



Análise da viabilidade técnica da substituição parcial de cimento Portland por resíduos da indústria do silício para produção de argamassa

**Marcilene de Abreu Santos¹, Marlos Henrique Pires Nogueira¹, Luzilene Souza Silva¹
Laércio Gouvêa Gomes¹**

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) - Belém - PA - Brasil

marcilene@gmail.com, paulistta2000@yahoo.com.br,
eng.luzilene@gmail.com, laercio.gouvea@gmail.com

Resumo. *Este trabalho investiga o efeito nas propriedades físico-mecânicas de argamassas produzidas com substituição de fração parcial, em massa, do cimento, por rejeito de cinza de Silício. Para tanto, foi realizado um experimento laboratorial, no qual foi feita a substituição do cimento por percentuais de 5%, 10% e 15% de rejeito de silício para a fabricação de argamassa colante. As amostras produzidas foram submetidas a ensaios de densidade aparente, resistência à compressão axial e tração na flexão. Os resultados mostraram que houve um aumento na propriedade mecânica de resistência à compressão axial para as argamassas com a adição do rejeito da cinza de Silício, a exceção do traço com substituição de 5%, o qual apresentou uma pequena queda em relação à argamassa de referência. No entanto, no ensaio de tração na flexão, o compósito com substituição de 5% exibiu o melhor desempenho entre todas as amostras analisadas. Também se observou que para todas as composições com adição de rejeitos de cinza de silício, houve uma diminuição na densidade aparente no estado endurecido, em comparação ao traço padrão. Com isso, o presente trabalho concluiu que a substituição de cimento por rejeito de cinzas de Silício para a produção de argamassas colantes pode ser uma alternativa viável, sendo necessário, no entanto, a realização de outras análises como: aderência por tração perpendicular, tempo teórico em aberto e deslizamento a depender da aplicação.*

Palavras Chave: *Reciclagem. Compósitos Cimentícios. Rejeito de Cinzas de silício.*

Abstract. *This work investigates the effect on the physicochemical properties of mortars produced with substitution of partial partial fraction of cement by silicon ash reject. For this, a laboratory experiment was carried out, in which the cement was replaced by 5%, 10% and 15% silicon tailings for the production of adhesive mortar. The samples were submitted to bulk density, axial compression strength and flexural tensile tests. The results showed that there was an increase in the mechanical property of axial compressive strength for mortars with the addition of silicon ash tailings, except for the 5% substitution trait, which showed a slight decrease compared to the reference mortar. However, in the flexural tensile test, the 5% replacement composite exhibited the best performance among all samples analyzed. It was also observed that for all compositions with addition of silicon ash tailings, there was a decrease in bulk density in the hardened state compared to the standard trace. Thus, the present work concluded that the replacement of cement by silicon ash tailings for the production of adhesive mortars may be a viable alternative, but it is necessary, however, to perform other analyzes such as: perpendicular traction adhesion, theoretical time. open and slip depending on the application.*

Key words: *Recycling. Cement Composites. Silicon Ash Tailings.*



1. Introdução

Devido aos avanços tecnológicos ocorridos no campo da engenharia de materiais, cada vez mais torna-se necessário que o engenheiro deste setor aprimore seus conhecimentos, a fim de combinar propriedades de materiais distintos para formar novos compósitos, que sejam mais econômicos e duráveis, e que atendam aos requisitos exigidos para a aplicação a que são solicitados.

Argamassas, em sua grande maioria, são compostas por areia, cimento, aditivos, adições e água. É importante se ater as características de cada um desses componentes. As características físico-químicas da areia têm impacto direto nas propriedades de trabalhabilidade; retração; resistência e impermeabilidade do compósito (CEZAR, 2011).

Segundo Petrucci (2003) o cimento, por sua vez, age como um coagulante da mistura, sendo o responsável por unir os agregados e promover aderência. A dosagem desse componente é muito importante e tem que ser feita de forma precisa e sistemática, pois o excesso de cimento pode elevar a retração e ocasionar fissuras. Já os aditivos são produtos químicos que vêm a alterar as propriedades cimentícias das argamassas ou concretos.

As adições, comumente confundidas com aditivos, não são produtos químicos e sim minerais. Exemplos de adições são as escórias de alto-forno, pozolanas (cinzas volantes) e fíleres calcários. A grande característica das adições é a possibilidade do uso de partículas bastante finas sem o risco de retração. Suas funções se assemelham aos aditivos, conferindo melhor desempenho para as argamassas (INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO, 2016).

A produção de argamassas consome grande quantidade de cimento. Este material, além de ser o componente mais oneroso da mistura, também é considerado uma fonte poluidora para o meio ambiente, já que em sua produção é consumida grande quantidade de energia e recursos naturais. Devido a isso, tem avançado a realização de estudos relacionados a materiais alternativos para substituição do cimento.

Cezar (2011) fez um estudo sobre o uso de cimentos com maior percentual de adições e a substituição parcial do cimento por adições minerais para a diminuição na utilização de clínquer e a consequente liberação de gás carbônico. Para este autor, o uso de adição mineral, na substituição parcial do cimento das misturas para a argamassa, ajuda na busca de soluções alternativas para a preservação do meio ambiente.

São vários os materiais que podem ser incorporados na argamassa, como por exemplo: cinza de casca de arroz; cinza de caroço de açaí; bagaço da cana de açúcar; etc. O uso destes resíduos traz benefícios ambientais e econômicos para a argamassa, uma vez que, ajuda a reduzir os impactos causados pela produção de cimento e também auxilia na promoção da logística reversa destes materiais (PETRUCCI, 2003).

As indústrias de mineração exercem forte papel na economia do país, no entanto, seus processos de beneficiamento de minérios geram grande quantidade de rejeitos que necessitam ter uma destinação ambientalmente adequada. Entre estes, está o Silício, que se apresenta na forma de cinza volante ou *fly ash*, proveniente das reações térmicas do minério com carvão mineral ou vegetal, aparas de madeira, coque de petróleo ou grafite. Podendo também ser formada através de outros ramos industriais, como por exemplo, em termelétricas, indústrias do carvão e em altos-fornos metalúrgicos (ABEL, 2009).

Diante deste cenário, formulou-se a seguinte pergunta: qual viabilidade técnica do uso de cinza de Silício em substituição de fração parcial em massa de cimento para produção de argamassa colante de assentamento?

2. Indústria de mineração na Amazônia

A Amazônia brasileira possui uma das maiores e mais diversificadas reservas minerais do planeta. A importância econômica do setor mineral, em nível agregado, é significativa. No Estado do Pará, principal Estado mineiro da Amazônia, o setor mineral responde por 40% das exportações e 12% do Produto Interno Bruto estadual (ENRÍQUEZ; DRUMMOND, 2007).

Para Enríquez (2008), na Amazônia brasileira se localizam os seguintes percentuais, das reservas minerais, sobre o total do país: 30%, ferro; 80%, bauxita; 50%, caulim, 75%, cobre e; 87%, estanho. Em relação aos quantitativos obtidos atualmente, nessa região, sobre o total extraído pela indústria da mineração, Marini (2011) apresenta os seguintes dados: 26% do ferro, 26% do cromo, 74% do manganês, 80% do cobre, 85% do alumínio, 96% do caulim, 100% do estanho, e 100% do tântalo.

Pelo que se constata nos argumentos do IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração, defensor dos interesses das mineradoras, esse potencial mineral justifica os projetos, em andamento, e ou implantação, na região Norte, visando à extração e ou processamento de minerais de alumínio, bauxita, caulim, calcário, cobre, ferro gusa, manganês, níquel, ouro, e Silício metálico (IBRAM, 2014). Ainda segundo dados do IBRAM (2014) a transformação de bens minerais teve início nos anos 1980, com a produção de alumínio, a partir de então se diversificou significativamente, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Produtos da indústria de transformação mineral do Pará

Bem mineral	Produtos da indústria de transformação exportados pelo Pará
Areia	Vidros de segurança, temperados e espelhos
Argilas	Telhas de cerâmica, tijolos para construção, pias, lavatórios, louças sanitárias e artefatos de porcelana
Bauxita metalúrgica	Alumina calcinada, alumínio, óxidos de alumínio, fios, cabos e artefatos domésticos
Calcário	Cimento Portland comuns, outras obras de cimento, elementos pré-fabricados para construção, blocos de concreto etc.
Cobre	Catodos de cobre refinado, ligas de cobre-estanho (bronze), fios de cobre
Ferro	Ferro fundido, ferroníquel, aço estanhados, tubos de ferro fundido não maleável
Níquel	Barras de níquel não ligado, ligas de níquel, em forma bruta, tubos de níquel
Ouro	Ouro em barras e joias
Rochas ornamentais	Ardósia natural trabalhada, granito talhado ou serrado, de superfície plana ou lisa e mármore.
Silício	Silício metálico, ferro-silício-manganês
Tântalo	Outros produtos que utilizam tântalo

2.1. Geração de cinza de rejeitos de Silício e seus respectivos impactos ambientais

Apesar de indubitavelmente gerar riqueza e crescimento econômico, sendo um dos importantes setores da economia brasileira, a indústria extrativa mineral está entre as atividades antrópicas que mais causam impactos socioeconômicos e ambientais negativos, afetando, portanto, o território onde se realiza a mineração (ARAÚJO et al., 2014).

O Brasil é um dos principais produtores de quartzo no mundo e no futuro será o único país capaz de fornecer a vertiginosa demanda de Silício para fabricação de fibras ópticas, células solares e química fina, mas em contrapartida, esta situação de privilégio apresenta

uma série de inconvenientes como o impacto ambiental que incorre das atividades de processamento primário de produção do Silício. Atualmente no Brasil, a quantidade de quartzo extraído é da ordem de 2 milhões de toneladas/ano (para produção de Silício e ferro-silício), desse total extraído, cerca de 15% são descartados na forma de rejeitos de lascas de quartzo durante o processo de extração, “crushing”, seleção, transporte, e lavagem (ARGONZ, TORIKAI e SUSUKI, 2004).

Segundo Ramos et al., (2017) a produção do Silício metálico ocorre por meio da fusão redutora de quartzo (minério de Silício), carvão vegetal e cavaco (madeira) em fornos elétricos de redução do tipo arco submerso. As partículas grossas originadas por combustão são retidas em um ciclone pré-separador que reduz a carga de pó ou partículas quentes do gás que chega ao filtro, conforme ilustrado no Fluxograma da Figura 1, essas partículas constituem um resíduo, formado por cinzas de origem vegetal e mineral.

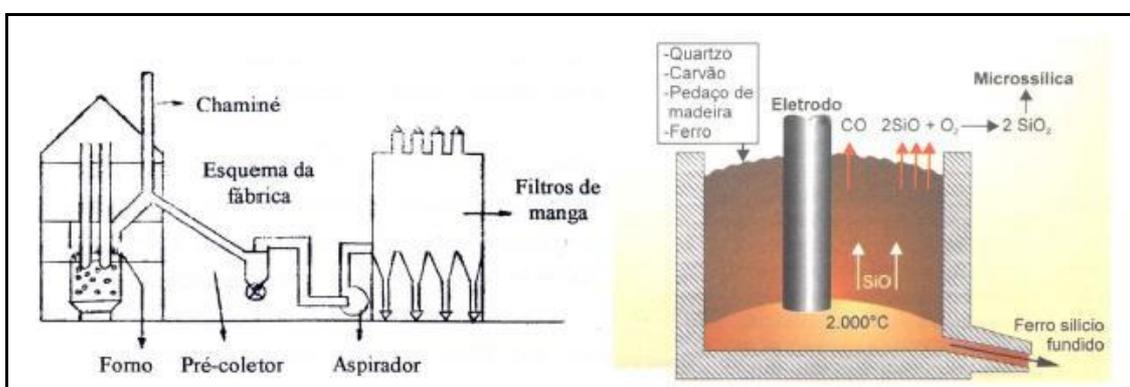


Figura 1. Fluxograma da geração das cinzas de rejeito de Silício (Ramos et al., 2017)

De acordo com Santos (2007) o arco elétrico fornece calor para a redução dos diferentes óxidos presentes nas matérias primas pelo carbono e outros elementos. A Figura 2 apresenta regiões de um forno elétrico a arco usado para produção de ferroligas. As regiões secas, de transição, de amolecimento e de fusão, de escória e de liga têm origem em fenômenos químicos e físicos que ocorrem à medida que a carga desce no forno.

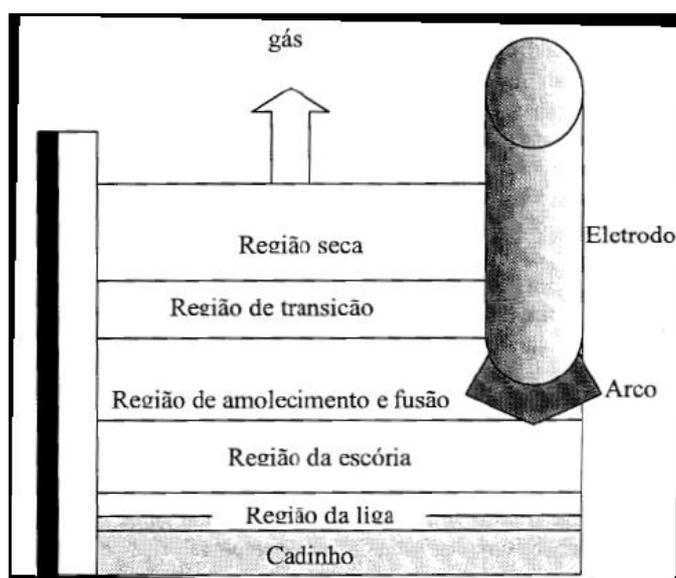


Figura 2. Forno elétrico a arco (Ramos et al., 2017)



Segundo Ramos *et al.*, (2017) empresa de beneficiamento do Silício, localizada no estado do Pará, afirma que o resíduo é um material abundante que é produzido na ordem de 40 toneladas/mês e não tem aplicação tecnológica e destinação que gere valor agregado. Por isso, acabam sendo descartados na natureza. Barata e Dal Molin (2002) alertam que este fato constituiu-se obviamente em um risco ambiental quando não são tomadas as devidas precauções por parte da empresa geradora do resíduo, além do desperdício de energia e matéria-prima, uma vez que muitos destes resíduos incorporam grande conteúdo energético e, normalmente, são ricos em compostos inorgânicos como óxidos de Silício, alumínio, ferro, cálcio e sulfatos, que os habilitam a serem utilizados como matéria prima pelas indústrias de cerâmica, de cimento, de gesso e para a fabricação de insumos destinados à construção civil.

2.2. Classificação do Rejeito

No que se refere à classificação ambiental das cinzas do Silício, a Lei 12.305/2010 do CONAMA, afirma que "resíduos sólidos" são os materiais que ainda possuem algum valor para serem empregados, através de tecnologia disponível e de forma economicamente viável, mesmo que numa finalidade diferente daquela prevista inicialmente. Já os "rejeitos", são caracterizados como os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Utilizando a definição de Michaelis (2016), que trata a "escória" como resíduo sólido proveniente da fusão de metais ou da combustão de determinadas matérias, pode-se concluir que os elementos resultantes dos processos siderúrgicos, podem ora se apresentar como resíduo, e ora como rejeito. O material utilizado na presente pesquisa trata-se de uma escória, que vem sendo tratada como rejeito. Entretanto, alguns esforços vêm sendo empregados para torná-lo um resíduo reaproveitável com destinação final ambientalmente adequada.

2.3. Aproveitamento dos rejeitos de Silício

A maioria das indústrias de transformação e beneficiamento de Silício é geradora de resíduos que provocam grandes impactos ambientais, nos três estados da matéria: sólidos, líquidos e gasosos. A reciclagem desses resíduos, bem como sua inserção para produção de novos materiais, são maneiras de evitar e/ou diminuir a poluição do meio ambiente, sendo consideradas alternativas viáveis para realizar a logística reversa desses produtos.

Segundo a Resolução CONAMA nº. 307 (2002), o reaproveitamento de resíduos pode ser abordado com três enfoques distintos:

- **Recuperação:** compreende na extração e remoção de algumas substâncias presentes nos resíduos, como óxidos, metais e etc.;
- **Reutilização:** é o processo de reaplicação de um resíduo, sem que haja qualquer transformação ou beneficiamento do mesmo;
- **Reciclagem:** é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após este ter sido submetido a algum tipo transformação.

A reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos gerados no beneficiamento do Silício podem ser técnica, e ecologicamente viável. Reduzindo a quantidade de volume de resíduos em lugares inadequados, e contribuindo para o desenvolvimento sustentável do planeta.

No decorrer dos anos, o investimento em soluções sobre a reciclagem de resíduos industriais vem sendo intensificada em muitos países. Diversas companhias vêm investindo em pesquisa e tecnologia para reutilização de rejeitos industriais, o que aumenta a qualidade do produto reciclado e propicia maior eficiência do sistema produtivo (TAKANO *et al.*, 2000).



Alguns pesquisadores têm demonstrado que este subproduto pode ter algumas possíveis aplicações, como por exemplo, Ramos *et al.*, (2017) que investigaram a capacidade de adsorção do resíduo industrial proveniente do processo de produção do Silício metálico frente ao corante alaranjado de metila aplicando-se isotermas de adsorção. Dentre os fatores que influenciam o processo de adsorção, os autores analisaram o ponto de carga zero, a granulometria e a composição química do adsorvente. Os ensaios realizados neste estudo demonstraram que o resíduo proveniente da produção do silício metálico pode ser considerado um adsorvente promissor devido apresentar maior capacidade de adsorção quando comparado a outros materiais.

Algumas pesquisas estão voltadas também a inserção deste resíduo em misturas de matriz cimentícia. Sousa e Guimarães (2014) analisaram os efeitos das adições de sílica ativa e xerogel nas propriedades das argamassas de revestimento. Estes autores produziram argamassas contendo teores de resíduos de silício metálico de 5%, 10% e 15%, em substituição à massa de cimento. Os ensaios de consistência indicaram que as argamassas apresentaram consistência seca para todos os teores. Para o ensaio de retenção de água observou-se que todos os traços foram classificados como classe U6 (95% - 100%), conforme NBR 13281 (ABNT, 2005). Os resultados também demonstraram que todas as argamassas produzidas com teores de substituição de sílica ativa e xerogel apresentaram resistências superiores à argamassa de referência, sendo classificadas conforme NBR 13281 (ABNT, 2005) em classe P6 (>8 MPa). A argamassa de referência apresentou uma média 20,76 MPa de resistência à compressão. As argamassas com teores de 5%, 10% e 15% de substituição de sílica ativa à massa do cimento apresentaram, respectivamente, resistências à compressão iguais a 24,53 MPa, 32,51 MPa e 33,09 MPa.

Barros (2015), em sua dissertação de mestrado, buscou verificar a possibilidade do aproveitamento das cinzas volantes de carvão mineral advindas de uma termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), para aplicação em camadas granulares de pavimentos. Foram realizados ensaios de caracterização física, mecânica e ambiental das cinzas (classificadas como não inertes) e de um solo local, bem como de misturas estabilizadas granulometricamente (solo+cinza) e misturas estabilizadas quimicamente (solo+cinza+cal). A partir de análises numéricas com o programa CAP3D, as duas estruturas foram comparadas quanto às deflexões ocorridas no topo do pavimento, deformações horizontais na fibra inferior das camadas asfálticas e tensões verticais no topo do subleito. Os resultados obtidos, a partir do programa experimental desenvolvido para a região e solos estudados, encorajam o emprego das cinzas volantes em camadas granulares dos pavimentos.

3. Materiais e métodos

3.1. Materiais utilizados

Para a confecção da argamassa utilizou-se o cimento CP-II-Z-32 RS, por ser um ligante hidráulico que pode ser utilizado em diversos tipos de obras, tendo como principal característica a elevada resistência a sulfatos. Este cimento possui, aos 28 dias, uma resistência superior aos cimentos comuns, até mesmo em ambientes agressivos. Além disso, tem uma maior durabilidade.

Para agregado miúdo utilizou-se areia natural proveniente da jazida do Km 21(Castanhal - Pará, Brasil). Após o recebimento do material, foram feitas coletas para amostragem e identificação do agregado, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009). A sua caracterização contou com ensaio de composição granulométrica, conforme o que estabelece a NBR NM 248 (ABNT, 2003), massa específica, segundo os procedimentos descritos na NBR NM 52 (ABNT, 2009), e massa unitária com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006).

As amostras de rejeito de Silício (Figura 3) foram fornecidas por uma indústria de beneficiamento, localizada na no município de Tucuruí - PA, na qual o material foi submetido a processo metalúrgico.



Figura 3. Forno elétrico a arco

A água utilizada foi proveniente da rede abastecimento público local, fornecida pela companhia de saneamento do Pará (COSANPA). Já como aditivo, utilizou-se o aditivo plastificante líquido do tipo ERCA 3605 superplastificante.

3.2. Métodos

3.3. Determinação da dosagem

Para a realização da produção das argamassas à base de cimento e cinza de rejeito de Silício, o aglomerante hidráulico da mistura foi parcialmente substituído, em massa, pela cinza, nas porcentagens de 5%, 10%, e 15%. Também foi executado um traço de referência (argamassa sem adição de cinza) para efeitos comparativos. O traço padrão adotado foi de 1:3 (cimento/areia) e a relação água/cimento estabelecida foi de (0,50). As nomenclaturas utilizadas para as amostras foram: AR (para o compósito sem adição de resíduo), ARS5 (para o compósito com adição de 5% de resíduo), ARS10 (para o compósito com adição de 10% de resíduo), ARS15 (para o compósito com adição de 15% de resíduo).

3.4. Produção dos corpos-de-prova

No processo de fabricação da argamassa, os materiais componentes foram homogeneizados em uma argamassadeira e, após completar a mistura, a moldagem foi feita em duas camadas. Após o processo de moldagem e cura os corpos-de-prova foram colocados em moldes cilíndricos 50 X 100 mm e prismáticos 40 x 40 x 160 mm. Foram confeccionados ao todo 72 corpos-de-prova para a realização dos ensaios. O tempo de mistura foi de 4 minutos. Após a desforma (24 h após a moldagem), os corpos-de-prova permaneceram 28 dias em cura úmida e após isso foram ensaiados.



Figura 4. Etapas da produção e moldagem dos corpos-de-prova de argamassa – (a) insumos utilizados; (b) e (c) homogeneização; (d) corpos de prova prismáticos; (e) corpos de prova cilíndricos

3.5. Realização dos ensaios mecânicos e físicos

3.5.1. Ensaio de resistência à compressão axial

A Resistência à compressão axial é uma das propriedades mais importantes das argamassas para definição de projetos. Existem vários métodos padronizados para aferição desta grandeza, entre os quais está o teste de compressão uniaxial padrão, descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005), o qual foi utilizado neste trabalho. Os resultados deste ensaio são aceitos universalmente como um índice geral da resistência do material. Para a realização dos testes foram utilizados 4 corpos de prova prismáticos para cada traço, que foram rompidos após os 28 dias em cura úmida, em uma prensa hidráulica.

3.5.2. Ensaio de resistência à tração na flexão em corpos de provas prismáticos

A resistência tração na flexão é expressa em termos de módulo de ruptura, que é a resistência máxima à ruptura calculada a partir da fórmula de flexão (MEHTA e MONTEIRO, 2008). O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com base na norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram utilizados 3 corpos-de-prova prismáticos para cada traço, que foram rompidos aos 28 dias. Os corpos de prova foram posicionados no equipamento de ensaio e então foi aplicada uma carga até a tensão máxima de ruptura, Figura 5.



Figura 5. Ensaio de tração na flexão

3.5.3. Ensaio de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido

A densidade de massa no estado endurecido foi determinada para 28 dias de cura em 3 corpos-de-prova prismáticos (40 x 40 x 160) mm, para cada argamassa, conforme procedimentos da NBR 13280 (ABNT, 2005). Segundo Bezerra (2010) esta é uma propriedade importante quando se faz uso de materiais com grande superfície específica como e o caso das cinzas volantes.

4. Resultados obtidos

4.1. Características físicas do agregado miúdo

Conforme a classificação da NBR 7211 (ABNT, 2009), a areia por apresentar um módulo de finura de (1,80) enquadra-se na faixa da zona utilizável inferior. Como pode ser observado no Gráfico da Figura 7. Tais resultados foram obtidos por meio do ensaio de composição granulométrica, o qual foi descrito no capítulo três deste trabalho.

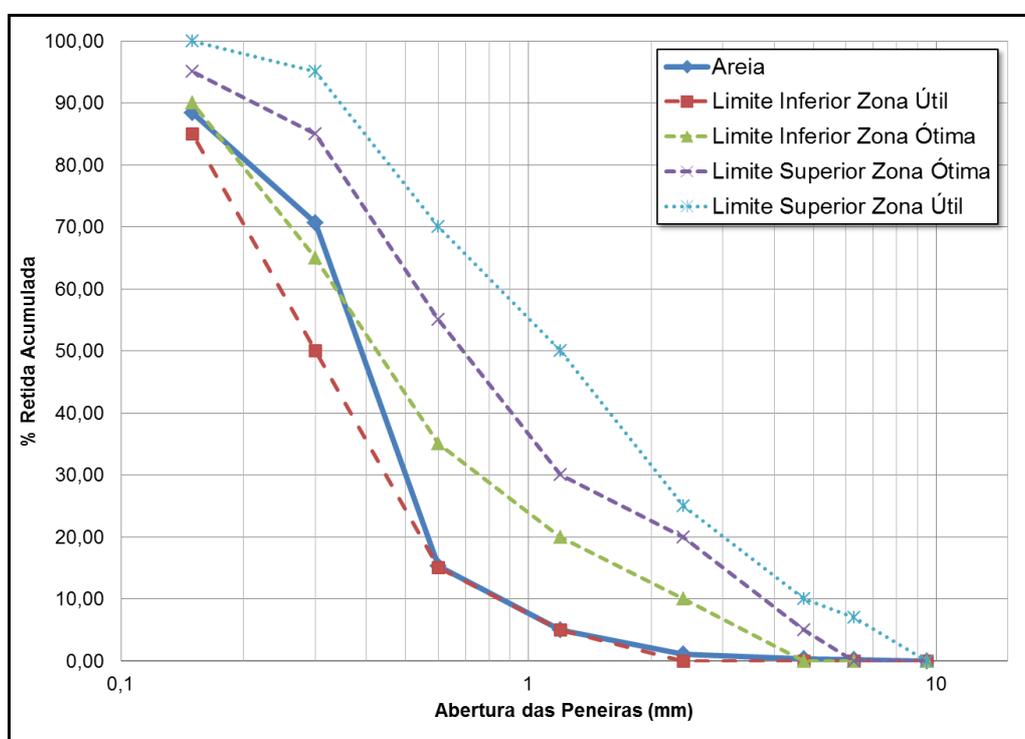


Figura 7. Curva de distribuição granulométrica da areia

Em relação à massa específica e massa unitária, as quais também foram obtidas por meio da realização dos ensaios que foram descritos no capítulo três deste trabalho, os valores obtidos nos ensaios estão descritos na Tabela 2. Observa-se que a areia obteve um valor de 2,63 g/cm³ para a massa específica. No que se refere à massa unitária, o valor encontrado foi 1,69 g/cm³.

Tabela 2. Massa Unitária e Específica da areia

Agregado	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)
Areia	2,63	1,69

4.2. Resistência à compressão axial das argamassas

O Gráfico da Figura 7 apresenta a média aritmética dos resultados do ensaio de compressão axial simples que foi realizado aos 28 dias de cura da argamassa, para as composições que foram executadas em corpos de prova cilíndricos, conforme especificações da NBR 13279 (ABNT, 2005).

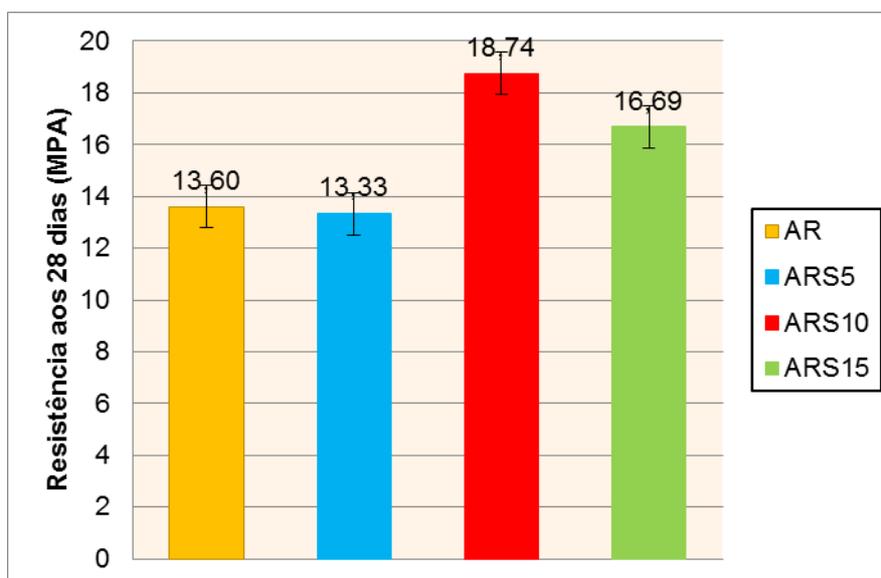


Figura 7. Resistência à compressão axial

Ao analisar os valores do gráfico da Figura 7, observa-se que os melhores resultados foram referentes às argamassas com adição das cinzas do rejeito de Silício, com exceção do traço ARS5, que apresentou uma pequena queda em relação à AR, da ordem de 1,98%. Estes resultados demonstram que a substituição de fração parcial em massa de cimento por rejeito de cinza de Silício propicia melhorias na resistência à compressão axial da argamassa. Isto pode ser explicado pelas propriedades pozolânicas deste material, que possui características semelhantes as do cimento, funcionando dessa forma, como adições.

O material pozolânico, de acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos com propriedades cimentantes. Entre as composições analisadas a que obteve melhor desempenho foi a ARS10, com um aumento de 27,42% em relação ao traço de referência.

4.3. Resistência à tração na flexão das argamassas

O Gráfico da Figura 8 apresenta as médias aritméticas dos resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão das argamassas analisadas.

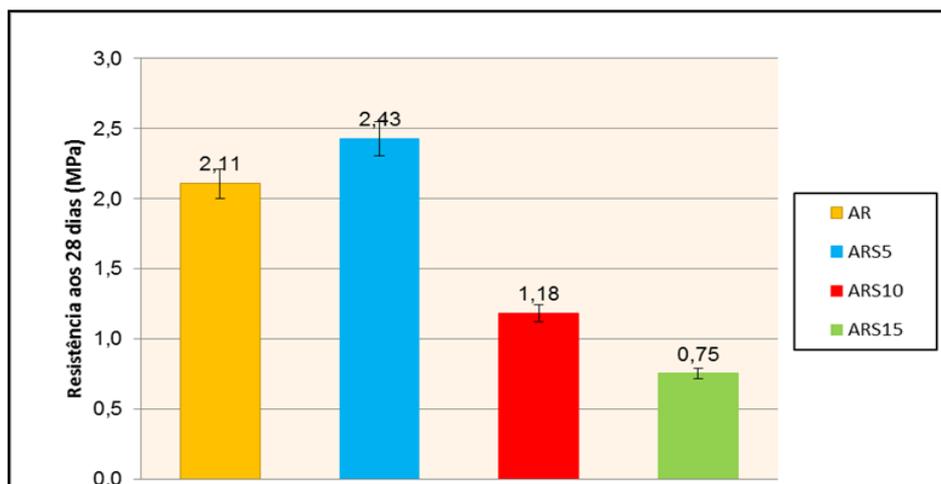


Figura 8. Resistência à tração na flexão

Verifica-se que neste caso, as composições que apresentaram melhor desempenho foram a ARS5 e AR, sendo que os traços ARS10 e ARS15 obtiveram uma queda na resistência no valor de 44,07% e 65,45%, respectivamente, em relação ao traço de referência. Esta diminuição pode estar atrelada a problemas no processo de produção ou moldagem dos corpos de prova, sendo necessárias novas investigações em relação a esse efeito.

4.4. Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas

O Gráfico da Figura 9 apresenta as médias aritméticas dos resultados obtidos nos ensaios de densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas produzidas. Observa-se uma relação de diminuição nessa propriedade, quase que constante, para todas as composições com substituição de fração parcial de cimento por cinza de rejeito de Silício. Os valores de decréscimo observados em relação ao traço de referência foram de: 5,44% para as composições ARS5 e ARS15 e 5,86% para a ARS10. Este aspecto observado é interessante do ponto de vista da aplicação deste material, já que, argamassas mais leves possibilitam maior facilidade de aplicação e propiciam menor peso próprio a estrutura caso sejam aplicadas em um revestimento de fachada, por exemplo.

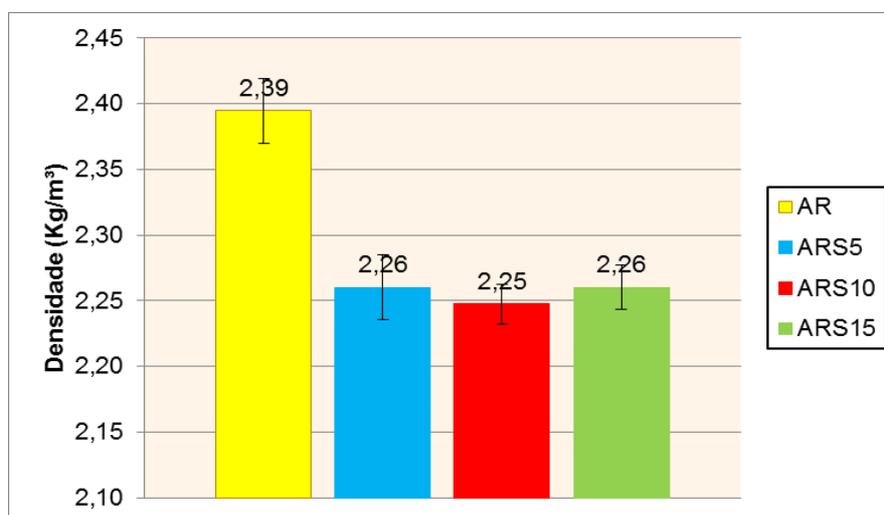


Figura 9. Densidade de massa aparente no estado endurecido



Caraseck (2007) afirma que a densidade das argamassas no estado endurecido depende principalmente da massa específica do agregado miúdo e do teor de ar incorporado na massa. Neste caso pode-se inferir que a diminuição de densidade observada nos traços com rejeito deve-se ao maior teor de ar incorporado na mistura cimentícia, haja vista que, estas composições apresentaram um maior índice de vazios em relação ao traço de referência.

5. Conclusão

Rejeitos de cinza de Silício foram utilizados em substituição de fração parcial, em massa, de cimento, para produção de argamassa. Os resultados obtidos revelaram que esta pode ser uma alternativa viável, do ponto de vista técnico, que contribui para redução da utilização do cimento, que além de ser o componente mais oneroso dos compósitos à base cimentícia, gera impactos ambientais durante o seu processo de produção. Esta ideia ainda tem o grande ganho ecológico, gerado pela possibilidade de reaproveitamento do rejeito proveniente da indústria de Silício metálico, que até então, não tem nenhum tipo de aplicação por parte da fonte geradora. No entanto, considera-se que para que a utilização deste resíduo como substituo ao cimento para a produção de argamassa colante possa ser considerado de fato viável, é necessário a realização de outros trabalhos, os quais possam analisar fatores tais como: aderência por tração perpendicular, tempo teórico em aberto e deslizamento a depender da aplicação

Dentre as principais conclusões deste trabalho estão:

- i. Considerando as amostras analisadas, houve uma diminuição nas massas específicas dos compósitos com substituição do cimento por rejeito de silício, o que contribuí para as possíveis aplicações destes compósitos como argamassa colante, uma vez que facilita o manuseio e diminui o peso próprio da estrutura.
- ii. O aumento da resistência à compressão axial está relacionado à interação da relação A/C e faixa granulométrica do rejeito de Silício e também as propriedades cimentantes deste material, que possui características semelhantes as do cimento. As composições ARS10 e ARS15 apresentaram um considerável aumento na resistência à compressão axial em comparação a argamassa de referência.
- iii. Os traços com incremento das cinzas de silício apresentaram uma queda em relação à propriedade de tração na flexão, sendo necessários outros estudos neste sentido, a fim de identificar a real causa dessa ocorrência.
- iv. O compósito que apresentou os melhores resultados nos aspectos de resistência à compressão axial foi o ARS10. Todavia, considerando os aspectos de resistência a tração na flexão e densidade no estado endurecido, o traço com melhor desempenho, sendo considerado como o teor ótimo de substituição do cimento, foi o ARS5.

6. Referências

- Abel, J. L. (2009) "Obtenção do carboneto de silício pela redução carbotérmica da sílica", USP, São Paulo, In: doi:10.11606/D.85.2009.tde-16112009-133532, outubro.
- Araújo, E. R., Olivieri, R. D., Fernandez, R. C. F. (2014) "Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente", Artigo científico, In: Revista Matéria.
- Argonz, R., Torihai, D., Suzuki, C. K. (2004) "Purificação ambientalmente correta de rejeitos de lascas de quartzo das indústrias de silício", in: Anais do 48º congresso brasileiro de cerâmica, 28 de junho a 1º de julho de 2004.



- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: NM 45 (2006) "Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: NM 248 (2003) "Agregados - Determinação da composição granulométrica", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (1996) "Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279 (2005) "Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280 (2005) "Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52 (2009) "Agregado miúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 (2009) "Agregados para Concreto", Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653 (2015) "Materiais pozolânicos - Requisitos", Rio de Janeiro.
- Barata, M. S., Dal Molin, D. C. C. (2002) "Avaliação preliminar do resíduo caulinitico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa", In: revista ambiente construído, Porto Alegre, v.2, n.1, p. 69-78. jan-mar.
- Barros, K. S. (2015) "Estudo de cinzas volantes de uma termelétrica da região metropolitana de Fortaleza-Ce para aplicação em camadas granulares de pavimentos", Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE.
- Carasek, H. (2002) "Argamassas", In: materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais, Isaia, G. C. (Organizador/Editor), São Paulo: IBRACON p. 863-804.
- Cezar, S. D. (2011) "Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento", Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria - RS.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA (2002) "Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil", Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, n. 136, p.95, 17 de julho.
- Enríquez, M. A. R. e Drummond, J. A. (2007) "Mineração e Desenvolvimento Sustentável: dimensões, critérios e propostas de instrumentos", In: Fernandes, F. R. C., Tendências Tecnológicas Brasil 2015 - Geociências e Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM, v. 01, p. 245-272. Cap. 2.
- Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. (2012) "Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira", 7 ed., <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>, abril.
- Instituto de Arquitetura e Urbanismo. IAU (2017) "Classificação segundo o tipo de adesão", http://www.iau.usp.br/pesquisa/grupos/arqtema/guiaceramicacompleto/02/content/02020203_classificacao_segundo_tipo_de_adexao.htm, novembro.



- Mehta, P. K. e Monteiro, P. J. M. (2008) "Concrete, microstructure, properties and materials" São Paulo: Ibracon, p. 674.
- Michaelis. (2016) "Dicionário Escolar – Língua Portuguesa", Editora - Melhoramentos.
- Pantoja, A. L., Silva, E. C. M. (2016) "Aproveitamento do resíduo de silício metálico (obtido do pré-separador) em substituição ao agregado miúdo na fabricação de pavimentos intertravados", Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pará.
- Petrucci, E. G. R. (2003) "Concreto de cimento Portland", 10 ed., Rio de Janeiro: Globo.
- Ramos, J. P., Pavão, M. F. U., Barra, E.C., Vilhena, K. S. S., Gouveia, F. P. (2017) "Potencial de adsorção do resíduo proveniente do processo de obtenção do silício metálico", ISSN: 1894-6835.
- Santos, L. M. M. (2007) "Siderurgia para cursos tecnológicos", Ouro Preto: ETFOP, p.154.
- Takano, C., Capocchi J. D. T., Nascimento, R. C., Mourão, M. B., Santos, D. M., Lenz G. (2000) "A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos", Seminário nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais, São Paulo.
- Sousa, I. B., Guimarães, P. S. (2014) "Avaliação dos efeitos das adições de sílica ativa e xerogel nas propriedades das argamassas de revestimento", Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Federal do Pará, Tucuruí - PA.