T.; SKIBSTED, J. **Aluminum incorporation in the C–S–H phase of white Portland cement–metakaolin blends studied by  $^{27}\text{Al}$  and  $^{29}\text{Si}$  MAS NMR spectroscopy,** *J. Am. Ceram. Soc.* 97, 2014.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais.** In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e tecnologia.* IBRACON, São Paulo, 2011.

DELLA, V. P. et al. **Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz.** *Química Nova*, v. 29, n. 6, 2006.

DOTTO, J. M. R. et al. **Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars.** *Cement and concrete composites*, v. 26, n. 1, 2004.

DUCHESNE, J; BÉRUBÉ, M. **Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali–silica reaction.** *Cement and concrete research*, v. 31, n. 7, 2001.

EL-DAKROURY, A.; GASSER, M. S. **Rice husk ash (RHA) as cement admixture for immobilization of liquid radioactive waste at different temperatures.** *Journal of nuclear materials*, v. 381, n. 3, p. 271-277, 2008.

EL-DIADAMONY, H.; AMER, A. A.; SOKKARY, T. M.; EL-HOSEN, S. **Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes.** *HBRC Journal*, v. 14, n. 2, 2018.

EUROPA. **Environmental, Economic and Social Impacts of the Use of Sewage Sludge on Land e Final Report,** 2010.

FELTRIN, C. S.; ISAIA, G. C. **Propriedades do concreto com adição de filler calcário dolomítico.** *Revista de Ciência e Inovação*, v. 3, n. 1, 2018.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. **Evaluation of bagasse ash as a supplementary cementitious material.** *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 6, 2007.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GRIMALDI G, CARPIO J, RAHARINAIVO A. **Effect of silica fume on carbonation and chloride penetration in mortars**. In: Mohammed Alasali, editor. Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete; 1989.

GUDISSA, W.; DINKU, A. **The use of limestone powder as an alternative cement replacement material: an experimental study**. Zede Journal, v. 27, 2010.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M. **A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag**. Materials and Structures, v. 41, n. 3, 2008.

HABEEB, G. A.; MAHMUD, H. B. **Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material**. Materials research, v. 13, n. 2, 2010.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005.

HERNÁNDEZ, J. F.M.; MIDDENDORF, B; GEHRKE, M. e BUDELMANN, H. **Use of Wastes of the Sugar Industry as Pozzolana in Lime-Pozzolana Binders: Study of the Reaction**. Cement and Concrete Research, v. 28, n. 11, 1998.

HIRSCH, T. J. **Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate**. ACI J. Proc. 59, 1962.

HOFFMAN, G.K.. **Pozzolans and Supplementary Cementitious Materials**. Industrial Minerals and Rocks, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2006.

HOLLAND, T. C. **Silica fume user's manual**. Federal Highway Administration, 2005.

ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho**. Concreto: Ciência e Tecnologia. Cap, v. 36, 2011.

KHAN, M. H.; MOHAN, K.; TAYLOR, Harry FW. **Pastes of tricalcium silicate with rice husk ash**. Cement and Concrete Research, v. 15, n. 1, 1985.

KHAN, M. I.; SIDDIQUE, R. **Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties**. Resources, Conservation and Recycling, v. 57, 2011.

KHAYAT, K. H.; AITCIN, P. **Silica fume: a unique supplementary cementitious material.** Mineral admixtures in cement and concrete, v. 4, 1993.

KRISHNA, N. K.; SANDEEP, S.; MINI, K. M. **Study on concrete with partial replacement of cement by rice husk ash.** In: IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing, 2016.

LACERDA, C. S.; HELENE, P. R. L. **Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos.** USP, 2005.

LAPEYRE, J.; KUMAR, A. **Influence of pozzolanic additives on hydration mechanisms of tricalcium silicate.** Journal of the American Ceramic Society, v. 101, n. 8, 2018.

LERTWATTANARUK, P., MAKUL, N., SIRIPATTARAPRAVAT, C. **Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering.** J. Environ. Manag. 2012.

LI, G.; XU, X.; CHEN, E.; FAN, J.; XIONG, G. **Properties of cement-based bricks with oyster-shells ash.** J. C, 2015.

LIMA, S. A. et al. **Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão.** Ambiente Construído, v. 11, n. 2, 2011.

MAGALHAES, A. G. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno.** 2007.

MAGALHÃES, T. A. et al. **Análise da penetração de íons cloreto em compósitos cimentícios contendo diferentes teores de escória de alto-forno.** 2019.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials.** Taylor & Francis, 1996.

MARINHO, A. A. et al. **Resíduos da indústria da construção civil e o seu processo de reciclagem para a minimização dos impactos ambientais.** Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, v. 1, n. 1, 2014.

MARTINS, M. M. **Investigação da influência do uso de materiais cimentícios suplementares em substituição parcial ao cimento Portland.** Engenharia Civil - Tubarão, 2018.

MAZLOOM, M; RAMEZANIANPOUR, A. A.; BROOKS, J. J. **Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete.** Cement and Concrete Composites, v. 26, n. 4, 2004.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo JM; CARMONA FILHO, Antônio. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; PIRTZ, D. **Use of rice hull ash to reduce temperature in high-strength mass concrete.** In: Journal Proceedings. 1978.

METHA, P. K. **Rice husk ash: a unique supplementary cementing material.** In: Advances in Concrete Technology. Editor V. M. Malhotra, Canmet, Canada: Ottawa, 2004.

MOAYAD, N.; HANA, A. Y. **Use of rice husk ash in concrete.** The Int J Cem Compo Lightweight Concr, v. 6, n. 4, 1984.

MOHANTY, T. K. **Use of Rice Husk Ash in Manufacture of Portland Cement.** Cement. n.1, v.8, 1974.

NAVARRETE, I. et al. **Impact of physical and physicochemical properties of supplementary cementitious materials on structural build-up of cement-based pastes.** Cement and Concrete Research, v. 130, 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5ª. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

NUNES, I. H. S. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, 2009.

OSBORNE, G. J. **Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete.** Cement and Concrete Composites, v. 21, n. 1, p. 11-21, 1999.

OWENS, P. L.; NEWMAN, J. B. **Lightweight aggregate.** Advanced Concrete Technology. Oxford, Reino Unido: Elsevier, 2003.

PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S. **Supplementary cementing materials in concrete: Part I: efficiency and design.** Cement and concrete research, v. 32, n. 10, 2002.

PAPADAKIS, V.G. **Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. Highcalcium fly ash.** Cem. Concr. Res. 30. 2000.

PARIS, J. M.; ROESSLER, J. G.; FERRARO, C. C.; DEFORD, H. D.; TOWNSEND, T. G. **A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete.** Journal of Cleaner Production, v. 121, 2016.

PAULA, M. O. D.; TINÔCO, I. D. F.; RODRIGUES, C. D. S.; SILVA, E. N. D.; SOUZA, C. D. F. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 3, 2009.

PERRATON, D.; AITICIN, P. C.; VEZINA, D. **Permeabilities of silica fume concrete. Special Publication.** v. 108, 1988.

PIATAK, N. M.; MICHAEL, B.; SEAL II, Robert R. **Characteristics and environmental aspects of slag: A review.** Applied Geochemistry, v. 57, 2015.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. **Pore size distribution of high performance metakaolin concrete.** Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., v. 17, n. 1, p. 42-46, 2002.

POON, C. S.; LAM, L.; WONG, Y. L. **A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash.** Cement and Concrete Research, v. 30, n. 3, 2000.

RAJAMMA, R., Ball, R.J., Tarelho, L.A.C., Allen, G.C., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M.,. **Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials.** J. Hazard. Mater. 2009.

RAMASAMY, V. **Durability Properties of Rice Husk Ash Concrete.** 2019.

RAMLOCHAN, T., THOMAS, M. D. A., GRUBER, K. A. **The effect of metakaolin on alkalisilica reaction in concrete.** Cement and Concrete Research, v. 30, 2000.

RAMLOCHAN, T.; THOMAS, M.; GRUBER, K. A. **The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete.** Cement and concrete research, v. 30, n. 3, 2000.

RAMOS, T.; MATOS, A. M.; COUTINHO, J. S. **Mortar with wood waste ash: mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion.** Constr. Build. Mater. 49, 2013.

RANJBAR, N.; MEHRALI, M.; ALENGARAM, U. J.; METSELAAR, H. S. C.; JUMAAT, M. Z. **Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures.** Constr. Build. Mater. 65, 2014.

RECENA, F. A. P. **Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante.** 2011.

REZENDE, M. L. S. et al. **Uso de metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta.** Ambiente Construído, v. 12, n. 3, 2012.

RIBEIRO, D. V. et al. **Estudo das reações alcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento.** Cerâmica, v. 58, n. 345, p. 90-98, 2012.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade.** 2005.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M.; **Aproveitamento de resíduos na construção. Coleção Habitare: Utilização de Resíduos na Construção Habitacional,** Porto Alegre, ANTAC, v. 4, 2003.

ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A.; EL HACHEM, R.; GRONDIN, F. **Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks.** Cement and Concrete Research, v. 39, n. 12, 2009.

SALES, A.; LIMA, S. A. **Use of brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement.** Waste Management, v. 30, n. 6, 2010.

SANTOS, B. S.; ALBUQUERQUE, D. D. M.; RIBEIRO, D. V. **Efeito da adição do metacaulim na carbonatação de concretos de cimento Portland.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 13, n. 1, 2020.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos.** 1997.

SARASWATHY, V. et al. **Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete.** Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 7, p. 673-680, 2003.

SCHWAAB, M. et al. **Interacting cracks obey a multiscale attractive to repulsive transition.** Physical review letters, v. 120, n. 25, 2018.

SCOLARO, T. P.; ROCHA, J. C. **Effect of filler nature on mechanical performance and drying shrinkage of self-leveling mortars.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 14, 2021.

SCRIVENER, K. L.; LOTHENBACH, B.; DE BELIE, N. et al. **TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs.** Mater Struct 48, 2015.

SHAYAN, A., XU, A. **Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: a field trial on concrete slabs.** Cem. Concr. Res. 36 (3), 2006.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. **Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete.** Cem. Concr. Res. 32, 2002.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D.A; BLESZYNSKI, R. F. **The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes.** Cement and Concrete Research, v. 29, n. 12, 1999.

SHI, C., ZHENG, K. **A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete.** Res. Conserv. Recycl. 52, 2007.

SIDDIQUE, R. **Utilization of wood ash in concrete manufacturing.** Res. Conserv. Recycl. 67, 27 e 33, 2012.

SIDDIQUE, R., KHAN, M.I. **Supplementary Cementing Materials.** Springer, 2011.

SILVA, B. A. **Análise da influência do tipo de cura na resistência à compressão de corpos de prova de concreto.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica–ITA, São José dos Campos, São Paulo, 2009.

SILVA P, J. D.; COUTO, C.; MARTINI, R. J.; COSTA, F. R;. **Utilização de escória de alto-forno como material substitutivo ao aglomerante na produção de argamassas.** In: Seminário de Iniciação Científica da PUCMINAS, 16, Belo Horizonte. 2009.

SILVA, N. I.; CALARGE, L. M.; CHIES, F.; MALLMANN, J. E.; ZWONOK, O. **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico.** Cerâmica, v. 45, n. 296, 1999.

SILVEIRA, A.Augustin. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado.** 2007.

SKIBSTED, J; SNELLINGS, R. **Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends.** Cement and Concrete Research, v. 124, 2019.

SKJOLSVOLD, O. **Carbonation depths of concrete with and without condensed silica fume.** Special Publication, v. 91, 1986.

SNELLINGS, R. **Assessing, Understanding and Unlocking Supplementary Cementitious Materials.** RILEM Tech Lett, v.1, 2016.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência.** 2003.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da Influência do Uso de Metacaulim de Alta Reatividade nas Propriedades Mecânicas do Concreto de Alta Resistência.** 203 f. Porto Alegre, 2003.

SURANENI, Prannoy et al. **New insights from reactivity testing of supplementary cementitious materials.** Cement and Concrete Composites, v. 103. 2019.

TAHA, B., NOUNU, G. **Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement.** Constr. Build. Mater. 22 (5), 2008.

TASHIMA, M. M.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; BERNABEU, J. P.; SOUSA, L. C.; MELGES, J. L. P. **Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica.** Ambiente Construído, v. 12, n. 2, 2012.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** London: Thomas Telford, 1997.

TAYLOR, H. F. W. **La química de los cementos.** Ediciones Urmo. Vol. I, Espanha, 1967.

THOMAS, M. D. A., INNIS, F. A. **Effect of slag on expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete.** ACI Mater. J. 95, 1998.

THOMAS, M. D. A.; INNIS, F. A. **Effect of slag on expansion due to alkali aggregate reaction in concrete.** Materials Journal, v. 95, n. 6, 1998.

THOMAS, M. **Supplementary cementing materials in concrete.** Nova Iorque: CRC Press, 2013.

VOLLPRACHT, A.; LOTHENBACH, B.; SNELLINGS, R.; HAUFE, J. **The pore solution of blended cements: a review.** Material and Structures 49, 2016.

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

WONG, H. S.; RAZAK, H. A. **Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance.** Cement and Concrete Research, v. 35, n. 4, 2005.

WORRELL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N.; HENDRIKS, C.; MEIDA, L. O. **Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry**. Annual Review Energy and the Environment, v. 26, n. 1, 2001.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas**. Dissertação de Mestrado em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 1989.

ZERBINO, R; BARRAGÁN, B. **Propriedades reológicas Del hormigon autocompactable**. In: Revista Concreto & Construções. Ed. Ibracon, 47, São Paulo, 2007.

ZHANG, M.; MALHOTRA, V. **High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material**. Am. Concr. Inst. 93, 1996.

ZONG, L.; FEI, Z.; ZHANG, S. **Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste**. Journal of Cleaner Production, Nanjing, v. 70, February, 2014.