

Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade

CARACTERÍSTICAS DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND COM ADIÇÃO DE CINZA DE LODO DE ETA

CONCRETE FOLDER FEATURES WITH PORTLAND WTP SLUDGE ASH ADDITION

Ronei Tiago Stein

RESUMO

Atualmente a busca por alternativas para minimizar o impacto ambiental na produção de insumos vem aumentando. O concreto é o segundo material mais utilizado pelo homem, perdendo apenas pelo consumo de água. Adições minerais têm sido investigadas como substituição parcial ao cimento no concreto, pois, além de propiciar o aproveitamento de resíduos industriais, podem contribuir nas propriedades destes. Este estudo analisou a microestrutura de pastas de cimento compostas por diferentes teores de cinza de lodo de Estação de Tratamento de Água (CLETA). Foram investigados 7 traços diferentes: um traço de referência e 6 traços com adição de CLETA, para teores de 5, 10, 15, 20, 25 e 30%. Cada traço foi desenvolvido para 3 relações a/ag (0,35, 0,50 e 0,65), totalizando 21 diferentes traços, que foram estudados para diferentes idades de cura. Foram realizados ensaios de tempo de início e fim de pega, condutividade elétrica, potencial de hidrogênio (pH) e água quimicamente combinada. Dos resultados obtidos, constata-se que o aumento no teor de substituição de cimento por CLETA resultou em aumento nos tempos de início e fim de pega e diminuição na condutividade elétrica e nos valores de pH. O teor de água quimicamente combinada aumentou com o aumento na relação a/ag e do de teor de CLETA.

Palavras-chave: cimento portland, adições minerais, microestruturas das pastas.

ABSTRACT

Currently, it is increasing the search for alternatives to minimize the environmental impact on inputs production. Concrete, highly polluting, is the second most natural material used by man, losing just for the water. Mineral additions have been investigated as partial replacement of cement in concrete, because, besides of providing the use of industrial waste, it can offer improvements in material characteristics. This study analyzed the microstructure of cement pastes composed by sludge produced in water treatment plants (WTP). Seven different traces were investigated: a reference one and 6 traces adding WTP sludge ash in different levels of 5, 10, 15, 20, 25 and 30%. Each trace has been developed to three water/binder (w/b) ratios (0.35, 0.50 and 0.65), ending in 21 different traces, which were studied for different healing ages. Assays of setting time, chemically combined water, electrical conductivity and hydrogen potential (pH); were performed. From the results, it appears that the increased cement replacement content by WTP sludge ash resulted in an increase in the start and end times of the setting time and decrease in electric conductivity and pH testing. The results for combined chemical water increased when the relations w/b and the WTP sludge ash also increased.

Keywords: portland cement, mineral additions, microstructure pastes.

1. INTRODUÇÃO

A Portaria 518 de 25 de Março de 2004 do Ministério da Saúde estabelece que a potabilização das águas doces naturais, para fins de abastecimento público, tem como principal função adequar a água bruta afluyente à estação de tratamento, ao padrão de potabilidade. O tratamento de água consiste basicamente na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, micro-organismos e outras substâncias possivelmente deletérias à saúde humana presentes nas águas (VON SPERLING, 2005).

Com o crescimento das cidades e os constantes esforços pelo aumento da qualidade de vida dos seus cidadãos têm aumentado a demanda por água tratada e, conseqüentemente, o incremento da geração de materiais sólidos provenientes do tratamento de águas fluviais (HOPPEN C. et al., 2005).

Esses materiais sólidos são denominados lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA), sendo considerados “resíduo sólido”. De acordo com a norma ABNT NBR 10.004: 2004, esses devem ser tratados e dispostos corretamente.

A construção civil adota o concreto como material industrializado mais utilizado em escala global. Somente no Brasil, no ano de 2014, a produção do cimento superou os 71,2 milhões de toneladas, segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2015), correspondendo ao aumento de 0,42% comparado ao ano de 2013, quando a produção foi de 70,9 milhões de toneladas.

O concreto pode ser caracterizado, segundo NBR 12655 (ABNT, 2015), como uma mistura homogênea de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. A preferência pelo uso do concreto como principal material da construção civil se deve principalmente por este ser um material com excelente resistência à água, fácil execução e operação e, normalmente, está vinculado a um baixo custo (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com a agência Cement Sustainability Initiative (CSI), em uma parceria o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD, 2009) e empresas privadas de fabricação de cimento de diferentes países lançaram um relatório em 2009, mostrando que o Brasil gerava 600 kg de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido. Já em escala global, a estimativa é de 900 kg de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido, o que corresponde entre 5 e 7% da emissão do CO₂ liberado na atmosfera.

Pequenas alterações na produção em alta escala do concreto podem resultar em uma economia significativa, principalmente em se tratando do consumo de matéria-prima, gastos de energia e emissões de gases poluentes (ISAIA et al., 2011).

O uso de adições minerais pode ser uma alternativa para desenvolver novos materiais e fornecer soluções para a disposição de resíduos potencialmente poluidores no meio ambiente, oriundos de processos industriais (ISAIA et al., 2011). Além do ganho ambiental e econômico, pode-se aumentar em muito as propriedades de resistência mecânica e durabilidade (NEVILLE, 1997 e DAL MOLIN, 2011).

Com base no exposto, o presente estudo busca discutir e investigar a influência da substituição de parte do cimento Portland por diferentes teores de CLETA (cinza de lodo de Estação de Tratamento de Água) na microestrutura de pastas de cimento. Tem-se como premissa, avaliar o desempenho da CLETA em diferentes teores, comparando os resultados nas pastas, por meio de ensaios de tempo de início e fim de pega, água quimicamente combinada, pH e condutividade elétrica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sistema de tratamento de água

As características físicas, químicas, biológicas e radiológicas de águas naturais variam em relação aos processos que ocorrem no corpo hídrico e na bacia hidrológica. Esses processos estão relacionados com a capacidade de dissolver diversas substâncias e transportar materiais em suspensão, o que acarreta na alteração de sua composição. Como consequência, a mesma pode se tornar um veículo transmissor de patologias, causando prejuízos ao homem. Assim, as substâncias dissolvidas e em suspensão na água bruta devem ser removidas, atendendo certos limites para que possa ser destinada ao consumo público (ALVES, 2010; LIBÂNIO, 2010).

A Portaria do Ministério da Saúde nº 2914, de 12 de dezembro de 2011, no seu capítulo IV, define que a água para consumo humano, é aquela que pode ser ingerida, usada no preparo e produção de alimentos e na higiene pessoal, independentemente da sua origem. Logo, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) possuem a função de transformar a água bruta inadequada ao consumo humano em água potável.

A NBR 12.216 (ABNT, 1992) descreve ETA como o conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade, o qual deverá ser entregue para o consumo humano, através de um sistema de abastecimento de água.

2.2. Resíduos Sólidos

A Norma Brasileira ABNT NBR 10.004: 2004 classifica Resíduos Sólidos como sendo os resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nessa definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, exigindo-se soluções técnicas e ambientalmente corretas para sua correta destinação.

Sendo assim, o lodo gerado nas ETAs se classifica como resíduo pertencente a classe II A, pois não apresenta riscos ao meio ambiente, porém, este deve ser tratado e disposto adequadamente a fim de não oferecer riscos ao meio ambiente.

2.2.1. Resíduos de Estação de tratamento de água

Conforme Di Bernardo e Dantas (2005), o lodo de ETA pode causar riscos à saúde humana devido à presença de agentes patogênicos. Os mesmos autores alertam ainda quanto aos perigos devido à presença de metais pesados oriundos do processo de tratamento da água.

A composição do lodo de ETA varia de acordo com as substâncias utilizadas no tratamento da água. O sulfato de alumínio, cloreto férrico, cloreto ferroso e sulfato férrico estão entre as principais substâncias químicas adotadas para o tratamento da água (FYTIANOS et al., 1998 e ROSA et al., 2012). Essas substâncias geram um lodo rico em alumínio e ferro. Porém, o que interfere também nas características quantitativas e qualitativas do lodo é a qualidade da água bruta, dos produtos químicos utilizados no tratamento, das próprias condições de operação de cada unidade de tratamento e o tempo de permanência do lodo nos decantadores.

2.3. Hidratação do cimento Portland

O cimento é um material amplamente utilizado, devido a seu baixo custo, facilidade de lançamento e disponibilidade praticamente universal (NONAT, 2014). Atualmente, a fabricação do cimento é um processo produtivo que envolve um alto custo econômico e ambiental. O óleo combustível usado como matriz energética para aquecer os fornos, é prejudicial ao meio ambiente, uma vez que a queima deste combustível, por ser de origem fóssil, libera milhões de toneladas de CO₂ por ano na atmosfera.

Nonat (2014) expõe que da quantidade total de CO₂ emitida para a atmosfera durante a produção do cimento Portland cerca de 30% de CO₂ provém de combustíveis queimados para a clínquerização e cerca de 70% da descarbonatação do calcário.

A fim de reduzir as extrações de matérias-primas, o uso de materiais que visem atenuar o consumo de cimento, por adição de resíduo de outro processo industrial, só vem a colaborar com a diminuição dos impactos gerados pelo processo de fabricação do cimento.

Porém, para haver o desenvolvimento de concretos com adições minerais, os estudos precisam estar voltados para a microestrutura do concreto, a fim de melhorar a caracterização de cada constituinte e de seu relacionamento com os demais (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

2.3.1. Hidratação das principais fases constituintes do cimento.

Entre os principais compostos resultantes da hidratação do cimento Portland, destacam-se o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), o Hidróxido de cálcio (CH) e os Sulfoaluminatos de cálcio, além de partículas de clínquer não hidratadas.

Jawed, Skalny e Young (1983 apud QUARCIONI, 2008) dividem o mecanismo de hidratação do cimento Portland em cinco etapas distintas: Estágio Inicial ou Período da mistura (I), período de indução ou dormente (II), período de aceleração ou início de pega (III), período de desaceleração ou endurecimento (IV) e por fim, o estágio final ou também conhecido como período de reação lenta (V).

O Estágio Inicial ocorre imediatamente após misturar-se o cimento com a água, ocasionando a dissolução dos sulfatos alcalinos, que liberam íons K⁺, Na⁺ e SO₄²⁻. O sulfato de cálcio é dissolvido até a completa saturação, liberando íons Ca²⁺ e SO₄²⁻. Logo após, inicia-se a dissolução das fases anidras C₃S (alita), C₃A (aluminato tricálcico) e C₄AF (ferroaluminato tetracálcico). Nestas reações, tem-se o primeiro pico de liberação de calor.

As fases C₃A e C₄AF reagem com íons sulfato disponível (Ca²⁺ e SO₄²⁻), formando pequenas agulhas de etringita na superfície dos grãos de cimento, (AÏTCIN, 1998; KIRCHHEIM, 2010), além de formar um gel amorfo de C-S-H, oriundo da dissolução do C₃S presente em solução. Mehta e Monteiro (2014), comentam que nesta fase, cerca de 2 a 10% do C₃S e 5 a 25% do C₃A são consumidos.

Na segunda etapa de hidratação do cimento Portland, o Período de Indução ou dormente, Taylor (1998) ressalta que ocorre a hidratação da cal livre (CaO) e uma reação de menor intensidade com a alita. Estas reações possuem uma maior velocidade, mas devido à deposição do gel hidratado sobre os grãos de cimento, estas reações são desaceleradas. Este período da reação, dura entre 30 minutos a 3 horas, também denominado de dormência e termina quando a camada de gel formada sobre o grão de cimento se rompe ou se torna permeável.

Após 3 a 12 horas de misturas do cimento com a água, tem início o Período de Aceleração, na qual a hidratação segue uma intensa liberação de calor e rápida liberação de C-S-H e hidróxido de cálcio, com decaimento da concentração de íons Ca²⁺ na solução. Ocorre também neste período a dissolução por completo do sulfato de cálcio e redução da concentração dos íons SO₄²⁻ em solução. Este período inicia com o aparecimento do segundo pico de calor e finaliza no início da desaceleração do pico de calor do sistema (TAYLOR, 1998). O consumo

de Ca^{2+} e OH^- acelera a dissolução de todos os componentes de cimento Portland. O fluxo térmico cresce vagarosamente no princípio, pois a precipitação do CH é endotérmica, absorve calor e torna-se mais rápida nos estágios finais (AÏTCIN, 1998).

O fenômeno da pega ocorre no decorrer do período de aceleração, em que as fases dos silicatos, principalmente a alita (C_3S), e aluminatos hidratados começam a criar ligações interpartículas, resultando em um endurecimento da pasta (AÏTCIN, 1998).

No período de desaceleração ou endurecimento, que corresponde entre 9 e 15 horas após o início da mistura, a taxa de reação diminui progressivamente, reduzindo gradualmente a concentração de íons na solução, devido à precipitação dos hidratos que recobrem as partículas do cimento e dificultam a solubilização das fases anidras. Neste estágio, a hidratação da belita (C_2S) torna-se mais importante e a formação do C-S-H e do hidróxido de cálcio ocorre de forma mais lenta.

No estágio Final, os grãos de cimento estão cobertos por uma camada de hidratos, a qual vai se tornando cada vez mais espessa. As moléculas de água não conseguem chegar as partes não hidratadas das partículas de cimento, atravessando esta espessa camada. A hidratação vai se reduzindo, pois é controlada pela difusão das moléculas de água através das camadas de hidratos, sendo que a pasta de cimento hidratada se parece com uma compacta pasta “amorfa”, conhecida como produto interno (AÏTCIN, 1998; KIRCHHEIM, 2008).

Segundo Aïtcin (1998), a hidratação do cimento Portland chega ao fim quando não existe mais fase anidra ou quando a água não pode mais chegar às fases não hidratadas (quando os sistemas estão densos e defloculados) ou ainda quando não existe mais água disponível caso a relação água/aglomerante seja baixa.

2.4. Adições minerais

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define pozolanas como um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes.

Mehta e Monteiro (2014) definem o termo adição, como qualquer material além da água, agregados e cimento, utilizados como um ingrediente do concreto e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura. A preocupação ambiental em desenvolver novos materiais e fornecer soluções para a disposição de resíduos vem incluindo o uso de adições minerais em concreto estrutural e no próprio cimento. Além do ganho ambiental e econômico, pode-se aumentar em muito as propriedades de resistência mecânica e durabilidade do material (NEVILLE, 1997).

Como vantagens do uso de adições, ressalta-se que a resistência mecânica e a resistência a cloretos, sulfato e água do mar podem ser aumentadas, devido à redução da permeabilidade e à diminuição da liberação de calor

3. METODOLOGIA

Os ensaios de laboratório foram conduzidos de forma a investigar como o teor de substituição CLETA, o período de cura e o teor de a/ag influenciaram na hidratação do cimento Portland.

Os ensaios foram executados em pasta, com três relações água/aglomerante (0,35 – 0,50 – 0,65) e teores de substituição de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% de CLETA, e comparados com uma amostra padrão, contendo apenas cimento CPV-ARI.

3.1. Ensaio em pastas

3.3.1. Ensaio de tempo de início e fim de pega

O ensaio de início e fim de pega foi realizado de acordo com a norma NBR NM 65 (ABNT, 2003), adotando-se, entretanto, uma relação água/aglomerante fixa de 0,5. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

3.3.2. Ensaio de condutividade elétrica e pH da solução dos poros

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de Ø4x8 cm de pastas. Nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias de ensaio, os corpos de prova foram retirados da água com cal, lavados e escovados com água corrente. Os ensaios foram realizados para as três relações a/ag, sendo analisados os teores variando de 5 a 30% de substituição do cimento por CLETA e uma amostra de referência.

Para medição do pH e da condutividade, o mesmo foi realizado no extrato aquoso. Inicialmente, extraiu-se o pó, com auxílio de uma furadeira de bancada de baixa rotação, e peneirou-se em peneira de malha $\neq 100$. A fração passante foi misturada em igual quantidade em massa de água destilada deionizada (proporção 1:1) e agitada em um agitador magnético por uma hora, tempo necessário para a estabilização do pH.

3.3.3. Ensaio de água quimicamente combinada

Com auxílio de uma furadeira de bancada, extraiu-se o pó dos corpos de prova e peneirou-se-o em peneira de malha $\neq 100$. O material passante foi colocado em estufa, a 105°C, por 6 horas, conforme procedimento adotado por Chen e Wu (2013).

A análise do teor de água combinada foi determinado através da diferença de massa da amostra aos 105° (P105) e 1050°C (P1050), permanecendo nesta temperatura durante 3 horas, denominada de água não evaporável

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados de condutividade elétrica

A condutividade elétrica é um parâmetro eficaz para monitorar as características microestruturais dos materiais cimentícios. Com os resultados obtidos, é possível analisar a condutividade da solução dos poros, os quais são significativos em ditar a durabilidade do material. Os resultados obtidos da condutividade elétrica são apresentados são expressos na Tabela 1.

Tabela 1 – Condutividade elétrica específica obtida na solução dos poros

Traço	a/ag	Condutividade elétrica específica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}$)		
		Idades		
		3 dias	28 dias	91 dias
REF	0,35	849	1643	2093
	0,50	788	1494	1644

Traço	a/ag	Condutividade elétrica específica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}$)		
		Idades		
		3 dias	28 dias	91 dias
5% CLETA	0,65	225	998	1089
	0,35	1764	1420	1403
	0,50	1442	1286	1298
	0,65	1212	1180	985
10% CLETA	0,35	1820	1627	1319
	0,50	1626	1333	1122
	0,65	1221	1108	1111
	0,35	1763	1800	1271
15% CLETA	0,50	1483	1278	1216
	0,65	1289	1127	1201
	0,35	1494	1470	1194
	0,50	1258	1172	1089
20% CLETA	0,65	1164	1099	883
	0,35	1410	919	839
	0,50	1314	1204	834
	0,65	1031	927	829
25% CLETA	0,35	1312	984	842
	0,50	1280	990	777
	0,65	1000	973	716
	0,35	1312	984	842
30% CLETA	0,50	1280	990	777
	0,65	1000	973	716
	0,35	1312	984	842
	0,50	1280	990	777

Fonte: autor.

Percebe-se que a maioria das misturas compostas com CLETA, apresentaram menores valores de condutividade elétrica do que a mistura de referência, para as idades de 28 (para relação a/ag de 0,35 e 0,50) e 91 dias. Este comportamento também foi verificado por outros pesquisadores que estudaram concretos com o uso de adições minerais. (SHI, STEGEMANN e CALDWELL, 1998; WEE et al, 2000; DAL RI, 2002; SHI, 2004; HOPPE, 2005; PEDROZO, 2008; GASTALDINI et al, 2009).

Pelos dados apresentados na Tabela 1, verifica-se que o avanço da idade de cura resultou em um decréscimo da condutividade elétrica das soluções com adição de CLETA. O efeito contrário foi observado na mistura de referência, onde a condutividade apresentou um aumento com o avanço da idade.

Ao substituir-se parte do cimento por uma adição mineral, segundo Wee et al (2000), os quais realizaram ensaios com escória de alto forno, ocorre reação do CH e da sílica amorfa, formando o C-S-H secundário, apresentando uma menor densidade em comparação ao C-S-H primário, formado na hidratação do cimento, logo, os íons presentes na solução dos poros (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e OH^-) diminuem, reduzindo a condutividade elétrica.

Shi (2004) obteve resultados semelhantes à presente pesquisa, ao analisar a condutividade elétrica de concretos e argamassas, utilizando como adição mineral a sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno com substituição do cimento por diferentes teores. O autor concluiu que o índice de alcalinidade dos materiais cimentícios complementares depende diretamente do nível de substituição destes e da idade de cura. Conforme observado, à medida

que o teor de adições minerais aumentou, a condutividade elétrica nos concretos analisados diminuiu, devido ao efeito de diluição de íons condutores na solução dos poros.

4.2. Resultados de pH

Em se tratando do potencial de Hidrogênio (pH), os valores das misturas investigadas são dados na Tabela 2.

Tabela 2 – pH da solução aquosa

Traço	a/ag	Potencial de Hidrogênio (pH)		
		Idades		
		3 dias	28 dias	91 dias
REF	0,35	12,46	12,59	12,48
	0,50	12,38	12,42	12,46
	0,65	12,03	12,34	12,31
5% CLETA	0,35	12,76	12,49	12,40
	0,50	12,74	12,39	12,36
	0,65	12,77	12,36	12,29
10% CLETA	0,35	12,89	12,54	12,47
	0,50	12,79	12,34	12,38
	0,65	12,69	12,34	12,31
15% CLETA	0,35	12,81	12,42	12,48
	0,50	12,76	12,35	12,37
	0,65	12,55	12,31	12,33
20% CLETA	0,35	12,75	12,41	12,35
	0,50	12,68	12,32	12,33
	0,65	12,52	12,30	12,31
25% CLETA	0,35	12,66	12,21	12,19
	0,50	12,68	12,26	12,33
	0,65	12,51	12,17	12,20
30% CLETA	0,35	12,69	12,23	12,26
	0,50	12,52	12,16	12,25
	0,65	12,28	12,13	12,18

Fonte: autor.

Como esperado, os resultados foram semelhantes ao ensaio de condutividade elétrica. Para idade de cura de 28 dias, o pH reduziu conforme o teor de CLETA foi aumentando. Da mesma forma, à medida em que a relação a/ag aumentou, os valores de pH diminuiram.

Ao comparar a idade de cura de 28 para 91 dias, os valores de pH reduziram em praticamente todos os traços com relação a/ag de 0,35. Já para a relação a/ag de 0,50 e 0,65, isoladamente, ocorre aumento do pH nas idades de 28 para 91 dias, com exceção dos traços de Ref e 5CLETA (relação a/ag 0,50) e Ref, 5CLETA e 10CLETA (relação a/ag 0,65).

Analisando-se o tempo de cura de 3 dias, isoladamente, percebe-se que, todas as amostras contendo CLETA, apresentaram valores mais elevados comparados com a amostra padrão.

A mesma explicação atribuída para os resultados de condutividade elétrica, pode ser adotada para o pH. A substituição parcial do cimento CPV-ARI, por CLETA, acarreta no consumo parcial do CH para formação do C-S-H secundário, logo, os íons presentes na solução dos poros (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e OH^-) diminuem, reduzindo o valor do pH.

4.3. Resultados do tempo de início e fim de pega

A determinação do tempo de início e fim de pega foi realizada adotando uma relação a/ag fixa de 0,50, para todas as misturas, ou seja, não foi determinado o teor de água para uma pasta de consistência normal. Dessa forma, foi utilizado um aditivo para a obtenção de pastas de mesma consistência. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do tempo de pega das pastas analisadas

Pastas	Tempos de pega		
	Início	Fim	Intervalo
Referência	03h 50min	05h 15min	01h 25min
5%	04h 05min	05h 15min	01h 10min
10%	03h 15min	04h 45min	01h 30min
15%	03h 00min	05h 00min	02h
20%	03h 30min	05h 45min	02h 12min
25%	02h 40min	04h 45min	02h 5min
30%	02h 30min	05h 15min	02h 45min

Fonte: autor.

A substituição do cimento por adição mineral resulta no retardo do tempo de início e fim de pega, em parte devido ao efeito de diluição do cimento Portland (sendo este o elemento mais ativo), e, por outro lado, em função da maior necessidade de água na pasta de cimento para se atingir uma consistência normal (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A presença de adições nas idades iniciais da hidratação do cimento tem dois efeitos determinados pelo calor liberado: um é o de desaglomeração das partículas de cimento e, o outro, é de constituir pontos de nucleação para a precipitação do C-S-H, ambos acelerando as reações de hidratação do cimento.

Os dados encontrados na Tabela 03 vão ao encontro dos resultados apresentados por Tiboni (2007), o qual concluiu que o início de pega é postergado à medida que o teor de CCA, como adição mineral, aumenta. O concreto composto com 15% de cinza apresentou um atraso de 1,15 horas em comparação ao concreto de referência

Em se tratando do teor de aditivo utilizado, este variou até 1% da massa de aglomerante. Porém é possível perceber pela Tabela 03, que o mesmo não apresentou efeito retardador expressivo.

4.3. Resultados de água quimicamente combinada

Na Tabela 4 são apresentados os teores de água quimicamente combinada para as pastas investigadas com diferentes teores de CLETA e diferentes relações a/ag com tempo de cura de 28 e 91 dias.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de água quimicamente combinada

AMOSTRA	a/ag	28 dias (%)	91 dias (%)
REF	0,35	15,50	17,67
	0,50	15,83	19,84
	0,65	16,16	20,00
5% CLETA	0,35	14,83	17,33
	0,50	17,33	20,16
	0,65	17,66	20,50
10% CLETA	0,35	14,50	17,16
	0,50	17,83	19,16
	0,65	18,00	20,00
15% CLETA	0,35	14,16	17,00
	0,50	16,33	19,16
	0,65	17,66	19,83
20% CLETA	0,35	16,66	16,50
	0,50	17,00	19,50
	0,65	17,33	19,66
25% CLETA	0,35	16,16	17,83
	0,50	17,50	19,33
	0,65	18,00	19,50
30% CLETA	0,35	17,00	17,16
	0,50	18,16	19,16
	0,65	18,66	19,50

Fonte: autor.

Constata-se, pela análise da Tabela 4, que relações a/ag maiores proporcionam maior espaço livre entre as partículas, tanto aos 28 quanto aos 91 dias, o que proporciona maior porosidade e mais espaços para ocupação dos produtos hidratados, como é o caso do hidróxido de cálcio que, normalmente, forma-se em cristais de grandes dimensões (MEHTA e MONTEIRO, 2014). O contrário ocorre, quando se tem menores relações a/ag, pois os cristais hidratam-se em tamanhos menores, devido ao espaço livre ser menor – uma vez que existe mais aglomerante – e, conseqüentemente, menor quantidade de água combinada, dados coerentes aos encontrados por Chen e Wu (2013).

Para a relação a/ag de 0,35, as amostras contendo CLETA (5%, 10% e 15% aos 28 dias e 5%, 10%, 15% e 20% aos 91 dias) apresentaram uma diminuição do teor de água combinada. Porém, para os teores de substituição de 20%, 25% e 30% aos 28 dias e (25% e 30%) aos 91 dias, apresentaram um aumento do teor de água combinada.

Para as relações a/ag de 0,50 e 0,65, aos 28 dias, todos os traços com CLETA apresentaram um aumento do teor de água combinada em relação ao traço de REF. Já na idade dos 91 dias, um efeito contrário foi observado, ocorrendo uma diminuição (mesmo que pouco significativa) do teor de água combinada para ambas as relações, com exceção da amostra contendo 5% de CLETA como adição mineral, a qual apresentou um pequeno aumento.

5. CONCLUSÃO

- Os resultados de condutividade elétrica e pH apresentaram variações em função do teor de CLETA adotado, do tempo de cura e da relação a/ag. Nas amostras com menor

relação a/ag, as concentrações dos íons presentes na pasta de cimento foram maiores, acarretando em valores mais elevados da condutividade elétrica e pH.

- A substituição parcial do cimento CPV-ARI por CLETA resultou em uma diminuição da condutividade elétrica com o aumento do tempo de cura. Este fato explica-se devido à diminuição do teor de álcalis da solução dos poros e às modificações na estrutura dos poros com o aumento do teor de CLETA, tornando a pasta mais densa. Outro fator relacionado é quanto ao maior consumo de CH, formando o C-S-H adicional, fixando os álcalis, resultando em uma menor quantidade desses íons livres na solução aquosa dos poros das pastas investigadas.
- À medida que o teor de substituição do cimento por CLETA aumentou, percebeu-se um aumento do intervalo do tempo de início e fim de pega. As pastas compostas com menores teores de CLETA apresentaram início do tempo de pega mais rápido.
- O ensaio de água quimicamente combinada revelou que esta varia de acordo com o teor de substituição do cimento por CLETA, da relação a/ag e do tempo de cura. Relações a/ag maiores proporcionam maior espaço livre entre as partículas, o que acaba proporcionando maior porosidade e mais espaços para deposição dos produtos hidratados. É o caso do hidróxido de cálcio que, normalmente, forma-se em cristais de grandes dimensões.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 10004**: resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 12653**: materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AİTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1ª ed, São Paulo: Pini, 1998.

ALVES, C. **Tratamento de Águas de Abastecimento**. Publindústria, 3. ed. Porto, 2010.

BRASIL. Portaria M.S. Nº 518 DE 25 de março de 2004. Dispõe sobre os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Ministério da Saúde**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade de água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Ministério da Saúde**, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 dez. 2011. Capítulo IV.

CHEN, X.; WU, S. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. **Construction and Building Materials**, n. 38, p. 804-812, 2013.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, 2011.

DAL RI, M. **Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Santa Maria. 2002. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos, Rima, 2005.

FYTIANOS, K.; VOUNDRIAS, E.; RAIKOS, N. Modelling of phosphorus removal from aqueous and wastewater samples using ferric ion. **Environmental Pollution**, v. 101, n.1, p. 123 -130, 1998.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; HOPPE, T. F.; MISSAU, F.; SACIOTO, A. P. Influence of the use of rice husk ash on the electrical resistivity of concrete: a technical and economic feasibility study. **Construction and Build Materials**, v. 23, p. 3411-9, 2009.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Santa Maria. 2005. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HOPPEN C.; PORTELLA K. F.; JOUKOSKI A.; BARON O.; FRANCK R.; SALES A.; ANDREOLI C. V.; PAULON V.A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, v. 51, p. 85-95, 2005.

ISAIA, G. C; TUTIKIAN, B. F; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, cap. 36, 1283-1323, 2011.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de água**. Editora Átomo, 3. ed., 2010.

KIRCHHEIM, A. P.; SOUZA, R. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. Álcalis incorporados ao aluminato tricálcico: efeitos na hidratação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 177-189, jan/mar. 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

SNIC. **SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO**. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 24 ago. 2015.

NONAT, A. A hidratação dos cimentos. In: CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 17-39.

PEDROZO, E. C. **Estudo da cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos**. 2008. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland** – Estudo em Pasta. 2008. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ROSA, A. H.; FRACETO, L. F.; MOSCHINI-CARLOS, V. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**. Ed. Bookman, cap. 2, p. 47-50, São Paulo, 2012.

SHI, C.; STEGEMANN, J.A.; CALDWELL, R.J. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and this implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. **ACI Materials Journal**, USA: American Concrete Institute, v. 95, p. 389-394, 1998.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSTHO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 537-545, 2004.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London, f. 475, 1998.

TIBONI, R. **A utilização da cinza de casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

VON SPERLING, M. V. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 3. ed. v. 1, 2005.

WBCSD. **World Business Council for Sustainable Development**. The cement sustainability initiative, our agenda for action. 2009.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S. Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. **ACI Materials Journal**, v. 2000, Title nº 97-M29, Mar.-Abr. 2000.